

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга написана выдающимися специалистами в области цветоведения и выдержала за рубежом три издания, последнее из которых было существенно переработано и дополнено. Она охватывает широкий круг вопросов и проблем, связанных с цветовым зрением, измерениями цвета, цветовыми системами, цветовыми шкалами, цветопередачей источников света, цветовыми наименованиями, гармонией цветов, физикой и психофизикой окрашенных пленок.

Книга может быть использована не только специалистами. Ее с успехом можно рекомендовать в качестве учебного пособия для студентов, изучающих цветоведение и колориметрию.

Предлагаемая читателю книга написана Джаддом и Вышецки, крупнейшими специалистами в области колориметрии, авторитетными руководителями технического комитета МКО по колориметрии. Уже по этой причине само издание книги на русском языке представляет несомненный интерес для широкого круга читателей, в той или иной мере связанных с разнообразными направлениями цветоведения и использующих знания в этой области в производственной работе.

В книге собран обширный современный материал, разбросанный по многочисленной периодической литературе, что делает эту книгу весьма полезной и интересной для специалистов. Большинство книг по цвету, с которыми знакомы советские читатели, ориентировано на проблемы цветного репродуцирования, т. е. на проблемы создания и воспроизведения цветных изображений средствами цветной фотографии, цветного телевидения или полиграфии. В книге Джадда и Вышецки вопросы, относящиеся к цветному репродуцированию, почти не рассматриваются. Предлагаемая книга отличается тем, что она ориентирована на широкую аудиторию лиц, связанных с производством красящих веществ и окраской разнообразных изделий и материалов.

Книга начинается с изложения основ колориметрии и обзора современных публикаций по теории цветового зрения. Далее дается обзор современных методов и аппаратуры колориметрии, а также подробно излагаются методы спецификации окрашенных образцов по эталонам разнообразных атласов цветов. В главе, посвященной теории окраски различных материалов, читатель знакомится с теорией Кубелки — Мунка, ее модификациями и формулами расчета смесей красок, отвечающих тем или иным требованиям колориметрии. Подробное изложение методик расчета сопровождается численными примерами, что представляет не только научный, но и практический интерес.

Следует отметить принятый авторами подход к изложению методов колориметрии, а именно они не разделяют две функции колориметрии, одна из которых заключается в количественном выражении измеряемых цветов и их обозначении, а другая — в количественной характеристике цветовых различий. Если методы измерения и обозначения цветов могут быть стандартизованы для достаточно длительного периода, то методы количественной

Редакция литературы по новой технике



229054

517.15 0303

Copyright © 1975 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

© Перевод на русский язык, «Мир», 1978

Д 20405, 30108—157 157—78
041 (01)—78

характеристики различий постоянно совершенствуются. Развитие этих методов должно происходить и фактически происходит как на основе уточняющихся представлений о механизме цветового зрения, так и в связи с более точным определением условий рассматривания объектов различного типа и назначения. Вследствие объединения этих двух функций колориметрии авторы книги часто обращаются к рассмотрению вопроса о представительности результатов стандартизованных колориметрических измерений.

Накопленный к настоящему времени объем знаний по механизму и эффектам цветового зрения неминуемо должен привести в недалеком будущем к созданию какой-либо нелинейной модели зрительного восприятия, специально приспособленной для решения широкого круга задач, требующих количественного выражения цветовых различий, в том числе и в цветных изображениях, при различных условиях освещения и рассматривания.

При переводе книги было использовано 3-е издание Международного светотехнического словаря МКО, вышедшее в Париже в 1970 г.

Квалифицированный перевод книги выполнен специалистами в различных областях колориметрии С. А. Бремзеным, И. В. Пеновой, К. И. Погореловым и И. С. Файнбергом.

Л. Ф. Артюшин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Со времени выхода в свет второго издания этой книги в 1963 г. сфера применения цветовых измерений для решения различных задач продолжала расширяться. Разрабатывались новые технические средства и стандарты с целью упростить и улучшить решение этих задач. Параллельно выполнялись фундаментальные исследования, открывшие новые аспекты в нашем понимании природы цветового зрения. За этот же период разработан Международный светотехнический словарь, в котором термины, относящиеся к колориметрии, представлены более полно, чем в терминологической системе, принятой Комитетом по колориметрии Оптического общества США и использованной в двух первых изданиях настоящей книги. По этим причинам в декабре 1971 г. Джадд и я пришли к выводу о необходимости тщательной переработки второго издания. Мы наметили хотя и предварительные, но вполне конкретные планы, касающиеся обновления материала, изложения отдельных мест на более современном уровне, а также исключения устаревших сведений. К несчастью, в последующие месяцы здоровье д-ра Джадда стало быстро ухудшаться, и в октябре 1972 г. он скончался. Совместное выполнение намеченной программы переработки книги оказалось невозможным. Тем не менее я предпринял попытку завершить эту программу, и надеюсь, что третье издание книги достойно того, чтобы на его титуле значилось имя д-ра Джадда в качестве одного из авторов.

Одна лишь замена терминологии на общепринятую сейчас международную терминологию потребовала переформулировки многих разделов текста. И д-р Джадд, и я тесно сотрудничали с д-ром Терьяном, председателем Технического комитета по определениям и словарям Международной комиссии по освещению (МКО), при разработке определений колориметрических терминов, которые были бы приемлемы для использования в международном масштабе. Я полагаю, что систематическое использование этих терминов несомненно сделает текст более ясным для наших иностранных читателей. Международный светотехнический словарь [100] содержит определения нескольких сотен наиболее специальных используемых нами терминов, приведенных на четырех языках (английском, французском, немецком и русском), а также перечень этих терминов на пяти других языках (голландском, итальянском, польском, испанском, шведском).

В колориметрию были введены новые стандарты, относящиеся к источникам естественного и искусственного освещения, отражательной способности, равноконтрастности цветового пространства, степени метамеризма. Было усовершенствовано и экстраполировано принятое МКО в 1931 г. понятие стандартного колориметрического наблюдателя, внесены изменения в сокращенные таблицы, характеризующие дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя. Эти изменения были приняты МКО в 1931 и 1964 гг. Новые стандарты были разработаны Техническим комитетом МКО по колориметрии, возглавлявшимся вначале Джаддом, а затем с 1963 г. мною. Большинство новых стандартов описано в [101]. В настоящем издании книги приведены все сформулированные заново официальные рекомендации по колориметрии, чтобы избежать какой бы то ни было неоднозначности и несогласованности. С 1964 по 1971 г. этот свод современных колориметрических стандартов подвергался пересмотру четыре раза; были учтены многие критические замечания, полученные от членов и консультантов Технического комитета по колориметрии.

Проблемы использования цвета в промышленности, впервые обсуждаемые в настоящем издании, включают подбор и изготовление окрашивающих веществ, цветовые допуски, воспроизводимость цвета источников освещения и колориметрию флуоресцирующих материалов. Обновлено в соответствии с современными данными и расширено изложение теорий цветового зрения. Включены сведения о состоянии еще не законченных исследований, таких, как предсказание уровня восприятия цветовых различий между двумя цветами. Завершение изучения данной проблемы необходимо для улучшения процесса подбора компонентов окрашивающих веществ с помощью цифровых вычислительных машин, установки цветовых допусков и уточнения зависимости изменения цвета от изменения характеристик источника освещения.

Поскольку в настоящем издании больше места отведено сложным аспектам измерения цвета и вновь включенной тематике, значительная часть сравнительно элементарных сведений изложена в сжатом виде. Я надеюсь, что это достигнуто не ценой ухудшения ясности изложения. Знания, касающиеся цветового зрения и цветовых измерений, сейчас распространяются более интенсивно, чем в 1963 г., и я полагаю, что данное издание удовлетворит современных читателей — более образованных и обладающих более широким кругозором по сравнению с читателями предшествовавшего издания.

Мы многим обязаны членам и консультантам Технического комитета МКО по колориметрии за обсуждение вопросов, представленных в настоящей книге. Столь же существенна была помощь Кеннета Келли, Джеральда Хауэтта и Гэри Йонемюра

из Национального бюро стандартов США, Вольфганга Будде, Аллана Робертсона, Леруа Сэндера из Национального совета по исследованиям Канады, Стайлса, работавшего ранее в Национальных физических лабораториях США, а также Карла Фосса, Дороти Никкерсон и Дэвида Мак-Адама из Комиссии по разработке равноконтрастных графиков цветности Оптического общества США, которым мы выражаем искреннюю благодарность.

Наконец необходимо упомянуть о Международной ассоциации по проблемам цвета (AIC), которая была организована в Вашингтоне в 1967 г. Первая конференция AIC «Цвет 69» была создана в июне 1969 г. в Стокгольме под председательством профессора Райта из Имперского колледжа в Лондоне. Летом 1971 г. под руководством первого постоянного председателя AIC д-ра Леграна из Парижского национального музея естественной истории был организован симпозиум по метрике цвета в Дрибергене (Нидерланды), а в июле 1973 г. в Йорке (Великобритания) состоялась вторая конференция AIC «Цвет 73». Деятельность AIC вызвала такой интерес к развитию всех аспектов науки о цвете и ее приложений, что можно с уверенностью сказать, что лет через десять возникнет необходимость в четвертом издании книги «Цвет в науке и технике».

Гюнтер Вышецки

Национальный совет по исследованиям,
Отава, Онтарио, Канада, февраль 1975 г.

ВВЕДЕНИЕ

Оценки по цвету производятся во всех областях нашей промышленной деятельности. Фермер судит о ценности обрабатываемой земли по цвету почвы. По цвету собираемых им сельскохозяйственных продуктов он оценивает удобрения. Сортировка выращенных им овощей и фруктов часто осуществляется по их цвету, и цены на них устанавливают также в соответствии с цветом. Сырую говядину и свинину, поступившую из его хозяйства, идентифицируют по цвету. Ценные минералы отбирают по их цветам и отбрасывают минералы, которые не имеют коммерческой стоимости, руководствуясь теми же критериями. Слюда, например, сортируют по цвету. Очень большим спросом пользуется слюда ярко-красного (рубинового) цвета; слюда других цветов продается по значительно меньшей цене.

Изготовитель продукции является одновременно покупателем и продавцом. Он судит о стоимости и однородности приобретаемого сырья по его цвету; произведенная им продукция оценивается в свою очередь с учетом цветовых характеристик. Сырые шерсть, хлопок и шелк сортируются в соответствии с их цветом, от которого зависит и их цена. Именно поэтому изготовитель текстильных товаров может выпускать однородные по цвету товары, стоимость производства которых достаточно низка, чтобы он смог их продать. Сортность строительного камня, песка, гравия, пиломатериалов и алебаstra для штукатурки сильно зависит от их цвета. Архитектор должен знать цветовые характеристики строительных материалов для того, чтобы возводимые по его проектам сооружения удовлетворяли заказчика. Цвета масел и смол, используемых в красках, измеряются очень тщательно, так же как и цвета пигментов и красителей. При рафинировании сырой нефти, когда производятся сотни сортов смазочных масел, жидких топлив и множество побочных продуктов, каждая стадия процесса регистрируется по изменениям цвета. Катализаторы и другие вещества, применяемые в этом сложнейшем процессе, покупаются и продаются по ценам, определяемым их цветом. Цены на растительные масла устанавливаются с учетом их цвета. Низкое качество хлопкового и кокосового масел и масла земляного ореха часто можно определить, оценивая их цвет. В то же время светлоокрашенные пищевые масла продаются по высокой цене независимо от их качества, потому что владельцы хлебопекарен знают,

что смогут легко продать выпеченные с помощью этих масел изделия.

Во многих отраслях промышленности преобладает массовое производство. Изготовление сложной машины, будь то холодильник или автомобиль, требует множества операций, каждая из которых осуществляется человеком, специализировавшимся именно на этой операции. На каждом этапе производства изделия в целом или отдельной его части могут возникать, и действительно часто возникают, проблемы измерения цвета, причем это случается как до начала процесса изготовления, так и после него. Возьмем для примера холодильник. Стенки его могут делаться из листовой стали, покрытой белой стекловидной эмалью, дверка в морозильник — из белой пластмассы. Не случайно, что эти детали должны обладать одинаковым белым цветом. Чтобы холодильник — этот символ машинного века — мог попасть в наш дом, причем по цене, которую мы в состоянии заплатить, десятки тысяч пластмассовых дверок должны быть окрашены в совершенно одинаковый белый цвет, а не иметь белую или почти белую окраску сотни различных оттенков, которые человеческий глаз способен отличить друг от друга. Сущность массового производства состоит во взаимозаменяемости деталей: любая из 100 000 дверок должна подходить к любому из 100 000 холодильников по размеру, форме и цвету.

Обшивка сидений автомобиля скроена не из одного куска материала. Отдельные ее части, вырезанные из разных рулонов, необходимо шить между собой. И опять не просто счастливой случайностью объясняется то, что мы воспринимаем ее сделанной из одного куска материала. Удовлетворяющее покупателя производство предметов потребления, обходящееся изготовителю с такими издержками, которые позволяют это производство расширять до больших масштабов, может быть осуществлено только с привлечением в широком объеме методов цветового контроля. Цветовые измерения являются неотъемлемой составной частью современной деловой жизни.

Цвет готового продукта играет большую роль только в области, в которой деловые отношения основаны на принципе «покупатель всегда прав». Если имеется широкий выбор товаров, ни один изготовитель не может пренебречь тем фактом, что в акте покупки чрезвычайно велико значение эмоционального фактора. Мы можем даже не осознать, что цвет обшивки заднего сидения автомобиля несколько отличается от цвета обшивки переднего, но у нас при этом возникает смутное ощущение неудовлетворенности, которая часто сводит на нет желание купить автомобиль.

Покупатели неизменно предпочитают бакалейные товары, упакованные в коробки из картона, окрашенного в яркие цвета, пренебрегая товарами в упаковках из поблекшего картона. Иногда

это связано с подсознательным ощущением, что продукт может быть несвежим; чаще же всего мы просто выбираем продукт в упаковке тех цветов, к которым уже привыкли. Поэтому цветовые допуски на окраску упаковок товаров распространенных торговых марок должны быть предельно малы.

Важность эмоционального эффекта цвета при покупке потребителем того или иного продукта хорошо иллюстрируется проблемой, связанной с продажей желтого маргарина. Его пищевая ценность не увеличивается при добавлении желтого красителя, но его успех у покупателя возрастает. И если желтая окраска устраняет чувство легкой тошноты у членов семьи, собравшихся за обеденным столом, кто может сказать, что дело того не стоит. Цвета потребительских товаров оказывают огромное влияние на их успех у покупателя. Некоторые товары (текстильные изделия, косметику, краски) мы покупаем главным образом из-за эмоционального эффекта их цвета и преднамеренно оцениваем этот эффект. Покупка других товаров определяется в основном иными целями, но часто мы реагируем на их цвет, не осознавая этого.

В сложной взаимосвязи процессов, образующих нашу экономическую жизнь, мы постоянно используем свои глаза для выбора тех или иных конкурирующих продуктов, будь то сырье на низших стадиях производства или готовая продукция после завершения его этапов. Для цветового контроля, цветовых измерений и отбора по цвету были созданы различные приборы и технические средства. Цель предлагаемой книги состоит, во-первых, в том, чтобы рассказать, как работает глаз, во-вторых, охарактеризовать оборудование, которое может помочь при цветовых измерениях, и, в-третьих, показать, как следует выбирать прибор, наилучшим образом приспособленный для данной конкретной задачи по измерению цвета. Несмотря на то что без колориметрии современная деловая жизнь уже немыслима и во многих отраслях промышленности она эффективно применяется при массовом производстве, в этой сфере существуют возможности для значительных усовершенствований. Более того, ни одна фирма не имеет монопольного права на какой-либо вид деятельности. Во всех областях, где появляется вероятность увеличить эффективность производства, могут возникать новые предприятия. Другие же фирмы, уже зарекомендовавшие себя, постоянно осваивают новые области производства. Это непрерывное приспособление к меняющимся требованиям, обеспечиваемое свободой промышленной деятельности, служит залогом нашей надежды на постоянный рост уровня жизни. Оценки по цвету, цветовые измерения и контроль играют важную роль в сокращении непроизводительных расходов в промышленности; остается надеяться, что данная книга сможет дать руководителям промышленных предприятий и технологам необходимую для этого информацию.

ОСНОВНЫЕ ФАКТЫ

Цветовое восприятие относится к одному из фундаментальных явлений, с помощью которых мы опознаем предметы, находящиеся вокруг нас. Для понимания природы цвета мы должны знать кое-что о человеческом глазе, о том, как он устроен и работает. Мы должны знать о разных типах глаз: о хороших глазах и о глазах с дефектами, о здоровых и больных — о том, как они могут давать нам поразительно подробную информацию, и о том, как они могут вводить нас в заблуждение. Нам потребуются также некоторые знания об энергии излучения — о том, как лучи, испускаемые источником света, изменяются, отражаясь от объекта, и как эти лучи преломляются и меняются, попадая в наши глаза. Мы должны будем понять важную роль химиков в разработке, внедрении и производственном контроле материалов (красок и пигментов), предназначенных для придания окрашиваемым объектам определенного цвета. Все это необходимо, потому что на ощущения цвета влияют как химические, так и физические факторы. Однако сам по себе цвет не сводится к чисто физическим или чисто психологическим явлениям. Он представляет собой характеристику световой энергии (физика) через средство зрительного восприятия (психология). Эта характеристика обусловлена свойствами человеческого глаза.

ГЛАЗ

Наши глаза дают нам возможность воспринимать размеры, форму, фактуру, блеск, прозрачность, мерцание и цвет объектов. Один из разработчиков фотоэлектрических колориметров однажды сказал, что человеческий глаз — слишком совершенная система, чтобы пытаться создать достаточно недорогой прибор, способный быть сравнимым с ним. Он оснащен термостатической системой регулирования, поддерживающей глаз при определенной температуре, с точностью не меньшей 1°C . Он снабжен устройством (веками), которые очищают роговую оболочку глаза несколько раз в минуту. Его фоторецепторы имеют надлежащую спектральную чувствительность. И все это оборудование стандартно и досталось большинству из нас без всяких дополнительных расходов. Главная трудность заключается в том, что оно связано не с хорошо отрегулированным электронным усилителем, а с мозгом.

Справедливо утверждение, что нормально функционирующий глаз выполняет удивительно разнообразную работу и справляется с ней прекрасно. Глаз отыскивает интересующие нас объекты, фокусирует изображение объекта на светочувствительном слое (сетчатке), защищает это изображение от рассеянного, не несущего информации об объекте света, преобразует сформированное таким

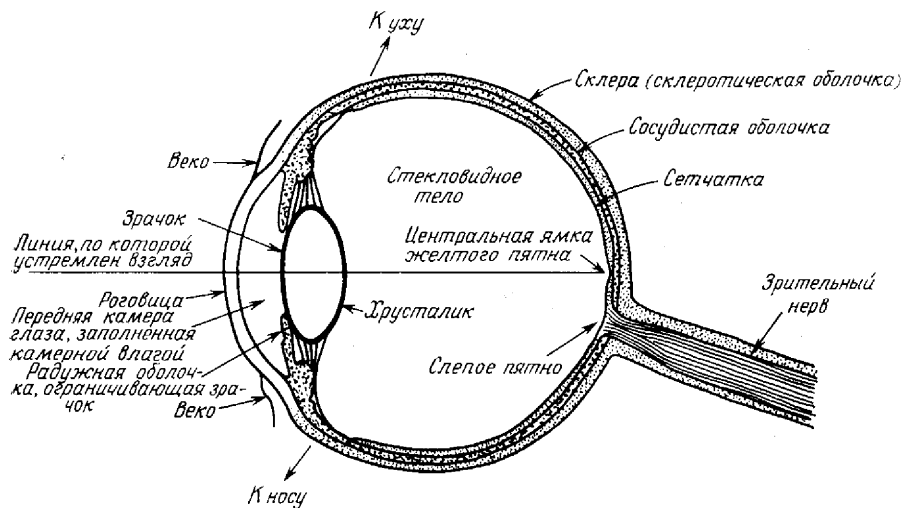


Рис. 1.1. Схема горизонтального поперечного сечения человеческого глаза.

образом оптическое изображение в совокупность нервных импульсов и передает закодированное в этих импульсах оптическое изображение в мозг по специальному каналу (зрительному нерву). На рис. 1.1 схематически показано расположение элементов глаза.

ФОКУСИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Лучи от объекта попадают на роговую оболочку (роговицу) и при этом почти полностью фокусируются на сетчатке. Фокусировка окончательно завершается естественной линзой, называемой хрусталиком. Если свет слишком яркое, диафрагма в радужной оболочке глаза (ириновая диафрагма) сужается так, что ее отверстие — зрачок — становится мал и используется только центральный участок хрусталика. Преимущественное использование именно этого участка хрусталика обеспечивает получение наиболее резкого изображения на сетчатке.

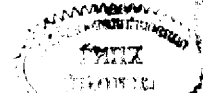
Роговица. Роговица представляет собой легко проницаемое для световых лучей продолжение белой склеротической оболочки

глаза (белка глаза). Передняя ее часть очень близка по форме к участку сферы, а ее внешняя поверхность поддерживается с точки зрения оптики в хорошем состоянии, постоянно промываясь соленой водой, которая поступает через слезные протоки. Эта поверхность достаточно часто очищается при мигании век, которые уносят загрязненную пылью соленую воду, заменяя ее чистой. Если какой-либо посторонний предмет попадает на роговицу, его присутствие тотчас же обнаруживается нервными окончаниями в самой роговице и на внутренней поверхности век. Нервные окончания столь чувствительны, что обычно произвольно предпринимаются немедленные меры, удаляющие этот предмет и восстанавливающие таким образом нормальное оптическое состояние поверхности роговицы.

Если между роговицей и хрусталиком скапливается чрезмерно большое количество так называемой камерной влаги, роговица становится сильно выпуклой, так что ее кривизна становится больше, при этом изображение наблюдаемых предметов фокусируются не на сетчатке, а перед нею (близорукость). Если же камерная жидкость создает слишком малое давление, поверхность роговицы становится плоской, в результате чего изображения фокусируются за сетчаткой (дальновидность) или не фокусируются вообще. Но у большинства людей кривизна роговицы нормальная, так что хрусталик обеспечивает получение сфокусированного изображения.

Зрачок. Зрачок представляет собой отверстие (ирисовую диафрагму) в радужной оболочке глаза, через которое проходит свет. Поскольку чрезвычайно малая доля света, попадающего в глаз, выходит из него, зрачок обычно выглядит черным. Радужная оболочка (радужка), окружающая зрачок, может быть черной, коричневой, зеленой или голубой в зависимости от того, содержит ли она много, не очень много, мало коричневого пигмента (меланина) или совсем не содержит его. Голубая окраска, соответствующая полному отсутствию меланина, обусловлена избирательным рассеянием света в тканях радужки. Механизм этого рассеяния аналогичен механизму, определяющему голубой цвет неба.

При темновой адаптации глаза радиальные по отношению к центру зрачка мышцы растягивают радужку, тем самым увеличивая площадь зрачка. Зрачок глаза, адаптированного к темноте, может достигать в диаметре 8 мм. Если же какой-нибудь из двух глаз подвергается внезапному резкому облучению более ярким светом, зрачки обоих глаз автоматически сужаются. Это обусловлено сокращением круговых мышц, расположенных по внутреннему краю отверстия в радужке. Вследствие этого при ярком освещении используется лишь лучшая, центральная часть оптической системы глаза. В результате изображение на сетчатке становится



более четким (сферическая абберация резко уменьшается), а окрашенные полосы между темными и светлыми участками изображения (хроматическая абберация) почти полностью исчезают. При полном солнечном освещении мы максимально используем оптические свойства наших глаз. Но не без последствий. Мышцы, управляющие веками, автоматически сокращаются при избытке света. Мы всегда находимся между максимально острым зрением, сопровождающимся головной болью, и несколько худшим зрением, не сопровождающимся болезненными последствиями.

Хрусталик. Хрусталик удерживается на месте радиальными мышцами, стремящимися растянуть его, а также сфинктерной мышцей, расположенной вокруг основания радиальных мышц. Сфинктерная мышца снимает напряжение с хрусталика, представляющего собой полутвердое упругое тело, и позволяет ему вновь вернуться в исходное выпуклое состояние. Для того чтобы видеть близлежащие объекты с достаточно высокой резкостью, сфинктерная мышца при аккомодации глаза должна сократиться, позволяя хрусталику принять естественную выпуклую форму. При рассматривании удаленных объектов сфинктерная мышца при аккомодации глаза расслабляется и позволяет радиальным мышцам сделать поверхность хрусталика почти плоской. С возрастом вещество хрусталика постепенно теряет свою упругость, так что растягивающие радиальные мышцы на него не действуют. Так наступает время, когда нам для работы необходимы очки. Кроме того, с возрастом хрусталик желтеет, а иногда и столь сильно изменяется, что совершенно теряет свою прозрачность — наступает катаракта. Ее появление может быть вызвано и продолжительным облучением инфракрасными излучениями при работе у нагревательных или иных печей. По мере того как хрусталик мутнеет, все предметы в поле зрения воспринимаются как сквозь туман, и так до тех пор, пока глаз не перестает различать какие бы то ни было детали, а опознает предметы лишь по их цвету. Хирургическое удаление хрусталика возвращает возможность различения деталей, но для фокусировки изображения на сетчатке в этом случае требуются очень сильные очки или контактные линзы. При этом, конечно, теряется аккомодация зрения. Как уже упоминалось, для оптической системы хрусталика глаза характерны два дефекта, известные под названием сферической и хроматической аббераций. Вследствие хроматической абберации синие и фиолетовые лучи фокусируются в точке, расположенной ближе к хрусталику, чем точки, где собираются в фокус зеленые, желтые и красные лучи.

Стекловидное тело. Стекловидное тело представляет собой вязкую жидкость, заполняющую внутренний объем глаза. Оно поддерживает почти постоянным расстояние между хрусталиком

и сетчаткой. Его оптические свойства далеки от совершенства: обычно в нем свободно плавают пеплообразные и нитеобразные частицы ткани, частично собирающиеся вблизи сетчатки. Эти частицы ухудшают качество изображения на сетчатке, особенно те из них, которые располагаются близ нее. Они отбрасывают тени, которые можно увидеть при рассматривании любой яркой и однородно окрашенной поверхности. Как правило, эти тени имеют вид медленно перемещающихся почти прозрачных полосок и бусинок, переплетенных змеек и т. д. Вдобавок к этим довольно большим кусочкам плавающей светорассеивающей ткани стекловидное тело содержит и мельчайшие рассеивающие свет частицы. Его оптические свойства поэтому напоминают свойства воздуха, в котором взвешены пылевые и образующие туман мелкие водяные частицы. Несмотря на все эти несовершенства, оптическая система глаза может формировать очень четкое изображение, определяемое свойствами светочувствительного слоя глаза, т. е. его сетчатки.

СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Светочувствительная часть глаза представляет собой мозаику реагирующих на свет клеток (фоторецепторов) — палочек и колбочек сетчатки. Палочки и колбочки находятся в непосредственном контакте с сосудистой оболочкой глаза, находящейся за глазным яблоком, а их окончания направлены в сторону, противоположную падающему свету. С помощью палочек и колбочек изменения в оптическом изображении на сетчатке преобразуются в совокупности нервных импульсов, распространяющихся от рецепторных клеток в мозг. Колбочки расположены в центральной части сетчатки и каждая их группа непосредственно связана с мозгом через внутреннюю поверхность сетчатки и зрительный нерв. Вдобавок к этим прямым соединениям в сетчатке имеется неисчислимо количество локальных проводящих нервных путей. Свет, пересекая стекловидное тело, сначала проходит через слой нервной ткани сетчатки и кровеносные сосуды и лишь затем попадает на слой палочек и колбочек. Разработчик телевизионной камеры, основываясь на подобном принципе мозаики светочувствительных элементов, вероятно, позаботился бы о монтаже соединительных проводов так, чтобы не мешать свету, падающему на фотоэлементы. Сетчатка построена по другому принципу. Нервная ткань располагается между падающим светом и слоем палочек и колбочек. Это означает, что она должна быть почти прозрачной (что и есть на самом деле), а кровеносные сосуды, которые непрозрачны, должны быть невидимыми. К этому мы возвратимся позже.

Палочки — ночное зрение. Палочки могут реагировать на крайне малые количества лучистой энергии. Они ответственны

за нашу способность видеть при лунном свете, свете звездного неба и даже в тех случаях, когда это звездное небо скрыто облаками. Чувствительность палочек максимальна при длине волны падающего света 510 нм (зеленый участок видимого спектра). На рис. 1.2 прерывистая кривая отображает зависимость чувствительности палочек от длины волны. Однако в нормальном глазу палочки не создают ощущения красного, желтого, зеленого или

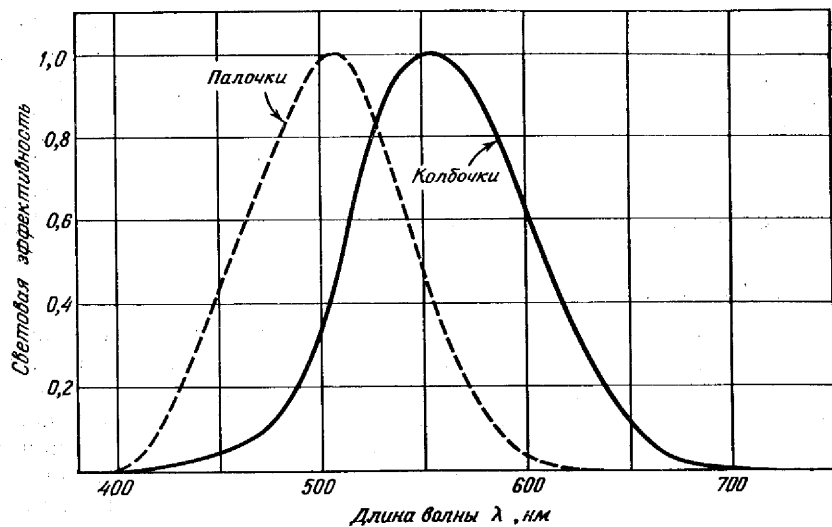


Рис. 1.2. Относительная спектральная чувствительность палочек и колбочек. — — — палочковое зрение служит при очень слабом освещении, например при свете звезд; кривая относится к ахроматическому восприятию при ночном зрении и называется функцией ночной световой эффективности; ее обозначают символом $V'(\lambda)$. — — — колбочковое зрение служит при дневном свете; кривая отображает только свето-теневое восприятие при дневном зрении; она называется функцией дневной световой эффективности зрения и часто обозначается символом $V(\lambda)$.

синего цветов самих по себе. Они обеспечивают только ахроматическое, или нейтральное в цветовом отношении восприятие в виде белого, серого и черного. Более того, каждая палочка не имеет непосредственной связи с мозгом. Они объединяются в группы. Подобное устройство объясняет высокую чувствительность палочкового зрения, но препятствует различению с его помощью мельчайших деталей. Эти факты поясняют общую бесцветность и нечеткость сумеречного зрения и справедливость поговорки: «Ночью все кошки серы».

В центральной ямке желтого пятна (диаметром $\sim 1^\circ$) нет ни одной палочки. Их нет и в более обширной центральной области желтого пятна диаметром $\sim 2^\circ$. Но, начиная с границы этой области, число палочек на единицу площади сетчатки возрастает

по отношению к такому же числу колбочек до тех пор, пока на крайней периферии отображающего участка сетчатки едва ли можно найти хоть одну колбочку. Плотность палочек максимальна на угловом удалении примерно в 20° от центра желтого пятна. Отсутствие палочек в самом центре сетчатки, обеспечивающее наибольшую остроту дневного зрения, породило поговорку: «Чтобы видеть очень слабый свет, нужно вообще не смотреть».

Колбочки — дневное зрение. Реакция колбочек более сложна, чем у палочек. Вместо простого различения света и темноты, а также восприятия ряда различных серых цветов, колбочки обеспечивают восприятие хроматических цветов. Другими словами, с помощью колбочкового зрения мы можем видеть желтые и синие, красные и зеленые цвета. Спектральное распределение чувствительности колбочкового зрения по длинам волн показано на рис. 1.2 сплошной линией. Эту кривую принято называть кривой видности, а также кривой спектральной чувствительности глаза. Палочковое зрение по сравнению с колбочковым гораздо более чувствительно к излучениям коротковолнового (синего) участка видимого спектра, а чувствительность к излучениям длинноволнового (красного) участка спектра примерно такая же, как у колбочек. Однако колбочки продолжают реагировать на малые увеличения интенсивности падающего света (формирующего изображение на сетчатке) даже тогда, когда плотность его потока на какое-то время становится столь велика, что палочки уже не реагируют на них — они насыщены. Иначе говоря, все палочки в таком случае дают максимально возможное количество нервных сигналов. Таким образом, наше дневное зрение обеспечивается почти полностью колбочками. Сдвиг чувствительности к воздействию света по оси длин волн от колбочкового (дневного) зрения к палочковому (или ночному) зрению носит традиционное наименование эффекта Пуркинье (правильнее Пуркине). Этот «сдвиг Пуркинье», названный так в честь впервые открывшего его в 1823 г. чешского ученого Пуркине, обуславливает тот факт, что объект, красный при дневном свете, воспринимается нами как черный при ночном или сумеречном освещении, в то время как объект, воспринимаемый днем как голубой, ночью кажется светло-серым.

Чувствительность палочек вызвана поглощением энергии излучения содержащимся в них светочувствительным пигментом — родопсином. Их нечувствительность в дневное время объясняется тем, что при адаптации глаза к дневному зрению почти весь родопсин успевает прореагировать под действием света (отбеливается). Это отбеливание происходит так быстро, что адаптация глаза к дневному освещению завершается в течение нескольких минут. Единственный способ, которым может быть восстановлена чув-

ствительность палочек, состоит в том, чтобы выждать, пока внутренние процессы обмена в глазу не восстановят опять нормальную концентрацию родопсина в палочках. Эти процессы длятся около получаса. Если матрос должен в ночное время заступить на вахту, он должен примерно за полчаса до этого смотреть на темные предметы, чтобы восстановить палочковое зрение. Он может сделать это, закрыв глаза или посидев в темном помещении, или же надев темно-красные защитные очки, которые пропускают только излучение длинноволнового конца видимого спектра, например излучение с длиной волны, большей чем 600 нм. В таком пропускаемом к глазу красном свете он может читать свои инструкции или играть в карты, но поскольку все, на что он смотрит, является более или менее темным, то накопление родопсина в палочках происходит почти столь же быстро, как и при пребывании в темном помещении. Он может при этом и смотреть обоими глазами, и дать им в то же время отдохнуть. Наличие двух типов светочувствительных приемников (палочек и колбочек) в одном и том же глазу представляет собой большое преимущество. Не всем животным так повезло. Куры, например, имеют только колбочки и поэтому должны ложиться спать с заходом солнца. У сов же есть только палочки; они вынуждены весь день щурить глаза.

Колбочки общим числом ~ 7 млн. распределены по всей сетчатке, за исключением так называемого слепого пятна — места, где нервные волокна объединяются и выходят из глаза, образуя зрительный нерв (рис. 1.1). Наиболее плотно они расположены в центральной ямке желтого пятна, где нет палочек. Их довольно много в области, окружающей центральную ямку, с угловым диаметром до 5° (парафовеальная область), где палочек еще очень немного. Небольшое количество колбочек имеется среди преобладающих там палочек и на крайних участках периферии сетчатки, используемых только для взгляда искоса. Рис. 1.3 [533] представляет собой поперечное сечение сетчатки в области, где отношение числа палочек к числу колбочек равно примерно 4:1. На левой половине рис. 1.3 показано поперечное сечение сетчатки, каким оно выглядит под микроскопом, правая половина — это схематическое изображение, в котором выделены существенные черты реальной картины, помещенной слева. На концах колбочек находятся щетки нервных окончаний, дающие много возможностей для боковых соединений. Такое строение соответствует их сложным функциям. В центре сетчатки колбочки расположены очень близко одна к другой, что позволяет различать при восприятии очень мелкие детали объекта. Фактически оптическая система глаза такова, что еще более плотная упаковка колбочек вряд ли улучшит наши зрительные возможности. Не содержащая палочек область (угловым размером в 2°) имеет площадь ~ 1 мм² и содер-

жит ~ 50 000 колбочек. На рис. 1.4 показано, что эти колбочки потеряли характерную для них форму, будучи сжатыми не менее чем до половины диаметра более удаленных к периферии колбочек. Но некоторые колбочки имеют щетки нервные окончания, а мно-

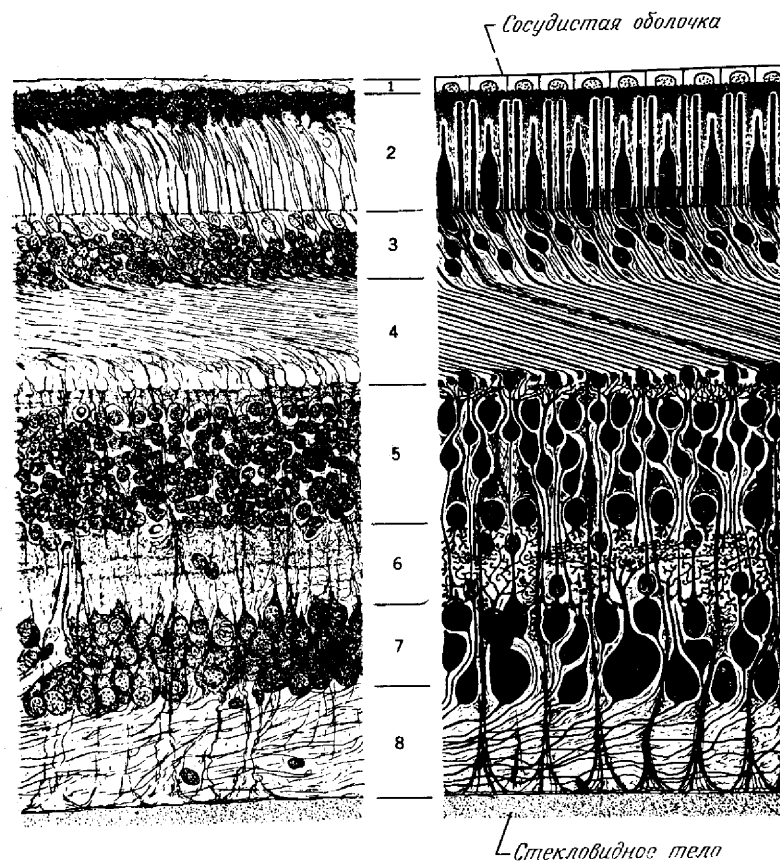


Рис. 1.3. Поперечный разрез сетчатки вблизи центральной ямки желтого пятна [533].

1 — пигментированный эпителий; 2 — слой палочек и колбочек; 3 — внешний ядерный слой; 4 — внешний слой переплетенных нервных волокон, отходящих от палочек и колбочек; 5 — внутренний ядерный слой; 6 — внутренний слой переплетенных нервных окончаний; 7 — слой ганглиозных клеток — нервных узлов; 8 — слой волокон зрительного нерва.

гие — собственные пути, ведущие в мозг. Таким образом, они приспособлены, чтобы обеспечить нам острое черно-белое зрение и в то же время несколько менее острое цветное зрение. Уменьшение остроты цветного зрения обычно истолковывают в следующем смысле: для адекватной реакции на цвет необходимо

использовать две или более колбочек. Отметим на рис. 1.4, что уходящие вбок нервные окончания образуют вокруг самого центра тончайший из возможных слоев нервной ткани, в котором к тому же нет кровеносных сосудов. Утоньшение слоя нервной ткани как раз и формирует центральную ямку желтого пятна (рис. 1.1).

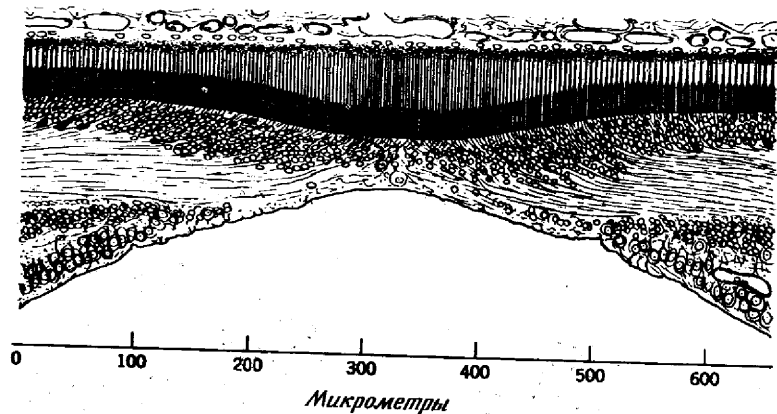


Рис. 1.4. Поперечный разрез сетчатки на участке центральной ямки желтого пятна [533].

На свойствах этого одного-единственного квадратного миллиметра сетчатки (с более чем 50 000 колбочек) основаны наши методы измерения цвета.

Палочки и колбочки — сумеречное зрение. В сумеречном зрении участвуют и палочки, и колбочки. Сумерки — это диапазон освещения, который простирается от освещения, создаваемого излучением от неба при солнце, опустившемся больше, чем на несколько градусов за горизонт, до освещения, которое дает подымающаяся высоко в ясное небо луна в половинной фазе. К сумеречному зрению относится и видение в слабо освещенном (например, свечами) помещении. Поскольку в таких условиях относительно участие палочкового и колбочкового зрений в общем зрительном восприятии непрерывно изменяется, суждения о цвете отличаются крайней ненадежностью, но иногда люди, ответственные за выпуск продукции, разрешают производить оценку по цвету при тусклом освещении. Тем не менее имеется ряд продуктов, цветовую оценку которых необходимо производить именно с помощью подобного смешанного зрения, так как они и предназначены для потребления нами именно при тусклом свете. Примером может служить фосфоресцирующая краска для условий затемнения. Материалы, люминесцентное изучение которых имеет раз-

ные цвета, могут быть очень полезны людям, обязанным работать при тусклом свете в военное время или в фотографической темной комнате. Однако измерение таких цветов требует решения ряда специальных технических проблем.

ПИГМЕНТЫ ГЛАЗА

Энергия излучения, проникающего через роговицу, не только фокусируется роговицей и хрусталиком, но и меняется по своему спектральному составу за счет избирательного поглощения пигментами (хрусталика, желтого пятна), преобразуется в нервные импульсы с помощью пигментов палочек и колбочек, а наибольшая ее часть в конечном счете поглощается пигментом сосудистой оболочки.

Хрусталик. У маленьких детей чистые, относительно свободные от содержания пигмента, хрусталики. Но с возрастом в хрусталиках образуется и накапливается пигмент типа меланина,

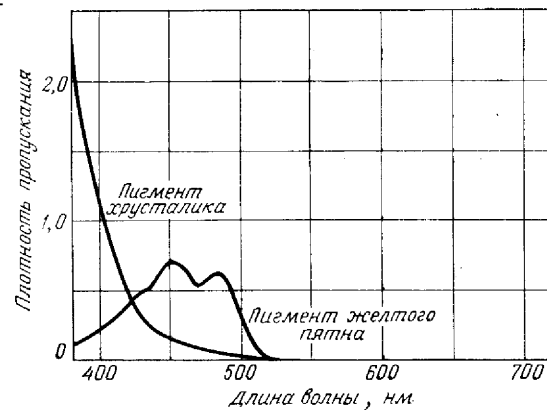


Рис. 1.5. Спектральная плотность пропускания пигментов хрусталика и желтого пятна для нормального глаза человека в возрасте 21 года [736].

Следует отметить, что пигмент хрусталика поглощает наиболее сильно в крайнем коротковолновом (фиолетовом) участке видимого спектра, в то время как пигмент желтого пятна имеет максимальную плотность пропускания между 430 и 490 нм.

наподобие того, как это происходит в коже. Он имеет желтоватый или коричневатый оттенок и служит для того, чтобы предотвратить попадание определенной части световой энергии, в особенности коротковолновой энергии, на сетчатку. На рис. 1.5 показаны функции спектральной плотности пропускания пигментов хрусталика человека в возрасте 21 года, построенные по данным, собранным из различных источников Вышецки и Стайлсом [736].

Таблица 1.1

Спектральная плотность пропускания и спектральное пропускание хрусталика человеческого глаза и пигмента желтого пятна [736]¹⁾

Длина волны λ (нм)	Хрусталик		Пигмент желтого пятна	
	Плотность пропускания	Пропускание	Плотность пропускания	Пропускание
360	3.27	0.000537		
70	2.70	0.00200		
80	2.15	0.00708		
90	1.66	0.0218		
400	1.20	0.0631		
05			0.085	0.822
10	0.82	0.151	0.120	0.759
15			0.160	0.692
20	0.55	0.282	0.225	0.596
425			0.300	0.501
30	0.37	0.427	0.345	0.452
35			0.365	0.432
40	0.270	0.537	0.380	0.417
45			0.400	0.398
450	0.225	0.596	0.425	0.376
55			0.460	0.347
60	0.200	0.631	0.490	0.324
65			0.495	0.320
70	0.175	0.668	0.470	0.339
475			0.445	0.359
80	0.155	0.700	0.410	0.389
85			0.415	0.385
90	0.140	0.724	0.420	0.380
95			0.410	0.389
500	0.125	0.750	0.360	0.437
05			0.275	0.531
			0.195	0.638

Спектральная плотность пропускания есть десятичный логарифм отношения падающего потока излучения к пропущенному. Изменения плотности пропускания в зависимости от длины волны света, приведенные на рис. 1.5 и в табл. 1.1, частично обусловлены свойствами роговицы и внутриглазной жидкости, но главным образом содержанием пигмента в хрусталике. Вследствие накопления пигмента в хрусталике старые инспекторы, занимающиеся оценками по цвету, могут получать результаты, с которыми их молодые коллеги не соглашаются. Инспекторы с возрастом становятся менее чувствительными к фиолетовым и голубым излучениям.

Продолжение табл. 1.1

Длина волны λ (нм)	Хрусталик		Пигмент желтого пятна	
	Плотность пропускания	Пропускание	Плотность пропускания	Пропускание
10	0.110	0.776	0.130	0.741
15			0.085	0.822
20	0.100	0.794	0.050	0.891
525			0.025	0.944
30	0.090	0.813	0.010	0.977
35			0.000	1.000
40	0.080	0.832	0.000	1.000
45			0.000	1.000
550	0.070	0.851	0.000	1.000
60	0.060	0.871	0.000	1.000
70	0.050	0.891	0.000	1.000
80	0.040	0.912	0.000	1.000
90	0.030	0.933	0.000	1.000
600	0.025	0.944	0.000	1.000
10	0.020	0.955	0.000	1.000
20	0.015	0.966	0.000	1.000
30	0.005	0.989	0.000	1.000
40	0.005	0.989	0.000	1.000
650	0.000	1.000	0.000	1.000
60	0.000	1.000	0.000	1.000
70	0.000	1.000	0.000	1.000
80	0.000	1.000	0.000	1.000
90	0.000	1.000	0.000	1.000
700	0.000	1.000	0.000	1.000

Примечание: Спектральные плотности пропускания хрусталика были нормированы так, чтобы при $\lambda = 700$ нм они были равны 0,000.

¹⁾ В табл. 1.1 и 1.2 сохранены обозначения десятичных дробей, принятые в американской литературе. — Прим. ред.

Желтое пятно. Нервный слой сетчатки в области и вблизи желтого пятна между стекловидным телом и слоем колбочек окрашен желтым или коричневатым пигментом [677], по-видимому, ксантофиллом. Именно этой окраской обусловлено название желтого пятна, или просто пятно; сам пигмент называют пигментом пятна. Его можно увидеть, сильно осветив сетчатку и заглянув в зрачок глаза человека с помощью офтальмоскопа, но обычно оно невидимо для самого человека. Пигмент хрусталика защищает всю сетчатку от перевозбуждения энергией ультрафиолетового и фиолетового излучений, а пигмент пятна предохраняет

самую важную центральную часть сетчатки от перевозбуждения излучением голубого и синего цветов, которое вызывает, например, длительную фиксацию уже исчезнувших зрительных образов. На рис. 1.5 показаны плотности пропускания пигмента пятна для различных участков видимого спектра, собранные Вышецки и Стайлсом [736]. В табл. 1.1 приведены численные значения плотности пропускания пигмента пятна.

Из-за наличия пигмента пятна колбочки в центре сетчатки постоянно недовозбуждаются энергией коротковолнового (синего и голубого) излучения по сравнению с колбочками в прилегающих областях сетчатки. Вследствие этого постоянного недовозбуждения (примерно в четыре раза) колбочки центральной области обычно сверхчувствительны к коротковолновому световому излучению (приблизительно во столько же раз по сравнению с колбочками в окрестности пятна). В результате, когда мы смотрим на однородное цветное поле, мы зрительно не выделяем какого-либо центрального пятна, соответствующего распределению пигмента в желтом пятне сетчатки. Поле представляется нам совершенно однородным, каково оно и есть на самом деле.

Для наблюдателя имеется только один принцип, на основании которого он может установить существование пигмента своего собственного желтого пятна. Он состоит в том, чтобы уловить реакцию колбочек центрального участка еще до того, как они получают возможность проявить всю свою сверхчувствительность к синему свету (разумеется, по отношению к колбочкам окружающих областей). Поместите перед собой однородно окрашенную поверхность, например лист белой бумаги, и закройте глаза на 15—20 с. Когда вы их откроете, на однородной поверхности, наблюдаемой вами, можете увидеть желтое пятно, проекцию вашего собственного пигментированного желтого пятна. Оно исчезает через несколько секунд, вероятно, еще до того, как вы удостоверитесь, что действительно видели его. Другой способ заключается в том, чтобы смотреть на яркую однородную поверхность, например ясное голубое небо, попеременно через пурпурный светофильтр и нейтральный в цветовом отношении серый светофильтр [440]. Если вы меняете фильтры примерно раз в секунду, картину, свидетельствующую о наличии желтого пятна, можно наблюдать четко, ясно и довольно долго. Она появляется как красное пятно неопределенной формы с угловым диаметром 3—4° на фоне пурпурного окружения. Иногда появляются сообщения об обнаружении людей с непигментированным центральным участком сетчатки, а иногда внутри этого центрального участка наблюдают второе пятно, более или менее смещенное от центра и, по-видимому, пигментированное, как и окружающая его кольцеобразная область.

Пигмент желтого пятна незаметен в повседневной жизни, но он представляет собой такое большое неудобство при использо-

вании глаза в ряде цветowych измерений, что предпочтительнее применять фотоэлектрические элементы. Для того чтобы знать, в каком случае наиболее пригоден глаз, а в каком — фотоэлектрические методы, мы должны будем более детально ознакомиться с этими типами цветowych измерений. Но это произойдет на более поздней стадии изучения данной книги.

Кровь. Капиллярные сосуды сетчатки почти непрозрачны, так как содержат пигмент крови (гемоглобин). Они отбрасывают резкие темные тени на расположенные под ними колбочки. Как и пигмент желтого пятна, такие тени обычно невидимы в результате локальной адаптации колбочек. Однако капиллярную систему сетчатки легко сделать наблюдаемой, если заставить тени от нее падать на неиспользуемые близлежащие участки сетчатки. Если в темной комнате вы смотрите прямо перед собой, а затем не поворачиваясь переводите взгляд на лампу накаливания с тонкой нитью (например, на фару автомобиля), то в результате отражения света от сетчатки внутри самого глазного яблока появляется как бы дополнительный источник освещения. Естественно, свет от такого освещенного пятна падает на капилляры под углом, резко отличающимся от прямого угла, свойственного обычному рассматриванию. Все поле зрения в таком опыте получается слабо освещенным, а капилляры образуют систему темных линий. Перемещение лампы вперед и назад слегка меняет угол падения лучей и сохраняет воспринимаемую картину несмотря на адаптацию. На рис. 1.6 темными сплошными линиями показана система капиллярных сосудов сетчатки макаки. Эти капилляры отходят от слепого пятна и почти не достигают области желтого пятна.

Тени выглядят очень темными; это свидетельствует о том, что через капилляры проходит крайне мало света; следовательно, спектральные характеристики гемоглобина имеют мало отношения к описываемому эффекту. Однако мы знаем, что какое-то количество света все же проникает через капилляры наших глаз, поскольку можно наблюдать движение частиц крови через них. Взгляните на яркое однородное поле, например на небо. После адаптации, продолжающейся несколько секунд, вы увидите не только медленно перемещающиеся полоски или бусинки, что соответствует движению содержащихся в стекловидном теле частиц, но и маленькие точки света и тени, быстро продвигающиеся по коротким искривленным путям во всех направлениях по всему полю зрения, за исключением самого его центра. Эти летающие мошки (*muscae volitantes*) представляют собой изображения промежутков между красными частицами в капиллярах.

Сосудистая оболочка. Сосудистая оболочка содержит темно-коричневый пигмент типа меланина, который поглощает энер-

тию после прохождения ею приемного слоя (слоя палочек и колбочек) сетчатки. Он защищает изображение, создаваемое на сетчатке хрусталика, от чрезмерного искажения рассеянным светом. Люди, в сосудистой оболочке которых отсутствует пигмент типа меланина (альбиносы) вынуждены страдать от сравнительно слабого поглощения гемоглобином крови света, рассеянного внутри глазного яблока. Им приходится удовлетворяться изображениями на сетчатке, формирующимися на фоне большого количества рассеянного света. Этим объясняется их низкая зрительная активность и ощущения страха от яркого освещения (фотофобия). Зрачки

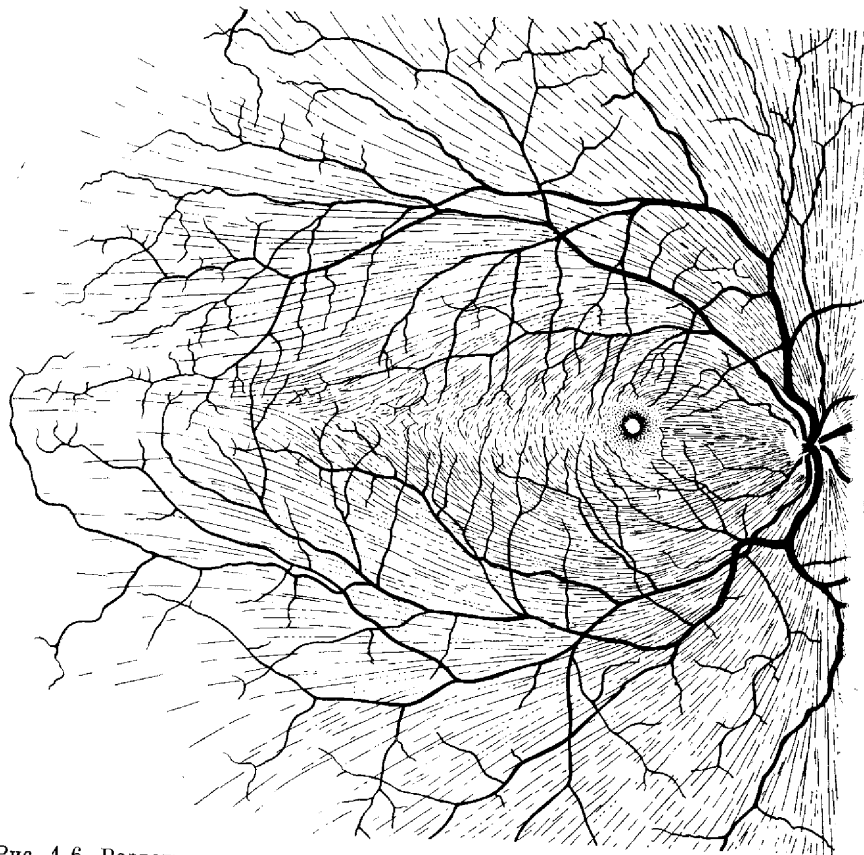


Рис. 1.6. Разветвление капилляров (жирные линии) и нервных волокон (тонкие линии) по внутренней поверхности сетчатки макаки в направлении точки выхода (зрительный нерв) [533].

Необходимо отметить, что капилляры и нервные волокна проходят, минуя желтое пятно, что дает возможность формирования максимально резкого изображения на участке этого пятна.

нина (альбиносы) вынуждены страдать от сравнительно слабого поглощения гемоглобином крови света, рассеянного внутри глазного яблока. Им приходится удовлетворяться изображениями на сетчатке, формирующимися на фоне большого количества рассеянного света. Этим объясняется их низкая зрительная активность и ощущения страха от яркого освещения (фотофобия). Зрачки

их глаз не имеют черного цвета, как обычно, а обладают красноватым оттенком.

Пигменты палочек и колбочек. Изображение на сетчатке представляет собой совокупность микроучастков, на каждый из которых падает поток излучения различной плотности. Единственный способ преобразования такого изображения в нервные возбуждения, строго соответствующие распределению плотности падающего потока, заключается в поглощении части этого потока излучения веществами, которые должны входить в состав палочек и колбочек. Палочковый пигмент был успешно выделен и изучен. Его назвали родопсином и нашли, что его способность поглощать энергию излучения меняется с длиной волны пропорционально чувствительности палочек к этой энергии (рис. 1.2) при условии внесения поправки на действие пигмента хрусталика (рис. 1.5).

В работе Уолда [678] косвенным образом было обнаружено существование одного колбочкового пигмента, который он назвал иодопсином, но его не удалось выделить в чистом виде из колбочек каких-либо животных, за исключением кур [254]. Мы тем не менее знаем, что, поскольку мы получаем от колбочек информацию трех независимых типов (различение свет — темнота, красный — зеленый, желтый — синий), в них должно быть по крайней мере три фотопигмента, или три комбинации фотопигмент — светофильтр. Колбочки анатомически одинаковы, хотя их соединения друг с другом и непосредственно с мозгом различны.

Несмотря на их внешнее сходство, укоренилось общее предположение, что одни из них содержат пигмент, поглощающий коротковолновое излучение, другие обладают пигментом, поглощающим длинноволновое излучение, а третьи имеют пигмент, поглощающий излучение средних длин волн видимого диапазона. Из того что острота различения нами желтых и синих цветов относительно низка, часто делается вывод, что колбочки, которые содержат пигмент, поглощающий коротковолновое излучение, сравнительно малочисленны и рассеяны по сетчатке; их особенно мало вблизи центра желтого пятна. Как пигменты поступают в колбочки и достигают там нужной концентрации, остается неизвестным. Измерения цвета основываются на известных свойствах колбочек желтого пятна, действующих согласованно; в настоящее время еще невозможно провести полный анализ роли каждой отдельной колбочки.

ИНТЕРПРЕТИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Процессы нервной активности, когда им уже положили начало реакции в палочках и колбочках, должны объединяться и сортироваться таким образом, чтобы их можно было осмыслить. Эти

сочетания и сортировка начинаются в боковых соединениях нервов самой сетчатки. Возникшие в результате нервные импульсы проходят боковыми путями вдоль нервных волокон сетчатки, расположенных между стекловидным телом и палочково-колбочковым слоем, через область выхода (слепое пятно) зрительного нерва и оттуда через различные структуры мозга (перекрестие зрительных нервов, боковое ядро коленчатого узла зрительного нерва) попадают в его затылочные доли. В рассматриваемых процессах участвуют и другие нервные клетки, координирующие визуальную информацию с информацией, поставляемой нам ушами, носом, языком, пищеварительным аппаратом и т. д., с тем чтобы в итоге был выработан определенный курс действий (или состояние выжидательного бездействия). Нам нет нужды забираться в анатомические детали большинства из этих процессов или давать их спекулятивные объяснения, но кое-что из них относится к цветовым измерениям и опознанию предметов по цвету. Это — как раз та сторона упомянутых процессов, которая связана с колбочковым зрением.

Боковые проводящие пути сетчатки. Общепринятая точка зрения заключается в том, что каждая колбочка может отреагировать только одним, присущим ей, характерным способом в зависимости от типа содержащихся в ней светочувствительных веществ. Таким образом, предполагается, что существуют колбочки, докладывающие о наличии красной составляющей в попадающем в глаз излучении, и они должны содержать вещества, чувствительные к длинноволновому (в пределах видимого спектра) излучению. Колбочки другого сорта, реагирующие на зеленый участок спектра, должны содержать вещества, чувствительные главным образом к средневолновому излучению. И наконец, колбочки, срабатывающие при попадании на них фиолетовых лучей, должны обладать веществами, реагирующими на коротковолновое излучение видимого спектра. Если в колбочках содержатся не те вещества, появляется цветовая слепота. С этих позиций одна из главных функций боковых проводящих путей сетчатки состоит в соединении соседних колбочек между собой, скорей всего в триады, так чтобы однородно возбужденная светом какого-либо спектрального состава сетчатка давала в зрительных центрах ощущение однородного цвета. Другими словами, если вы смотрите на ясное небо, локальные боковые соединения в сетчатке дают вам возможность видеть его однородно голубым; без этих соединений вы видели бы мозаику из красных, зеленых и фиолетовых пятнышек, причем красные пятнышки были бы несколько слабее, чем зеленые и фиолетовые.

Каковы должны быть на самом деле подобные соединения, чтобы создавалась наблюдаемая однородная картина, остается

предметом догадок. Под микроскопом все колбочки выглядят одинаково; невозможно сказать, какие из них реагируют на красный, какие — на зеленый и какие — на фиолетовый цвет. И боковых соединений так много, что возможна почти любая система, элементами которой служат одни и те же нервные клетки сетчатки [534]; соединительных проводников для этого достаточно. Однако деятельность нервного волокна не имеет сколько-нибудь выраженного сходства с функцией проводников электрического тока. Она больше напоминает действие бомбы с самовозобновляющимся взрывчатым зарядом. Когда окончание нерва приходит в активное состояние, вспышка локальной активности пробегает вдоль нерва к другому окончанию. Затем, через какую-то долю секунды, по этому нерву может пройти другой импульс. Сильно стимулированный нерв откликается очень частыми разрядами; стимулированный слабее — менее частыми. Все эти импульсы, регистрируемые микроэлектродами, обладают одинаковой интенсивностью. Нервное волокно работает по принципу «все или ничего» («да или нет»). Чтобы дать полную информацию о цветовой картине, по крайней мере три колбочки должны возбудить три импульса в трех независимых волокнах. Эти импульсы должны быть на каком-то этапе объединены в нервной системе, будь то в нервных ядрах сетчатки или центрах головного мозга. Мы знаем, что такое соединение может происходить в мозгу, поскольку восприятие красного цвета одним глазом в сочетании с наблюдением зеленого поля другим может привести наблюдателя к ощущению того, что он видит желтый цвет; имеются и доказательства [646], что объединение цветовых импульсов у золотых рыбок осуществляется в сетчатке. С другой стороны, мы располагаем доказательствами [387], что у макака прохождение сигналов, соответствующих наблюдению красных, зеленых и фиолетовых цветов, продолжает быть независимым до бокового коленчатого ядра зрительного нерва. Вероятно, в человеческом зрении объединение цветовых сигналов может происходить либо в сетчатке, либо в мозгу.

Когда результирующий нервный импульс достигает слоя нервных волокон, расположенного рядом со стекловидным телом, для него уже не существует возможности пойти по боковым соединениям, находящимся в сетчатке. Импульсы просто проходят через внутреннюю поверхность сетчатки и поступают в зрительный нерв. На рис. 1.6 показано, как нервные волокна сетчатки (тонкие линии) объединяются, образуя зрительный нерв. Следует отметить, что эти волокна, как правило, направлены к слепому пятну по кратчайшему возможному пути, за исключением случаев, когда, идя по такому пути, им пришлось бы пересечь центр глаза (желтое пятно). Нервные волокна из колбочек, находящихся между желтым пятном и носом, расположены вблизи места выхода зри-

тельного нерва; с ними не возникает никаких проблем. Однако у колбочек, помещающихся на участках сетчатки, которые близки к уху, нервные волокна тщательно обходят центр глаза. Это предохраняет изображение, формирующееся в центре, от искажений, обусловленных наличием множества более или менее отражающих свет нервных волокон.

Наблюдатель сам может увидеть нервные волокна, обходящие по кривым линиям центр глаза, если они находятся в активном состоянии. Входя в почти темную комнату и бросая мимолетный взгляд в направлении вправо или влево от вертикальной щели, через которую проходит свет, вы увидите не только изображение щели. Станут видны две пары красновато-голубых дуг. Одна из этих пар соответствует проекциям нервных волокон, находящимся выше и ниже линии, соединяющей желтое пятно и слепое пятно правого глаза; другая пара — аналогичному изображению для левого глаза [311], [448]. Стоит вам увидеть эти дуги один раз, и вы будете отмечать их появление очень часто, например при разглядывании луны в четверти ее фазы, щели в двери, ведущей в освещенное помещение и т. д. Лучше всего такие дуги наблюдаются, если щель освещена зеленым, желтым, оранжевым или красным светом. Тщательное изучение голубых дуг показало, что местом их возникновения вряд ли является колбочковый слой сетчатки, скорее всего более ограниченные центральные участки слоя ганглиозных клеток [449]. Во всяком случае, голубые дуги напоминают нам о несколько странном способе, с помощью которого мы различаем большинство цветов и деталей в изображении, формирующемся в центрах наших глаз.

В месте выхода зрительного нерва (рис. 1.1) наблюдение под микроскопом не обнаруживает даже единичных палочек и колбочек. В самом деле, трудно представить себе, как они могли бы находиться здесь, за возможным исключением нескольких рассеянных и плохо питаемых рудиментарных рецепторов. Поэтому следует ожидать, что энергия излучения, падающая на участок выхода нерва, не воспринимается и, следовательно, невидима. В общем случае дело так и обстоит, и хотя тщательные экспериментальные исследования [233] показали, что этот участок обладает некоторой малой чувствительностью, его все же обычно называют слепым пятном. При рассмотрении рис. 1.7 это обстоятельство хорошо демонстрируется. Взгляните на крест правым глазом, держа в то же время левый глаз закрытым. Если страница удалена от глаза примерно на 20 см, может случиться (и чаще всего случается) так, что пятно на рисунке исчезнет. Иногда бывает нужно повернуть страницу на несколько градусов в ее плоскости, чтобы нарисованное черное пятно и слепое пятно оказались на одной линии. Таким образом вы откроете для себя, что слепое пятно вашего правого глаза удалено по углу от центра глаза влево при-

мерно на 16° , а его угловой диаметр составляет $\sim 6^\circ$. Этого достаточно, чтобы спрятать от зрительного восприятия 10 диаметров соприкасающихся полных лун. Разумеется, этот большой невидимый промежуток в поле нашего зрения обычно просматривается вторым глазом, слепое пятно которого, будучи расположено на 16° правее центра левого глаза, не накладывается даже частично на слепое пространство правого глаза. Аналогичные соображения справедливы, конечно, и для поля зрения левого глаза. Тот факт, что при одном закрытом глазе мы видим слепое пространство открытого глаза окрашенным или заполненным нечетким изображением, указывает на большую важность процессов, происходя-

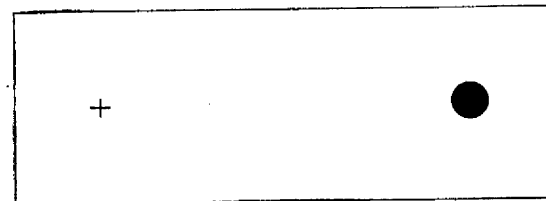


Рис. 1.7. Опыт по обнаружению слепого пятна (точки выхода зрительного нерва).

Смотрите на крест правым глазом на расстоянии примерно 20 см от страницы при закрытом левом глазе. При этом будет казаться, что черный кружок исчез.

щих после того, как нервные импульсы выходят за пределы сетчатки. Каким-то образом этот провал в поле зрения сетчатки заполняется за счет процессов, происходящих после возбуждения сетчатки.

Мозг. Мозг не раз угодоблял гигантскому центру, собирающему и перерабатывающему большой объем информации. Он отдает приказ, когда нам нужно быстро нагнуть голову; он замыкает сотни переключателей, когда это необходимо, чтобы заставить нас бросить камень в кого-нибудь, укрывшегося в темноте. Он мгновенно отменяет приказы на все подобные действия, если прячущийся выходит из темного укрытия и становится видимым в своей тускло-зеленой униформе. Наибольшая часть этого переключательного оборудования находится в мозгу в зарезервированном состоянии, «про запас»; нашими обычными действиями управляет только его малая доля.

Попытки разобраться в миллионах соединений этого неизменно сложного переключательного устройства были в значительной степени успешными. Мы знаем, например, что зрительный нерв одного глаза соединяется со зрительным нервом другого (перекрест зрительных нервов) таким образом, что нервные волокна правой половины одной сетчатки идут рядом с волокнами от

правой половины другой сетчатки и после прохождения ретрансляционной станции (коленчатого тела) в среднем мозгу заканчивают свой путь почти в одном и том же месте в затылочной доле мозга, в задней его части. Таким образом, возбуждения сетчаток проецируются в этой доле, причем часть их, соответствующая центру глаза (желтому пятну), в большой степени усилена по сравнению с возбуждениями других участков сетчатки. На ретрансляционной станции имеется возможность для боковых соединений, да и сама затылочная часть имеет множество соединений со всеми другими участками мозга.

Принцип организации всей этой сложной и многочисленной совокупности нервных соединений, по-видимому, очень прост, хотя точная информация о нем отсутствует. Представляется верным, что чем больше используется какой-либо набор соединений, тем больше вероятность прохождения импульса именно по этим соединениям, а не по одному из боковых соединений. Это явление называют научением. Более того, длительный перерыв в возбуждении какой-либо нервной клетки приводит к ее атрофии [387]. Мы появляемся на свет с определенными уже установившимися цепями нервных соединений. Например, не случайно, что при нормальном развитии возбуждения сетчатки попадают в затылочную долю. Ребенок учится за счет этих предустановленных соединений реагировать на свет, движение, форму, на сам факт наличия объектов, оказавшихся в поле зрения, и на цвет (примерно в том же порядке, как здесь перечислено). В ходе процесса научения в затылочной части мозга формируются типичные, характерные соединения. В тот же период времени случайные движения ребенка сменяются координированными движениями. Всякий раз, когда затылочная доля бывает разрушена, этот нормальный ход развития нарушается и эта координация утрачивается. Человек, получивший огнестрельную рану в затылок, обычно не выживает. Но даже если он выживет, состояние его зрения окажется хуже, чем у ребенка. В процессе медленного выздоровления в конечном счете ветеран может отличать сначала свет от темноты, затем бесформенные движения и, наконец, как форму, так и движение [536]. Однако он не может придать какого-либо значения этим формам и движениям в его поле зрения. Ветеран-инвалид не может интерпретировать их как объекты, протянуть руку, чтоб взять их, и не может сказать, какие движения совершаются частями его собственного тела. После мучительных месяцев переобучения его могут выписать из госпиталя в состоянии, когда он опять способен идентифицировать объекты и следить за собой. Считают, что для этого ему приходится использовать некоторые из боковых соединений, обычно находящиеся в резерве. Описывался возврат к более или менее приближенно удовлетворительному нормальному зрению, включая цветное. Способность интер-

претировать объекты по их визуальному восприятию является, таким образом, результатом процесса обучения. Она представляет собой одну из наиболее существенных интерпретирующих возможностей мозга и чрезвычайно важна при цветовых измерениях.

До сих пор никто еще не объяснил успешно целиком всю совокупность процессов, обеспечивающих визуальное восприятие объектов, но мы знаем некоторые из конечных результатов. Если вы взглянете в один угол комнаты, а затем быстро переведете взгляд в другой, оптическое изображение комнаты пересечет всю сетчатку. Каждая колбочка при этом получает импульсное возбуждение. Но разве вы заметили какое-либо мерцание? Нет. Восприняли ли вы движение комнаты? Вы совершенно определенно отметили бы, что комната движется, если бы при том же возбуждении сетчатки ваша голова и ваши глаза оставались неподвижными. Нет, комнату вы восприняли как неподвижную, какова она и есть в действительности, а считали, что движутся ваши собственные глаза и голова. Такой простой пример показывает, как хорошо вы научились использовать свои глаза для отыскивания предметов, вас окружающих. Вы выработали механизм, который автоматически корректирует в мозгу воспринимаемую вами зрительную картину, координируя ее с обычно совершаемыми вами движениями головы и глаз. Эта способность является основной для зрительного восприятия объектов.

Но теперь продолжим описанный эксперимент, несколько видоизменив его. Закройте один глаз и мягко нажмите на другое глазное яблоко через веко. Вы заметите, что по мере того, как усиливается давление, комната начинает двигаться. Слегка ударьте по голове ребром ладони сбоку повыше уха. Снова заметите, что при каждом ударе комната дергается. Это доказывает, что, хотя работа некоторого нервного механизма обеспечивает постоянство поля зрения, несмотря на движения головы и глаз, совершаемые ими самими, те же движения, обусловленные ударом руки, вызывают смещение поля зрения. Как следствие, мы убеждаемся в ограниченности возможностей механизма контроля. Автоматически компенсируются только те движения головы и глаз, которые представляют собой часть акта наблюдения.

Эксперименты показали, что при нормальном рассматривании движение глаза представляет собой последовательность быстрых скачков, при которых объекты в поле зрения фиксируются не все сразу, а один за другим. Когда вы читаете эту строчку, ваш глаз сначала фиксирует участок где-то около первого ее слова, затем совершит два или три двигательных переброса, которые закончатся фиксированием участка на конце строки. Что происходит с мгновенно проскакивающими мелькающими изображениями на сетчатке во время этих перебросов? Они вообще не участвуют в формировании воспринимаемого нами зрительного образа.

Оптическое изображение в такие моменты очень быстро пересекает сетчатку. Возникает последовательность первых импульсов, которые начинают проходить по пути, ведущему в затылочную долю. Но где-то на этом пути, на линии передачи, переключатель прерывает ход импульсов. Тот же самый механизм, который управляет движениями глаз, автоматически отсекает поток ненужной информации, вызванный такими движениями.

Наименование, данное нами этому чудесному свойству нашего восприятия, — внимание. Мы говорим, что не видим мешающих оптических изображений на сетчатке, потому что научились не обращать внимания на них. Но это очень скудный и к тому же основанный на отрицании способ описания наиболее важного (что касается зрения) положительного свойства, которое можно назвать даром природы. Игнорирование нами мешающей информации, неизбежно сопутствующей актам наблюдения и простого видения, само по себе является фундаментальным для восприятия объектов. И научившись ему однажды, разучиться можно только после продолжительной и интенсивной практики.

Помимо скачкообразных (саккадических) движений, наши глаза обычно много раз в секунду совершают очень малые случайные движения с амплитудой в несколько угловых минут [390]. Этот тип движения, его называют тремор, очень многие считали обусловленным неспособностью глазных мышц удерживать глаз в строго фиксированном положении. Так продолжалось до тех пор, пока не был найден способ [134, 550, 551] изучить, как протекает зрительный процесс при устранении указанных малых быстрых перемещений изображения на сетчатке. Небольшое зеркальце, закрепленное на глазном яблоке, использовалось для проекции изображения на экран таким образом, что любое смещение глаза вызывало соответствующее смещение проектируемой картины. Элементы изображения проектируемой картины при этом оказывались намертво привязанными к одним и тем же определенным участкам сетчатки. Было установлено, что стабилизированное на сетчатке изображение контрастных картин становится невидимым (т. е. перестает восприниматься зрительным аппаратом) примерно в течение минуты. Однако очень быстрое чередование интервалов наблюдения подобных картин с интервалами полной темноты (лишь бы только избежать эффекта мерцания, при котором глаз даже частично не адаптируется к темноте) восстанавливало способность видеть картину. Быстрое угасание возможности различать детали называется локальной адаптацией; моргание и движения глаз типа тремора ликвидируют последствия локальной адаптации и поддерживают максимальную способность различать детали в процессе зрительного восприятия. Фоторецепторы сетчатки вырабатывают лишь сигналы об изменениях в плотности падающего потока излучения, а вовсе не о самой плотности.

Без нормального тремора мы должны были бы зрительно ощущать поэлементно наблюдаемую картину в процессе зрительной развертки или чрезвычайно быстро моргать, чтобы избежать зрительного исчезновения этой картины (затемнения).

Фотографическая эмульсия регистрирует полную энергию Q излучения, падающего на нее. Фотоэлектрическая ячейка вырабатывает ток, пропорциональный плотности потока энергии излучения $\phi = dQ/dt$. Но сетчатка реагирует только на изменения этой плотности во времени, $d\phi/dt = d^2Q/dt^2$. Как могут быть устроены фоторецепторы сетчатки и соединенные с ними нейроны, с тем чтобы функционировать таким, а не другим способом, остается пока только догадываться. Мелкомасштабные частые движения глаз (тремор) превращают изображение неподвижной сцены с высококонтрастными мелкими деталями в последовательность быстро меняющихся изображений. На каждый рецептор сетчатки при этом падает быстро меняющийся по интенсивности поток излучения, что обеспечивает очень сильное непрерывное возбуждение рецептора. Как очень сложная совокупность первых импульсов, обусловленных такой стимуляцией, преобразуется в восприятие неподвижной картины с различением мелких деталей — тоже остается загадкой.

Зрительный аппарат, действуя как единое целое, удерживает объекты визуального наблюдения более или менее неподвижными, даже когда совершаются произвольные движения головы и глаз, а также сохраняет их цвета почти постоянными независимо от количества падающего на них света. Эта адаптация к условиям освещения бывает двух типов: локальная и общая. Процессы общей адаптации дают нам возможность идентифицировать белый объект как при полном солнечном свете, так и при лунном освещении. Локальная адаптация проиллюстрирована на рис. 1.8. На нем показано изображение куба. Поверхности граней куба — белая сверху, светло-серая с левой стороны и темно-серая, почти черная, справа. Однако рис. 1.8 не воспринимается как изображение куба с белым верхом и серыми боковыми гранями. Считают, что куб, грани которого имеют одинаковый белый или светло-серый цвет, освещен сверху и немного слева. Такой вывод делается потому, что сотни подобных распределений освещенности встречаются каждый день, и все научились узнавать, что они, как правило, означают в реальности. По этому случаю Ивенс [148] часто цитировал фразу Эймса младшего из Дартмутского колледжа: «То, что мы видим — это самая лучшая из догадок, на которые мы способны, относительно того, что находится перед нами». Основанием для такой догадки могут быть установившиеся, привычные, расположенные в мозгу, проводящие пути нервной реакции на зрительный образ; однако трудно понять, как простое включение или выключение определенных групп переключателей,

какими бы сложными они ни были, может обусловить поистине чудесное свойство, которым мы обладаем — в акте видения воспринимать объекты как твердые тела. Если бы рис. 1.8 зрительно воспринимался как плоское изображение трех соприкасающихся друг с другом ромбических площадок, мы считали бы, что они окрашены: первая в белый, вторая в светло-серый, а третья в темно-серый цвета. Но стоит возникнуть гораздо более обычному представлению, что на этом рисунке изображен куб, как то же самое возбуждение сетчатки, которому соответствовали в плоской картине белый и два серых цвета, заставляет нас видеть три грани

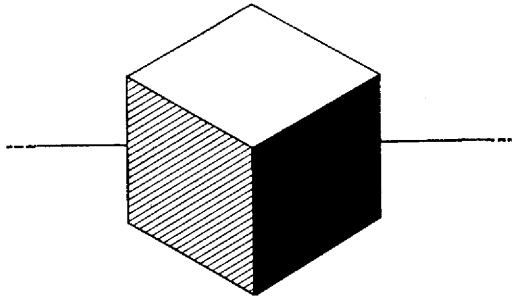


Рис. 1.8. Связь между восприятием цвета и пространственной глубиной. Если три площадки, имеющие форму ромбов, рассматривать как изображение куба, то куб обычно воспринимается белым с тремя неодинаково освещенными гранями. Если же эти площадки рассматривать как участки картины в одной плоскости (в данном случае — плоскости страницы), они будут восприниматься окрашенными в разные цвета (белый, светло-серый, темно-серый).

твердого тела, окрашенных одинаково, но неодинаково освещенных. Возбуждения сетчатки глаза идентичны, но реакции на эти возбуждения, формирующиеся в мозгу, должны быть существенно различными. Распределение возбуждений на сетчатке с определенностью говорит нам, что грани куба окрашены по-разному. Но мозг, принимая эту неверную информацию и перерабатывая ее, дает ответ, который в большинстве случаев оказывается правильным. Такая адаптация к локальным различиям освещенности в значительной степени зависит от нашей способности распознавать окружающие нас объекты, причем делается это быстро и успешно. Рассматривание объекта в освещенном пространстве сильно отличается от рассматривания цветной заплаты, закрывающей отверстие в плоском экране. Цвета объекта в первом случае называют изолированными или локализованными цветами, во втором случае — апертурными цветами. Потребитель, оценивая продукт по цвету, почти всегда видит локализованные цвета. Практическая колориметрия должна принимать во внимание этот факт

НЕКОТОРЫЕ НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Фотопигменты. Существование трех типов колбочковых пигментов можно считать надежно установленным [68, 422, 563] так же как и то, что некоторые из колбочек содержат только один фотопигмент. Но содержат ли другие колбочки смесь двух или трех пигментов?

Колбочки. Когда на колбочку падает излучение Q такого спектрального состава, чтобы вызвать в ней фотораспад пигмента, число распадающихся в единицу времени молекул пропорционально потоку излучения $\phi = dQ/dt$. Каков в действительности механизм, с помощью которого колбочка реагирует только на усиление или ослабление этого потока? Возникают ли первые импульсы вследствие концентрации фотопигмента в каком-либо участке колбочки? Или вследствие нарастания электрического потенциала между двумя частями колбочки?

Нервные импульсы. Для передачи одномерной информации, сигнализирующей о наличии света или его отсутствии, достаточно одного типа нервных импульсов. Нервные импульсы возникают с большей частотой и сигнализируют о сильном возбуждении (стимулировании). Существует ли что-то вроде частотной модуляции нервного импульса, с помощью которой сигнал о красном свете в колбоччатом теле отделяется от сигналов раздражения колбочек, вызванных синим или фиолетовым цветом? Или существуют три разных типа нервных волокон, осуществляющих подобную дифференциацию?

Форма передаваемой в мозг информации о цвете. В телевидении информация о так называемом векторе цветности содержится в двух сигналах, один из которых характеризует степень близости к желтому и синему, а второй — к красному и зеленому цветам. Положительный электрический потенциал, поданный на устройство, вырабатывающее сигнал цветности, даст чисто желтый (или красный) цвет; отрицательный — чистый синий (или зеленый). Есть ли в человеческом механизме видения какой-либо электрический (или аналогичный ему) метод видоизменения исходных красного, зеленого и фиолетового сигналов, позволяющий подавать информацию о цвете в такой форме, которая требует загружать ею меньше каналов передачи? Отметим, что колбочек миллионы, но в зрительном нерве только $\sim 100\,000$ волокон.

Нервное коррелирование зрительных образов с образами окружающих объектов. Существует ли где-нибудь в мозгу место, где из нервных сигналов, начинающих поступать с момента, когда

мы открываем глаза, формируется картина нашего зрительного пространства с находящимися в нем объектами и где она удерживается непрерывно секунда за секундой, меняясь в качестве своеобразной реакции на мириады сигналов, порождаемых движением объектов в зрительном пространстве и движениями наших глаз, головы и тела?

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЦВЕТА

Из изложенного выше читателю должно быть ясно, что восприятие цвета представляет собой весьма сложный процесс. Различные части этого процесса исследуются разными науками — химией, физикой, физиологией и психологией. До сих пор мы имели дело главным образом с физиологией; наступило время перейти к иным научным дисциплинам.

Например, для того чтобы объект воспринимался как красный с синим верхом, обычно необходимы четыре компонента: источник света, наблюдатель, сам объект и пространство (камера, комната), в котором размещены первые три компонента. Источник должен излучать энергию, приблизительно равномерно распределенную в спектре частот между 380 и 770 нм, с интенсивностью (т. е. мощностью), достаточной для того, чтобы глаз наблюдателя реагировал на изменения этой интенсивности. У наблюдателя должно быть по крайней мере приблизительно нормальное цветовое зрение. Пространство должно быть заполнено достаточно прозрачной для оптического излучения средой, а ограничивающая его стенка должна помогать восприятию объекта именно как объекта (например, на поверхность стенки может ложиться тень от объекта). Объект должен быть покрашен красителями двух типов, один из которых (синий) поглощает преимущественно длинноволновую и средневолновую часть падающей на него энергии, отражая коротковолновую составляющую, в то время как другой (красный) отражает длинноволновую энергию и сильно поглощает остальную.

Процесс восприятия красного объекта с синей верхушкой происходит в последовательности, отображенной на рис. 1.9. Энергия от источника 1 падает на объект 2 и на стенку пространства. Часть этой энергии отражается по направлению к глазу наблюдателя, попадает в зрачок 3 и образует на сетчатке некоторое распределение 4, элементы которого различаются по плотности и спектральному составу потока излучения. Какая-то доля попадающей на сетчатку энергии поглощается фоточувствительными пигментами палочек и колбочек сетчатки. Все эти процессы — предмет исследования физики.

Изменения количества энергии, поглощенной палочками и колбочками (обусловленные движениями глаза, при которых изобра-

жение перемещается по сетчатке), возбуждают фоторецепторы, в результате чего по волокнам зрительного нерва посылаются совокупность нервных импульсов. Импульсы через синапсы попадают из одного волокна в другое, и этот процесс заканчивается возбуждением в затылочной доле коры головного мозга 5 некоторого распределения активности нервных клеток, что в свою очередь порождает поток нервных импульсов, регулирующих деятельность мышц и желез 6 наблюдателя. Вторичные импульсы

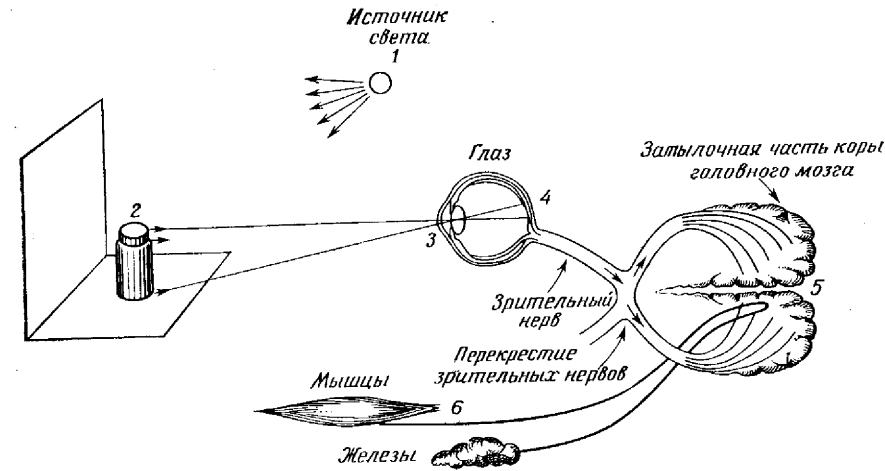


Рис. 1.9. Условия, необходимые для восприятия красного объекта с синей верхушкой.

Для этого требуются источник света, освещенное пространство, объект с его верхней частью и наблюдатель по крайней мере с приблизительно нормальным цветовым зрением. Схематически показано также формирование изображения на сетчатке, расположение коры головного мозга, мышц и желез.

из зрительного центра мозга могут побудить наблюдателя повернуть голову, тщательно осмотреть объект (это требует работы мышц, управляющих произвольными движениями глаз), улыбнуться или даже сказать: «Я вижу красную бутылку с синей пробкой». Эту совокупность процессов и действий, вызванных энергией излучения, попадающей в глаз, изучает физиология.

Психология занимается субъективным аспектом нервной деятельности в коре головного мозга, а именно восприятием цвета. Выраженное через посредство простейших возможных понятий, восприятие цвета тем не менее никоим образом не является простым актом. Оно включает возможность полной и адекватной характеристики всех основных элементов обстановки: источника света, пространства и объекта. Но именно в таком цветовом аспекте

более всего заинтересована промышленность. Любые цветовые измерения в промышленности производятся с целью узнать только одно — что увидит потребитель?

ХИМИЯ — ПИГМЕНТЫ И КРАСКИ

Мы просто указали на границы соприкосновения физических, физиологических и психологических аспектов цвета. Эти аспекты описываются с помощью терминов соответствующих наук, и некоторые из этих терминов будут нами определены в свое время. Но если изготовитель хочет быть совершенно уверенным, что его покупатели увидят красные бутылки с синими пробками, его будет в первую очередь интересовать химический аспект цвета, т. е. вопрос о том, как получить нужные красители красного и синего цветов.

Цвет большинства объектов обусловлен входящими в них веществами, которые поглощают энергию излучения в определенных участках видимого спектра. Такие красящие вещества называют, если они нерастворимы — пигментами (красками), если растворимы — красителями. Свойство окрашивающего вещества, вследствие которого он поглощает большую или меньшую часть энергии именно в данном участке видимого спектра, а не в другом, обусловлено его химическим строением. Раньше пигменты и краски добывались экстракцией из тканей животного характера (перьев определенных пород кур, некоторых моллюсков) или из растений (индиго, марена), теперь прогресс органической химии дал возможность получать эти и многие другие окрашивающие вещества синтетическим путем. Химические теории цвета получаемых соединений пытаются найти связь между избирательным поглощением падающей на них световой энергии и их химическим строением. Эти теории крайне неполны, но тем не менее имеют огромное значение в поисках и разработке химиками все более полезных окрашивающих веществ.

Основные моменты, которые должен знать изготовитель о красителях, заключаются в следующем: 1) дадут ли они тот цвет (окраску), который наиболее приемлем для покупателя товаров; 2) войдут они или нет в состав выпускаемого товара; 3) будут ли они устойчивы по цвету к воздействию солнечного света, моющих и химических веществ (кислот, щелочей, солей); 4) каков в единицах веса будет их расход на единицу производимой продукции; 5) какова стоимость единицы веса. Основную часть этой информации он может получить у химиков-органиков и инженеров-технологов, занятых проблемами цвета. Что именно заставляет краситель химически соединяться с текстильным волокном, что заставляет отвердевать пленку того или иного красителя, почему некоторые окрашивающие вещества можно успешно использовать при

производстве керамики, а некоторые нельзя, — все это пока еще полностью неизвестно. Но исследования и разработки непрерывно приводят к положительным результатам в виде все новых и новых красителей, новых способов окраски и новых составов красок и веществ, из которых производят керамические изделия. Устойчивость цвета при одновременном воздействии внешней среды на окрашенные текстильные материалы, окрашенные пластмассы и пленки красителей широко исследуется как в условиях длительного воздействия естественных климатических условий, так и методами искусственного старения, когда материалы подвергаются комбинированному воздействию излучения дугового разряда с угольными электродами или дугового разряда в ксеноне под высоким давлением и опрыскивания свежей и соленой водой. По своей важности химия цвета заслуживает упоминания, поскольку значительная часть промышленных цветовых измерений производится с целью возможности коммерческой оценки веществ, полученных химиками.

И все же следует сказать, что химик, синтезирующий и изучающий новые окрашивающие вещества, уделяет недостаточное внимание описанию цветов этих веществ. Как правило, ему присуще стремление думать и говорить о цветах в терминах химических формул органических соединений, которые он использует при разработке таких веществ.

ФИЗИКА — ЭНЕРГИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТР

Окружающие нас объекты становятся видимыми благодаря энергии излучения, испускаемого или отражаемого ими и попадающего в наши глаза. Если мы собираемся существенным образом измерять цвет, нам придется измерять энергию излучения. Мы знаем, что энергия проявляется в разных ее видах, таких, как тепловая, кинетическая, энергия механической работы, химическая, электрическая и атомная. Энергия может переходить из одного вида в другой, но сама по себе не исчезает. Часть энергии излучения лампы накаливания (или другого раскаленного тела) может падать на объект и окружающие его предметы. Из этой части в свою очередь часть может быть поглощена и переведена при этом в тепловую энергию, идущую на нагревание объекта; лишь незначительная часть отражается в направлении глаз наблюдателя. Часть энергии излучения, падающей на роговицу так, что она может пройти через зрачок глаза наблюдателя, отражается поверхностями роговицы и хрусталика, часть поглощается внутриглазными средами, превращаясь в тепловую энергию и нагревая эти среды. Значительная часть поглощается сосудистой оболочкой, также нагреваемой за счет такого поглощения. Однако очень небольшая доля энергии излучения, проходя через сетчат-

ку, поглощается фоточувствительными пигментами в рецепторах — палочках и колбочках. Эта доля энергии при ее поглощении преобразуется не в тепловую, а в химическую энергию. Другими словами, множество молекул фоточувствительного пигмента, получая эту малую дополнительную энергию из изображения на сетчатке, разлагается на отдельные части.

Теоретически воздействие такого разложения на активность нервных волокон сетчатки можно также проследить и выразить в виде энергии. Но основная часть энергии нервных импульсов — это энергия, накопленная в самой нервной ткани. Энергия излучения, поглощенная фоторецептором и превратившаяся в химическую энергию, действует на нерв по принципу «спускового крючка», давая лишь начало вспышке нервной активности, расходящейся «собственную» энергию нервной ткани.

Излучение обладает свойствами потока частиц и в то же время свойствами непрерывного периодического волнового процесса. Явление фоторазложения пигмента удобно рассматривать, считая излучение потоком квантов (частиц); цветовые же измерения удобнее производить на основе понятия о длине волны излучения. При волновом описании излучения его можно представить себе в виде волн поперечных (по отношению к направлению распространения) колебаний, идущих через вакуум со скоростью $2,998 \cdot 10^8$ м/с. Частоту колебаний, как правило, выражают в герцах (числе колебаний за 1 с), либо ее можно косвенно задать через длину волны, т. е. расстояние между двумя соседними максимумами колебания. Частота f в герцах очевидным образом связана с длиной волны λ в вакууме простым и обратным (по отношению к замене f и λ друг на друга) соотношением:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.1)$$

где c — скорость распространения лучистой энергии в вакууме. Скорость ее прохождения через материальные среды (воздух, вода, стекло, пластические массы, слои красителей) всегда меньше чем c и равна отношению c/n ; величина n — характерный параметр прозрачной среды и называется показателем преломления этой среды. Показатель преломления n для воздуха составляет $\sim 1,0003$ (в технических приложениях, связанных с измерениями цвета, принимается равным 1,000). Показатель преломления воды равняется $\sim 1,33$; стекла, пластиков и красителей находится в пределах 1,4—1,6.

Лучистая энергия имеет много различных названий в зависимости от частоты излучения. На рис. 1.10 перечислены некоторые из этих названий с указанием соответствующих значений длин волн. Следует отметить, что по своей фундаментальной природе радиоволны, рентгеновские лучи, космические лучи и т. д.

ничем, кроме частоты, не отличаются от света (видимого излучения). Интересно, например, отметить, что разработанные во время второй мировой войны методы видения сквозь дымку тумана и облака основаны на использовании тех участков спектра лучистой энергии, которыми прежде до известной степени пренебрегали. К ним относятся спектральный участок высокочастотных радиоволн, используемый в радиолокации, и участок низкочастотного инфракрасного излучения, используемый в устройствах

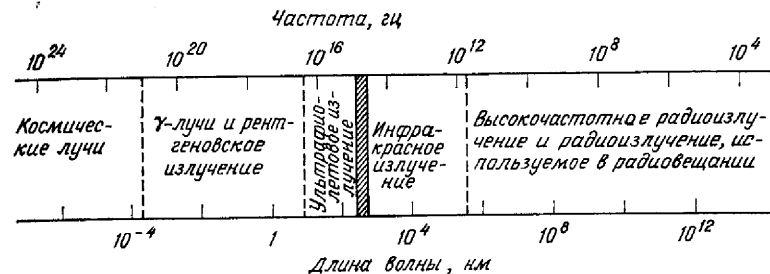


Рис. 1.10. Спектр энергии излучений.

Заштрихованная область соответствует диапазону видимых излучений примерно от 400 до 700 нм. Один нанометр (нм) равен 10^{-9} м и представляет собой удобную единицу для измерения длины волны излучения, в особенности в видимом диапазоне.

для передачи сигналов сквозь туман. В обоих случаях удалось объединить и конструктивно использовать проникающее свойство радиоволн с направленным свойством света.

Через любой произвольный по площади элемент во Вселенной, который может находиться в поле зрения наблюдателя, распространяется с определенной скоростью энергия излучения. Эту энергию испускают: материальные тела в результате тепловых и иных возбуждений молекул, входящих в их состав (тепловая лучистая энергия); сами атомы, составляющие отдельные молекулы, например при переходе из неустойчивых состояний в устойчивые (атомная лучистая энергия, космические лучи); излучатели радиоволн, рентгеновских лучей и т. д., изготовленные людьми. Всю эту энергию можно полностью описать, установив, какое ее количество проходит через элемент площади в единицу времени в каждом из участков спектра излучения. Энергия излучения, проходящая через единичный элемент площади за единицу времени, называется потоком излучения, реже — мощностью излучения; в том случае, когда эта величина рассматривается для каждого участка спектра отдельно, ее называют спектральной плотностью потока излучения или спектральной плотностью мощности излучения. Задавая полное распределение спектральной плотности потока излучения, пересекающего данную площадку поля зрения в направлении к наблюдателю, физик полностью

определяет свойства излучения, которые вызовут у наблюдателя ощущение определенного цвета этой площадки. Такое распределение спектральной плотности потока излучения имеет в науке о цвете наименование спектрального распределения энергии цветового стимула, а сам поток излучения называют просто цветовым стимулом. Однако, как мы уже установили, глаз человека чувствителен лишь к малому участку (менее чем к октаве) всего спектра энергии излучения, практически не имеющего границ на оси длин волн (или частот). При рассмотрении проблем цвета редко возникает необходимость в нахождении спектрального распределения потока излучения для длин волн, меньших 380 нм и больших 780 нм, так как человеческий глаз чрезвычайно мало чувствителен к излучению вне этого спектрального диапазона.

Разложение близкого к параллельному пучка света (несущего энергию излучения в указанном видимом диапазоне) на его спектральные составляющие можно осуществить с помощью призмы или дифракционной решетки. Количественное сравнение потоков излучения, приходящихся на различные участки видимого спектра, после такого разложения можно провести с помощью различных чувствительных к излучению приемников (болометров, термоэлементов, термопар, фотоэлектрических ячеек). Сочетание диспергирующего элемента (призмы или решетки) с детектором, измеряющим поток излучения и откалиброванным так, чтобы подсчитать этот поток в абсолютных единицах, называется спектрорадиометром. Если аналогичное устройство предназначено только для количественного сравнения потока излучения в том или ином спектральном интервале с потоком стандартного (эталонного, опорного) пучка лучей, его часто называют спектрофотометром. Прибор такого типа представляет собой очень важный для физика инструмент при практических измерениях цвета, в соответствующем разделе о нем будет рассказано подробнее. С его помощью физик может не только полностью определить физические характеристики, придающие именно данный, а не иной цвет небольшому удаленному источнику света или большой однородной светящейся поверхности, но и характеристики этих источников, которые обуславливают цвета освещаемых ими объектов. Он получает также возможность определить физическую основу цвета прозрачных и непрозрачных природных или синтетических объектов, исследуя, как эти объекты меняют спектральный состав излучения, падающего на них.

Если установлено, что от двух соседних элементов поля зрения (цветового поля) в направлении глаза наблюдателя поступают потоки энергии идентичных спектральных плотностей, мы можем быть абсолютно уверены, что эти два элемента будут восприниматься, как имеющие совершенно одинаковый цвет. Таким образом, физик дает нам полное и недвусмысленное определение цве-

тового стимула, поскольку при поступлении в глаз от двух однородных полей в точности одинаковых потоков излучения с совершенно одинаковым спектральным распределением для глаза или любого другого приемника излучения не существует никакого способа различить эти поля по цвету.

Изготовитель осветительных ламп может использовать физика, чтобы выяснить, почему определенные типы ламп не следует продавать в мясной магазин. У владельца этого магазина могут быть претензии, что при освещении такими лампами мясо выглядит зеленоватым или, возможно, более красноватым, нежели при естественном дневном освещении. Однако мы можем быть уверены, что физик не думает о красном или зеленом цвете мяса при дневном освещении. Он думает о спектральном коэффициенте отражения мяса, спектральном распределении падающего потока излучения в ваттах на квадратный метр на нанометр независимо от того, идет ли речь о лампах, которые нельзя продавать, или о лампах конкурирующей фирмы (сравнение между которыми и составляет суть проблемы). Его основное внимание будет отдано цветовому стимулу.

ПСИХОЛОГИЯ ПОКУПАТЕЛЯ

Каждый из нас, будучи покупателем, судит о покупке на основе сигналов, посылаемых в мозг имеющимися у нас органами чувств. Мы ощупываем, пробуем на вкус, приподнимаем (оценивая вес) и смотрим на то, что выставлено для продажи. Бросив взгляд на марку фирмы, выпускающей данный товар, мы иногда даже читаем мелкую надпись на ярлыке. Практически при каждой сделке, связанной с переходом товара из одних рук в другие (покупки — это лишь самый массовый вид таких сделок), цвет играет важную роль. Покупатель воспринимает цвет, как характерную черту либо самого товара, либо его упаковки; другими словами, цвет для покупателя почти всегда цвет объекта. Для каждой упаковки или каждого типа товара в нашей голове сохраняется память об их цвете (или диапазоне цветов, которые приемлемы для нас). Покупатель не покупает хлеб, корка которого чересчур темна, считая, что он, по-видимому, перепечен. Помидоры и яблоки не должны быть слишком зелеными, иначе покупатели будут думать, что они незрелые. Для успешной продажи мясо должно иметь красный цвет, но не слишком темный, не сероватый, не зеленоватый и не багровый.

Упаковки товаров, как и торговые марки и знаки фирм-изготовителей, должны иметь тот цвет, к которому привыкла основная масса покупателей; если цвета упаковок слишком блеклы (светлого или сероватого оттенка), покупатель может предположить, что товары лежали на полках так долго, что красители на них

выцвели, а качество содержимого ухудшилось. Слишком темные и серые цвета упаковки ассоциируются с грязным налетом и наводят покупателя на мысль о том, что другие покупатели слишком часто брали их в руки и возвращали, обнаруживая что-то неладное с этой конкретной упаковкой или с этим товаром, в результате чего их приходилось ставить обратно на полку. Цвет непривычного тона (например, оранжевого вместо красного) действует на потребителя хуже всего — он может даже не узнать вначале товар того сорта, который уже раньше покупал, и может даже взять его как новинку. Когда он все-таки узнает привычный товар, то у него может возникнуть впечатление о халатности изготовителя этого товара. Дальше мысли следуют в тривиальной последовательности — если изготовитель не позаботился о должном цвете упаковки, то он, вероятно, упустил что-либо и в самом товаре. Сделав такой вывод, покупатель не приобретет и следующую упаковку этого товара, даже если она окрашена привычным образом, а переключится на изделия другой фирмы.

Эта зависимость потребителя от сложившегося в его психике стандарта цвета приводит на практике к неточностям оценки покупаемого товара, обусловленным различными причинами. Иногда при восприятии цвета товара важную роль играет спектральный состав освещения, при котором он рассматривается. Некоторые люминесцентные лампы придают мясу зеленоватый оттенок, наводящий на мысль о процессе гниения; другие заставляют его выглядеть краснее, чем при дневном свете. Набор галстуков, выбранный при освещении лампами накаливания, может быть на следующий день возвращен как оказавшийся неподходящим по цвету в условиях дневного освещения. Цвет окружающих предметов влияет на суждение о цвете товара вследствие явления одновременного цветового контраста. Цвета, наблюдавшиеся ранее, оказывают влияние на суждение о цвете в результате последовательного цветового контраста. При адаптации к синему цвету оцениваемый цвет выглядит более желтым, и наоборот, адаптация к зеленому цвету приводит к восприятию цвета более красным, чем при отсутствии этого фактора. Меха низкого качества коричневого или ржавого оттенка иногда ошибочно выбираются для покупки, если сквозь стекла магазина, пропускающие дневной свет, проникает дополнительно много света от неоновых источников (рекламы, дорожных указателей и т. д.). Когда глаза покупателя адаптируются к освещению от неоновых источников, он, не сознавая этого, слабее реагирует на оранжевый и красный цвета и поэтому оказывается не в состоянии правильно оценить нежелательный ржавый цвет. В общем и целом состояние наших глаз и нашей способности определять с их помощью цвета объектов используются нами достаточно хорошо независимо от широкого диапазона возможных условий освещения и цвета окружающего

фона; это в большинстве случаев позволяет нам сделать правильный выбор.

Наименования, которыми покупатель обозначает сложившиеся в его психике представления о различных стандартных цветах, несущественны: помидорно-красный, зеленый, как консервированный горошек, баклажанный цвет, цвет бобрового меха, зеленый, как упаковка сигарет «Лаки Страйк», масляно-желтый и тому подобное. Сущность цветовой оценки потребителя заключается в характере и мере расхождения между действительно воспринимаемым цветом и заранее сложившимся в психике стандартом, которому цвет должен соответствовать. Воспринимаемые цветовые различия соотносятся с субъективным множеством цветовых восприятий каждого отдельного потребителя. Тип различия можно указать в виде пар противоположных ощущений: светлее или темнее, серее или насыщеннее, а также любой парой комбинированных обозначений цветовых тонов из красного, желтого, зеленого и синего. Так, ощущение зеленого цвета может быть ближе к желтому или голубому и обозначаться как желтовато-зеленый, либо синевато-зеленый; аналогичным образом ощущение оранжевого цвета может варьировать между красным и желтым. Вариации степени светлого и темного называют различиями по светлоте; вариации от серого до выраженного «чистого» цвета — различиями по насыщенности цвета. Вариации, которые человек стремится выразить словами из ряда — красный, желтый, зеленый и синий, — носят название различий по цветовому тону. Воспринимаемый цвет объекта, расположенного в том или ином участке поля зрения произвольного наблюдателя, может меняться по светлоте, насыщенности и цветовому тону, но его описание всякий раз возможно лишь единственной комбинацией количественных мер этих понятий. Это служит нам основанием утверждать, что восприятие цвета объектов трехмерно.

Использование терминов «светлота», «насыщенность» и «цветовой тон» для описания цветовых ощущений, получаемых при рассмотрении объектов, весьма распространено. Многие люди систематизируют свои ощущения цвета в соответствии с этими тремя переменными величинами, даже если они не называют их конкретно так, как сделали мы. Возможны и часто используются другие способы организованного описания цветовых ощущений. Например, сочетания воспринимаемых различий в светлоте и насыщенности встречаются довольно часто и обозначаются общепринятыми терминами. Если цвет одного объекта в нашем восприятии одновременно и светлее, и серее, чем другого, то мы говорим, что у него более блеклый цвет. А качество, противоположное блеклости, называется глубиной цвета. Таким образом, можно

более блеклый = более светлый и более серый = белее,

более глубокий = более темный и насыщенный
и аналогично

ярче = светлее и насыщеннее = чище,
мутнее = темнее и серее = грязнее = чернее.

Язык потребителя в том, что касается определения цвета, часто нечеток, но каким-то образом с его помощью удастся передать те привычные представления, о которых все мы знаем по нашему собственному субъективному опыту. Между этими привычными представлениями и физическими измерениями (спектрального распределения коэффициента отражения, спектрального распределения потока излучения) разница на первый взгляд огромна. Но для практического использования физических измерений цвета нам необходимо найти такой способ «пересчета» физических величин, который дал бы результаты, соотносимые с тем, что видит потребитель. Мы должны перекинуть мост между физикой и психологией.

ПСИХОФИЗИКА — КАК ПРЕДСКАЗАТЬ ТО, ЧТО УВИДИТ РЯДОВОЙ ПОКУПАТЕЛЬ

Если изготовитель захочет узнать, каким выглядит данный товар в глазах рядового покупателя, то в подавляющем большинстве случаев он прибегнет к весьма непосредственному методу. Он выберет наугад кого-либо из находящихся в этот момент поблизости людей и спросит его. Таким человеком может быть вице-президент фирмы, один из рабочих завода, руководитель проектного отдела, машинистка или вообще любой, кого можно считать типичным покупателем. Изготовитель может положиться даже на свою собственную оценку, если он думает, что сумеет в своем психическом состоянии воспроизвести сочетание легковерия и подозрительности, характерное для рядового покупателя. Либо же он попросит лицо, ответственное за разработку внешнего оформления товара, или своего агента по рекламе провести опрос. Главное, что необходимо выяснить — правильно ли выбран цвет?

Что приобретет покупатель, в каком количестве и по какой цене — это проблемы, превращающие производство и сбыт продукции в своего рода крупную рискованную операцию. Широко распространено скептическое отношение к выводам на основе массовых опросов; этот скептицизм резко усиливается после каждой получающей известность и бурно обсуждаемой средствами информации неудачи, постигшей деловую операцию, проведенную с учетом результатов такого опроса. Процветающая фирма, рекламирующая товарные знаки — символы определенных товаров, может неоднократно получать (и, вероятно, получает) солидную прибыль, успешно способствуя увеличению сбыта товаров своими методами. Ее глава может спросить: «Вот вы произвели массовый

опрос. Ну и что из этого получилось?» Тем не менее, несмотря на определенный риск ошибиться, опросы — формальные и неформальные — могут быть очень полезны изготовителю промышленных товаров и художникам-дизайнерам, отвечающим за их внешнее оформление, даже в такой трудной проблеме, как выбор цвета товара или его упаковки. Если правильно учесть многочисленные возможные совокупности условий, в которых покупатель рассматривает товар (тип освещения, расстояния, окружающие объекты и т. д.), можно достаточно разумно выбрать цвет товара.

После того как для корпуса портативного радиоприемника выбран цвет, например глубокий красный, изготовитель может оказаться в положении, когда ему необходимо воспроизвести этот цвет при изготовлении от 10 до 100 000 корпусов, а в его планы может входить делать их год за годом. Первая операция может показаться сравнительно простой. Он вручает свой проект и образец цвета представителю фирмы, изготавливающей пластмассовые изделия, и запрашивает его о предполагаемой цене. Далее следует уточнение допусков на размеры, и стороны торгуются о цене и условиях поставок. Затем изготовитель пластмасс заявляет: «Мы можем абсолютно точно воспроизвести тот глубокий красный цвет, который вы хотите, сделав специальный краситель, но наш стандартный краситель «Красный XG-12S» придает материалу цвет, очень близкий к предъявленному вами, его применение упростило бы для нас процесс производства. Мы успешно использовали этот стандартный краситель уже в десятках случаев и, если вы согласитесь на замену, сможем несколько уступить в цене». Изготовитель радиоприемников припоминает результаты массового обследования приемлемости цвета, которые свидетельствуют, что некоторые глубокие красные цвета отвергались потребителями, убежденными, что они не будут хорошо смотреться в доме или на пляже или не будут гармонировать с окраской чемоданов в путешествии. Дальше — больше: он совсем не уверен, что хотел бы для своих изделий окраски того же цвета, который уже использовался в десятках случаев. У него есть надежда сделать в сознании потребителя именно этот конкретный глубокий, насыщенный красный цвет символом богатства звучания радиоприемника. Поэтому он отвечает: «Я подумаю. Пришлите мне образец вашего «Красного XG-12S». Он видит, что «Красный XG-12S» представляет собой коричневатокрасный цвет умеренной насыщенности, или то, что можно попросту назвать грязноватокрасным. Он посылает образцы двух красных цветов другой фирме — изготовителю пластмасс — и получает ее условия контракта. Результаты убеждают его в том, что и в самом деле он может сэкономить несколько центов на каждом приемнике, если согласится на стандартный коричневатокрасный. Но затем он опять вспоминает о результатах опроса; он не склонен не считаться с ними вовсе. Поэтому он

решает тратить несколько дополнительных центов на каждый приемник, но настаивать, чтобы он был окрашен в оригинальный глубокий красный цвет. Цена, запрашиваемая первой фирмой, ниже: именно с ней заключается контракт, в котором определяются коммерческие условия соблюдения первоначально избранного глубокого красного цвета.

До этого этапа не возникает никаких проблем, связанных с физикой или психофизикой. В девяти случаях из десяти изготовитель получает нужный ему цвет, просто разрезая пополам исходный окрашенный образец; одна половина отсылается партнеру для сравнительного контроля цвета поставляемых деталей (в нашем случае — корпусов радиоприемников). Никакой необходимости в точных измерениях пока нет. Но слишком часто опыт изготовителя оказывается горьким: он замечает, что цвет поставляемых корпусов портативных радиоприемников постепенно начинает все больше отличаться от выбранного глубокого красного и приближаться к коричневато-красному, создаваемому более дешевым красителем. Изготовителя охватывает раздражение — он платит высокую цену за соблюдение избранного и согласованного цвета, а поставщик жульничает, щедро подмешивая более дешевый коричневато-красный краситель. Несколько центов, сэкономленных на каждом из 50 000 корпусов, дают в итоге солидную сумму. Изготовитель аннулирует заказ на еще не поставленные корпуса, мотивируя это несоответствием их цвета согласованному, и прекращает платежи. Поставщик угрожает возбуждением судебного иска, утверждая, что в цвете поставляемых деталей коммерчески согласованные условия соблюдаются. Изготовитель полон решимости доказать, что поставщик подмешивает в окрашивающее вещество какое-то количество нежелательного «Красного XG-12S». С этой целью он посылает химику — специалисту по красителям — «Красный XG-12S» и два пластмассовых корпуса, цвет одного из которых (по его мнению) соответствует избранному глубокому красному, а цвет другого — не соответствует. Ответ химика гласит: красному, а цвет другого — не соответствует. Ответ химика гласит: пластмасса обоих корпусов окрашена смесью одних и тех же красителей; с помощью химического анализа невозможно установить разницу между ними. Изготовитель продолжает считать, что его обманывают. Поставщик же подозревает, что радиоприемники не пользуются успехом у покупателя и изготовитель ищет предлога, чтобы разорвать контракт. Подозрения, адвокаты, междугородние телефонные разговоры, совещания, авиационные перелеты, головные боли. Обнаруживается, что две половинки исходного цветового образца, одну из которых часто брали руками, имеют уже не одинаковый цвет. Наконец, изготовитель соглашается на возобновление поставок, но по цене, меньшей первоначально обусловленной. В результате этой истории он научился двум вещам: во-первых, цветовой образец иногда со временем изменяет свой цвет;

во-вторых, никто в точности не знает, что такое коммерчески допустимые условия соблюдения цвета.

Наступает время заказывать новую партию пластмассовых корпусов. Изготовитель извлекает урок из предыдущего. Его стал очень интересовать вопрос о том, как узнать, что именно придавало первым из поставленных корпусов приемников нужный глубокий красный цвет. Он хотел бы включить в следующий контракт пункт, который оговаривал бы, в каких случаях цвет пластмассы является приемлемым, а в каких — нет. Вопреки подозрениям первого изготовителя пластмасс радиоприемники раскупались хорошо и изготовитель хотел бы сохранить для них первоначально выбранный цвет. Он — специалист в проблемах измерения цвета; он знает, где покупать различные радиодетали, как собирать из деталей радиоприемники и как эффективно испытывать их. Но он слышал о приборе, который анализирует цвета, — спектрофотометре, об устройстве, точно измеряющем, какое количество энергии в каждом из участков спектра отражает образец. После недолгих расспросов, выясняется, что имеется несколько учреждений, где это физическое устройство могут предоставить в распоряжение изготовителя для исследования каждого образца за небольшую плату. Если образец должен использоваться в качестве стандарта в коммерческой сделке, то изготовитель может послать его в коммерческую испытательную лабораторию, или на физический факультет ближайшего университета, или даже в Национальную лабораторию по стандартизации. В результате он получает спектральные кривые коэффициента отражения в пределах видимого спектра (обычно достаточно иметь их в интервале длин волн от 400 до 700 нм) не только для образца глубокого красного цвета, который он хочет воспроизвести, и коричневато-красного цвета, которого он желает избежать, но и для образцов других цветов, например белого, черного и светло-коричневого, которые он мог бы использовать для окраски пластмассовых корпусов малогабаритных радиоприемников. На рис. 1.11 показана зависимость изменения коэффициента отражения от длины волны (или, как часто говорят, спектральное распределение этого коэффициента) для образцов пяти перечисленных цветов.

Изготовитель очень заинтересован в результатах этих испытаний. Он отмечает, что белый образец очень сильно отражает свет (от 80 до 90%) в пределах видимого спектра, черный образец отражает лишь ~4% независимо от длины волны падающего на него света. Он слегка озадачен тем, что значения коэффициента отражения ни одного из образцов не бывают < 4% в любом из участков видимого спектра, но ему указывают, что всякий отполированный до блеска пластмассовый образец отражает от своей поверхности ~4% падающей энергии за счет простого зеркального отражения; поэтому любой образец, отражающий всего лишь

4% на любой длине волны, практически поглощает всю лучистую энергию, достигающую его поверхности. Далее он проявляет любопытство по поводу сложной формы кривой спектрального коэффициента отражения светло-коричневого образца; ему интересно узнать, что эта кривая содержит информацию о том, что светло-коричневый цвет образца обусловлен наличием в нем по меньшей мере трех пигментов — красного, ответственного за максимум поглощения при длине волны 550 нм; оранжевого, поглощающего

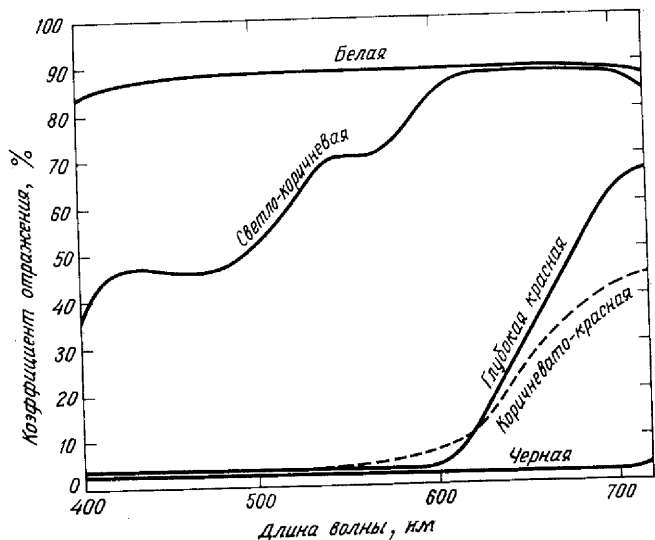


Рис. 1.11. Спектральные кривые коэффициента отражения для пяти предполагаемых типов пластмасс белого, светло-коричневого, коричневатого, глубокого красного и черного цветов.

Приводимые кривые не соответствуют точно кривым отражения пластмасс, окрашенных реальными красителями, а вычерчены произвольно с целью проиллюстрировать рассказ об изготовителе радиоприемников, пытающемся закупить пластмассовые корпуса.

наиболее сильно вблизи длины волны 470 нм, и белого, максимум поглощения которого находится в ультрафиолетовой области (т. е. при длине волны, меньшей 400 нм). Но наибольшее внимание изготовителя привлекает к себе разница между кривыми, описывающими глубокий красный цвет образца, который он хочет воспроизвести, и коричневатого-красного цвета (прерывистая линия) неприемлемого для него образца.

Изучая рис. 1.11, изготовитель радиоприемников уже пришел к некоторым правильным обобщениям. Он отметил, что белый образец (самый светлый из пяти) отличается также самым высоким коэффициентом отражения и что черный образец (самый темный) отражает меньше всех остальных. Более того, светло-корич-

невый образец, цвет которого значительно светлее, чем у обоих красных образцов, отражает свет в любом участке спектра сильнее красных образцов. Очевидно, что коэффициент отражения некоторым общим образом взаимосвязан со светлотой воспринимаемого глазом цвета. Чем выше процент света, отражаемого образцом, тем светлее цвет, которым в нашем восприятии мы наделяем образец.

Информация, содержащаяся в кривых рис. 1.11, позволяет сделать и другие обобщения. Существенная отличительная черта как белого, так и черного образцов заключается в том, что они отражают свет неизбирательно (неселективно), т. е. для них не существует какого бы то ни было выделенного участка спектра, в котором они, отражая, посылали бы в глаз наблюдателя намного больше энергии излучения, чем в других участках. В результате эти образцы имеют в нашем восприятии нейтральный или сероватый цвет. Образцы светло-коричневого, коричневатого-красного и глубокого красного цвета образуют цветовую последовательность возрастающей насыщенности, т. е. они все более отличаются от любого серого цвета. Можно отметить, что соответствующие кривые спектрального коэффициента отражения обладают все большей крутизной и, следовательно, для образцов в том порядке, в котором они перечислены, характерна возрастающая селективность отражения света. Глубокий красный цвет образца очень сходен с цветом излучения участка спектра, примыкающего к длинноволновой границе видимого диапазона. В то же время цвет светло-коричневого образца хотя и несколько напоминает цвет излучения участка спектра вблизи 585 нм, но по цветовому тону представляет собой очень бледное отбеленное подобие цвета этого излучения. Эти сравнения помогают прийти к общему правилу, что цветовой тон воспринимаемого цвета объекта соответствует цветовому тону излучения того участка спектра, в котором объект наиболее сильно отражает свет, а насыщенность воспринимаемого цвета соответствует степени селективности отражения, т. е. крутизне кривой спектрального коэффициента отражения.

Изготовитель теперь может понять, почему выбранный им вначале глубокий красный цвет воспринимался более насыщенным: кривая, описывающая спектральное изменение коэффициента отражения соответствующего образца, имеет большую крутизну. Однако, когда он пытается применить сделанный им обобщающий вывод о светлоте цвета к выяснению того, почему цвет коричневатого-красного образца воспринимается как более светлый по сравнению с глубоким красным цветом, он осознает, что его обобщение имеет лишь качественный характер. Ибо в некоторых участках спектра образец глубокого красного цвета отражает свет во много раз больше коричневатого-красного образца. Необходимо, чтобы спектральная область между 550 и 660 нм, в которой отражение второго-

образца сильнее, чем у первого, обеспечивала бы больший вклад в светлоту, чем область, примыкающая к длинноволновому концу видимого спектра, в которой указанное соотношение между коэффициентами отражения изменяется на противоположное. Теперь впервые изготовитель ощущает необходимость в надежной информации психофизического характера. Он нуждается в основе для коммерческой спецификации, которая гарантировала бы, что покупатель его изделий воспримет цвет пластмассового корпуса ни слишком светлым, ни слишком темным, ни слишком желтоватым, ни слишком синеватым и сероватым. Он понимает, что нужен метод, который помог бы предсказать, соответствует ли цвет одного образца цвету другого. Он извлек уже достаточный опыт, чтобы предполагать, что подобный метод должен быть основан на каком-то способе усреднения кривых спектрального коэффициента отражения каждого образца, но вклад различных участков спектра в получаемое среднее значение должен соответствовать характеру восприятия покупателем цвета изделия.

Изготовитель испытывает чувство удовлетворения, когда узнает, что такой метод действительно существует. В самом деле, имеется метод, широко распространенный в промышленной практике цветового контроля и известный под названием метода измерения цвета МКО. Эта международная организация рекомендует основные стандарты и процедуры, касающиеся всех аспектов света, освещения и осветительной техники, включая колориметрию (измерение цвета).

Используя метод МКО, изготовитель находит, что он должен знать спектральное распределение потока излучения, испускаемого источником, освещающим образцы. Выяснив это, он должен при усреднении кривой спектрального отражения каждого образца использовать три взвешивающие функции (нередко называемые весовыми). Их именуют функциями сложения цветов, и они характеризуют цветовосприятие среднего наблюдателя с нормальным цветовым зрением.

При решении той частной проблемы, которой занят изготовитель радиоприемников, применение метода МКО предсказывает, что два образца и в самом деле будут восприниматься неодинаковыми по цвету. Разумеется, изготовителя сразу же интересует возможность предсказания величины цветового различия (рассогласования цветов) и получения конкретных данных о том, будет ли цвет одного образца восприниматься более серым или более насыщенным, более красным, зеленым, синим или желтым, более светлым или более темным и тому подобное по сравнению с цветом другого образца. Сделать такие количественные предсказания довольно трудно, но и для этих целей были разработаны методы, с помощью которых изготовитель может узнать количественно выраженные с разумной степенью точности величину и направле-

ние воспринимаемого различия в цвете двух образцов. Эти методы основаны на результатах многочисленных лабораторных экспериментов по выяснению визуального цветоразличия.

Предположим теперь, что изготовитель радиоприемников, и в самом деле, определил величину и направление воспринимаемого различия в цвете двух образцов. Он испытывает озабоченность по поводу того, окажется ли такое различие приемлемым или хотя бы терпимым для его потребителей. Он спрашивает: «Может ли наука о цвете помочь мне в этом отношении и дать мне метод предсказания максимального отличия от исходно выбранного цвета, при котором мои изделия все еще будут раскупаться?». К сожалению, наука о цвете не может оказать ему сколько-нибудь значительной помощи при решении этой проблемы. Проблема предсказания приемлемости цветового различия в противоположность проблеме восприятия того же самого различия связана с оценкой параметров, которые часто выходят за пределы возможностей научного исследования. Она зависит от таких ненаучных вопросов, как сорт окрашиваемого материала и характер его предполагаемого или предвидимого конечного использования, технические трудности и издержки его производства, желания и мечты покупателя, заказывающего этот материал, и многих других факторов.

Прежде чем мы приступим к подробному изложению системы определения цвета МКО, оценке цветовых различий и условий, предъявляемых к цветовым допускам, рассмотрим еще некоторые из основных фактов, связанных с цветовым зрением и, следовательно, лежащих в основе цветовых измерений.

УРАВНИВАНИЕ ПО ЦВЕТУ

Если наблюдатель с нормальным цветовым зрением попытается изменить цвет какой-либо детали, попадающей в центр поля зрения, так, чтобы он был одинаков с цветом соседней детали, он в конечном счете обнаружит, что должен располагать тремя независимыми средствами регулирования. Допустим, что он использует красную, желтую и синюю краски, обычно имеющиеся под рукой. Тогда, смешивая во всевозможных пропорциях две из них, он может добиться равенства цветов лишь в редких случаях. Даже получение коричневого цвета требует добавления синей краски к смеси красной и желтой. В цветовом многообразии, получаемом смешениями трех красок, легко найти цвет, одинаковый с любым заданным цветом, но исходных красок должно быть ни в коем случае не менее трех. Те же самые соображения применимы к красному анилиновому, желтому и голубому красителям, используемым в цветной фотографии, литографии и цветной печати. Аналогично, если наблюдатель пытается уравнивать по цвету пятно света

на белом экране, освещая соседний с ним участок несколькими световыми пучками различного цвета, он в общем случае придет к выводу, что либо ему потребуются три таких цветовых стимула определенного спектрального состава, либо (если одновременно смешиваются лишь два цветовых стимула) не только интенсивности обоих стимулов, но и спектральный состав, по крайней мере одного из них, должны быть регулируемыми. То же правило применимо к смешиванию цветов с помощью вращающегося и разделенного на отдельные разноокрашенные сектора диска; необходимо и достаточно разделить диск на четыре сектора, что дает три независимых способа регулировки. Нормальное цветовое зрение трехмерно!

Мы несколько раз указывали на трехмерную природу нормального цветового зрения. Мы подчеркивали, что для осуществления такого зрения в сетчатке должны присутствовать светочувствительные пигменты или сочетания светофильтр-пигмент по меньшей мере трех различных типов. Далее, для интерпретации кривой спектрального хода коэффициента отражения образца, измеренного на спектрофотометре, и осуществления таким образом цветового зрения необходимо иметь три взвешивающие функции, или функции сложения цветов. И наконец, описание цветового восприятия требует трех переменных, таких как светлота, цветовой тон и насыщенность. Рассмотрение различных способов, с помощью которых один из центральных участков нашего поля зрения может быть уравнен по цвету с соседним участком, вновь указывает на трехмерность нормального цветового зрения, однако мы должны проанализировать, что же в каждом отдельном случае происходит с цветовым стимулом на его пути от источника света к сетчатке глаза.

СЛОЖЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ СТИМУЛОВ

Один из наиболее прямых методов изучения того, каким образом наши глаза дают нам возможность воспринимать цвет, состоит в сложении световых потоков или, более точно, в сложении цветовых стимулов. Сначала направим световой пучок (например, от лампы накаливания) так, чтобы он создавал освещенный участок на белом экране. Энергия излучения отражается от этого участка и преломляется частицами пигмента, окрашивающего экран. Отраженная энергия имеет такое пространственное распределение, что наблюдатель может видеть освещенный участок одинаково хорошо из многих различных положений относительно экрана. В любом из этих положений лишь малая доля отраженного потока излучения попадает в глаз и становится цветовым стимулом. Поскольку частицы белого пигмента действуют на энергию излучения какой-либо одной длины волны видимого спектра примерно

так же, как и на излучения другой длины волны (рис. 1.14), спектральный состав цветового стимула весьма близок к спектральному составу потока излучения, падающего на экран. Наблюдатель сразу же улавливает значение этой физически сложной ситуации. Он видит белый экран и на нем пятно желтого цвета. Более точно,

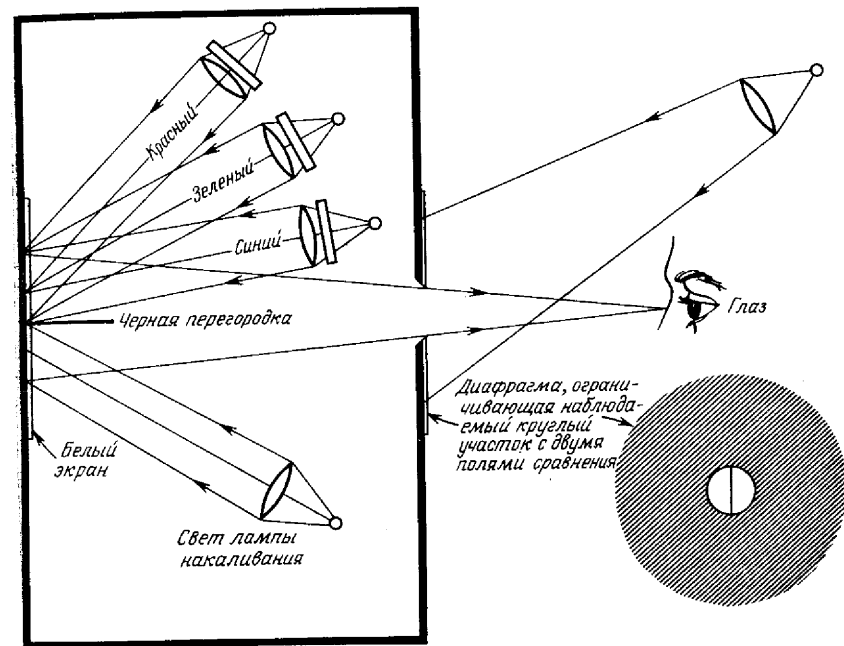


Рис. 1.12. Схематическое изображение устройства для демонстрации аддитивного смешения цветов.

Это простое устройство помогает понять принцип трехмерной колориметрии. Справа внизу показано изображение поля зрения, как оно воспринимается наблюдателем. Левая половина внутреннего круга (одно из полей сравнения) порождает в глазу цветовой стимул, обусловленный излучением лампы накаливания; правая его половина (второе поле сравнения) порождает смесь красного, зеленого и синего стимулов, возникающих в результате отражения белым экраном трех излучений отдельных источников. Окружающее поле закрыто редуцирующим экраном, который можно оставить темным или освещать излучением наружного источника, который располагается сбоку от наблюдателя.

это пятно имеет слабонасыщенный желтый цвет легкого красноватого оттенка. Наблюдатель прекрасно осознает, что воспринимаемый им цвет — цвет не экрана, а освещающего его излучения.

Затем направим на соседний участок экрана три световых потока, резко различающихся по цвету. Пусть их цвета будут, например, красным, зеленым и синим, как показано на рис. 1.12. Белые частицы пигмента экрана, как и прежде, диффузно отражают энергию излучения каждого из трех потоков практически

неселективно. Цветовой стимул, попадающий в глаз наблюдателя, представляет собой сумму отдельных стимулов, которые воздействовали бы на глаз от каждого из трех перечисленных световых потоков, если бы источники двух других были отключены. При этом спектральный состав сочетания трех цветowych стимулов есть результат простого сложения трех отдельных стимулов, что можно проверить измерениями на спектро радиометре. Наблюдатель видит второе пятно окрашенным в красный, зеленый, синий или какой-нибудь промежуточный цвет в зависимости от относительных интенсивностей потоков, испускаемых источниками красного, зеленого и синего света. И в этом случае он воспринимает цвет как принадлежность освещающего излучения, а не экрана, который, если его наблюдать, сам по себе воспринимается как белый. Дело упрощается, если неосвещенные участки экрана закрыты с помощью черной диафрагмы; тогда наблюдатель видит пятна просто как самосвещающиеся участки поверхности. Этот прием называется редуцированием (сведением) цвета к изолированно воспринимаемому (апертурному) цвету, а диафрагму называют редуцирующим экраном.

С помощью установки подобного типа мы можем выполнять некоторые весьма фундаментальные как качественные, так и количественные эксперименты, относящиеся к цветовому зрению. Во-первых, мы можем установить, нельзя ли воспроизвести желтый цвет, или желтый стимул, смешивая стимулы, порождаемые красным, зеленым и синим излучениями. Исследуя эту возможность, получим утвердительный ответ и найдем, что воспроизведение возможно при определенном соотношении интенсивностей трех излучений (количественно преобладающим должно быть красное, несколько менее интенсивным — зеленое и еще менее интенсивным — синее). Далее обнаружим, что воспринимаемые цвета любого цветового тона могут быть воспроизведены подобным смешением красного, зеленого и синего цветowych стимулов. Отключая синий стимул и меняя соотношения красного и зеленого в смеси, мы сможем воспроизвести последовательность цветов, включающую желтый, воспринимаемый нами как чистый, без какой-либо примеси красноватого или зеленоватого оттенков. Отключая зеленый стимул и меняя соотношение красного и синего, мы получим последовательность пурпурных цветов, включающую в одинаковой степени красноватый и синеватый оттенки. И наконец, отключая красный стимул, мы сможем воспроизвести последовательность зеленовато-синих цветов, включающую оттенок голубого цвета, в равной степени синеватый и зеленоватый. При одновременном воздействии на сетчатку всех трех стимулов возникают ощущения цветов, воспринимаемых менее насыщенными, чем перечисленные граничные цвета. Существует даже небольшая область таких соотношений красного, зеленого и синего стимулов, смеси

которых дают цвета столь низкой насыщенности, что их можно считать не имеющими никакого определенного цветового тона. Такие цвета называют ахроматическими, или нейтральными.

Дальнейшее исследование показывает, что не все цвета, которые могут восприниматься от самосвещающейся поверхности, можно уравнивать каким-либо сочетанием красного, зеленого и синего стимулов. Некоторые воспринимаются чересчур яркими для уравнивания. Но мы устанавливаем, что это — сравнительно простое ограничение, связанное с количественными характеристиками используемых потоков излучения. Мы в состоянии преодолеть его, применяя в соответствующих проекционных устройствах более мощные лампы, или повышая напряжение, питающее лампы, или концентрируя больший поток на данной площадке с помощью более мощных линз. Однако, что более важно, некоторые стимулы воспринимаются слишком насыщенными, чтобы их можно было уравнивать по цвету, сохраняя неизменной нашу методику. Например, если участок, освещенный лампой накаливания и используемый как образец для сравнения, покрыть желтым желатиновым фильтром или желтым стеклянным светофильтром, наподобие выпускаемых для сигнализации уличного движения, либо желтым жидким светофильтром типа раствора хромистого калия, получаемый желтый цвет может оказаться насыщенным настолько, что его нельзя уравнивать, даже отключив вовсе поток излучения синего цвета. О цветах, воспроизводимых смешением выбранных красного, зеленого и синего стимулов, говорят как о цветовом охвате системы. Цвета, которые мы не в состоянии уравнивать при выбранных для смешения стимулах, находятся за пределами этого охвата.

Можно увеличить цветовой охват трехкомпонентных смесей, выбирая в качестве трех исходных стимулов цвета излучений определенных участков самого видимого спектра. Но эксперименты такого типа, проводившиеся на протяжении последних 250 лет, показали, что не существует набора трех стимулов, смешение которых способно уравнивать все другие стимулы. Значительные совокупности чистых спектральных цветов и цветов, близких к спектральным, всегда остаются вне цветового охвата любых трех стимулов.

Очевидно, что результаты этого простого эксперимента вновь заставляют нас обратиться к изучению некоторых фундаментальных свойств глаза. Обычно эти результаты интерпретируют как свидетельство того, что кривые спектральных чувствительностей фотопигментов глаза перекрываются. Иными словами, излучение почти всех участков видимого спектра возбуждает более чем один пигмент, и поэтому всегда более чем одна из трех независимых рецепторных систем участвует в механизме цветовосприятия. Если бы при подобном подходе удалось обнаружить участки спектра, излучения которых возбуждают только одну рецепторную систе-

му и не затрагивают двух других, тогда и только тогда мы могли бы ожидать, что сумеем воспроизводить все цвета смешением трех таких чистых спектральных стимулов.

Постоянство зрительного уравнивания цвета. Самосветящиеся участки поверхности, наблюдаемые нами в поле зрения, охарактеризованном на рис. 1.12, имеют цвета, которые мы можем описать в терминах яркости, цветового тона и насыщенности. Мы используем здесь термин «яркость» вместо «светлота», чтобы подчеркнуть, что мы воспринимаем излучение от освещенных площадок, а не от пространственных объектов. Такое терминологическое различие нельзя считать существенным, но оно зачастую удобно, если нужно указать тип цветовосприятия при заданных условиях наблюдения: воспринимается ли цвет самосветящегося предмета (цвет излучения, цвет источника освещения) или цвет несамосветящегося объекта.

Когда наше восприятие цвета относится к первому типу, субъективное ощущение яркости заключено в пределах от очень тусклого (темного) до очень яркого (слепящего). Восприятие цвета несамосветящегося объекта дает ощущение светлоты (от черного до белого), при этом объекты воспринимаются как непрозрачные по отношению к другим объектам.

В эксперименте, проиллюстрированном на рис. 1.12, мы можем изменить тип восприятия цвета поля зрения, освещая переднюю поверхность редуцирующего экрана (теперь уже белого) от источника, расположенного сбоку от наблюдателя. Такое расположение обеспечивает падение излучения этого источника на ту часть белого экрана, которая не видна наблюдателю сквозь отверстие в редуцирующем экране, и наоборот — гарантирует, что оно не будет освещать поле зрения. Когда яркость редуцирующего экрана сравнивается с яркостью излучения, наблюдаемого через отверстие, тип цветовосприятия меняется. Мы воспринимаем цвета, видимые через отверстия, уже не как цвета излучения (именуемые также цветами, не локализованными по глубине, или цветами в отверстиях), а как цвета несамосветящихся объектов. При этом изменении типа цветовосприятия нам кажется, что отверстие исчезло, и на его месте мы видим два плоских окрашенных полукруга, воспринимаемых, как цветная бумага, наклеенная на редуцирующий экран. При этом мы можем заметить резкие изменения в яркости и цветности (цветовом тоне и насыщенности) цветов. Например, если при темном редуцирующем экране мы воспринимали через отверстие достаточно насыщенный оранжевый цвет, то при ярко освещенном редуцирующем экране, когда тип нашего цветовосприятия меняется, мы видим тот же участок поля зрения окрашенным в цвет, который можно было бы описать как темно-коричневый. Любопытно, что коричневый цвет можно уви-

деть лишь при цветовосприятии второго типа (цвета объектов), но никогда — при восприятии цвета излучения (источника освещения). К другим цветам, воспринимаемым исключительно как цвета окрашенных объектов, относятся оливковый и черный.

Подобные эксперименты демонстрируют нам некоторые из поразительных особенностей восприятия цвета, в частности то, как резко наше восприятие может меняться при относительно незначительных изменениях условий наблюдения. Но эти эксперименты подтверждают также фундаментальный закон, известный как *закон постоянства зрительного уравнивания цветов* [374].

Предположим, что мы уравнили цвет стимула, порождаемого излучением лампы накаливания на левой половине круглого поля зрения (рис. 1.12), подобрав пужкую для этого смесь красного, зеленого и синего стимулов на правой половине. Редуцирующий экран, окружающий эти два участка поля зрения, сначала затемнен, затем мы освещаем его светом определенной яркости и цветности и наблюдаем, как изменились цвета половинок поля. Нам уже не удивляет тот факт, что воспринимаемый цвет круглого поля изменился; но кроме этого мы замечаем, что цветовое равенство между двумя половинками этого поля сохраняется. Продолжая эксперимент, мы установим, что почти при любом выборе яркости и цветности излучения, освещающего окружающую поле поверхность, равенство по цвету двух половинок поля остается неизменным.

Мы можем также направить взгляд на другие ярко окрашенные участки поверхности, с тем чтобы изменить состояние цветовой адаптации глаза. Но после этого — стоит посмотреть на первоначальное поле, и мы установим, что цветовое равенство двух его половинок сохраняется.

Закон постоянства зрительного уравнивания справедлив не для всех возможных изменений условий наблюдения, но верен для всех тех изменений, которые важно учитывать на практике. Цветовое равенство сохраняется при предварительной адаптации к излучениям умеренной и даже довольно высокой яркости, но оно нарушается, если глаз до наблюдения сравниваемых половинок поля подвергается воздействию излучения чрезвычайно высокой яркости [63, 703, 704].

Еще одно ограничение на справедливость этого закона возникает в том случае, когда изображения сравниваемых по цвету половинок поля выходят за пределы области сетчатки, в которой отсутствуют палочки (области желтого пятна), т. е. когда их угловые размеры превышают 2° . В этом случае уменьшение яркости двух половинок поля в одно и то же число раз может нарушить цветовое равенство: в цветовосприятии эффективно вмешивается палочковый механизм зрения и изменяет нашу оценку равенства цветов [381, 634, 661].

Законы Грассмана. В широком диапазоне условий наблюдения, в котором соблюдается закон постоянства зрительного уравнивания цветов, информация, которую можно выразить количественно, получая ее из экспериментов по смешению трех цветовых стимулов, была сведена Грассманом [196] в первые два закона.

1. Глаз может регистрировать лишь три вида различий (вариаций) цвета (выражаемых, например, различием цветового тона, яркости и насыщенности).

2. Если в смеси трех цветовых стимулов один из них непрерывно изменяется (в то время как два других остаются неизменными), цвет смеси также изменяется непрерывно.

Грассман пошел дальше этих утверждений, сформулировав самый общий закон, подтверждающийся, как и первые два, экспериментально.

3. Смешение стимулов одного и того же цвета (т. е. одинакового цветового тона, одинаковой яркости и одинаковой насыщенности) дает идентичные по цвету результаты независимо от спектрального состава излучений, порождающих эти стимулы. Вся современная колориметрия основана на этом принципе. Он означает, что мы можем оперировать со стимулами, учитывая исключительно их цвет и не рассматривая их спектрального состава. Третий закон Грассмана влечет за собой следующие важные выводы.

а) Два стимула одного и того же цвета, порознь смешанные с двумя другими стимулами, цвета которых также совпадают, дают смеси одинакового цвета. Другими словами, если стимул a равен по цвету стимулу b , а стимул c — стимулу d , то цвет смеси $(a + c)$ равен по цвету смеси $(b + d)$. Это правило представляет собой эквивалент арифметической аксиомы: если равные величины складываются с равными, то и результаты сложений равны.

б) Если стимулы одного и того же цвета вычитаются из смесей одинакового цвета, то остающиеся после вычитания цвета одинаковы. Иначе говоря, если стимул a равен по цвету стимулу b , а смесь стимула c уравнена по цвету со смесью d , то после вычитания a из смеси c цвет остатка будет тот же, что и после вычитания b из смеси d . Это правило также имеет эквивалент арифметической аксиомы: когда равные величины вычитаются из равных, результаты вычитаний равны между собой.

в) Если одна единица какого-либо стимула имеет тот же цвет, что и одна единица другого стимула, то цвет любого числа единиц (или любой доли единицы) первого стимула одинаков с цветом такого же числа единиц (или такой же доли единицы) второго. В другой формулировке это можно выразить следующим образом: увеличение или уменьшение в одно и то же произвольное число раз потоков излучения, характеризующих величину двух стимулов одинакового цвета, но не нарушающего спектральных распределений этих потоков, не нарушает и цветового равенства, какими

бы ни были спектральные распределения исходных стимулов. И для этого правила есть арифметический эквивалент: если одинаковые величины умножаются (или делятся) на одно и то же число, результаты всегда одинаковы.

Следствия а), б) и в) иногда называют законами линейности при уравнивании цветов. В частности, следствия а) и б) утверждают, что при таком уравнивании имеет место аддитивность, а следствие в) выражает свойство пропорциональности.

Устройство, схематически изображенное на рис. 1.12, указывает на существование непосредственного, практического метода измерения цвета. Для любого цвета, входящего в цветовой охват системы трех стимулов, количества трех стимулов, необходимых для его воспроизведения, могут служить мерой этого цвета. Такие количества называют координатами данного цвета, а само устройство, показанное на рис. 1.12, является по существу простейшим трехмерным колориметром.

Три стимула (красный, зеленый и синий), создаваемые тремя потоками излучения, носят названия инструментальных стимулов, опорных стимулов или основных цветов. Все перечисленные стимулы представляют собой, разумеется, радиометрические величины и как таковые могут быть выражены в радиометрических единицах (Вт). Иногда более удобным оказывается рассматривать стимулы как фотометрические величины и выражать их через фотометрические единицы (например, $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$). Иногда удобным является выражение стимулов в произвольных психофизических терминах, таких, как отсчеты по шкалам красного, зеленого и синего цветов, отградуированных так, чтобы их смешение в одинаковых количествах давало стимул, воспринимаемый как ахроматический (нейтральный), например как дневной свет. В табл. А1 Приложения приведены основные радиометрические и фотометрические понятия и единицы.

Если бы мы захотели использовать визуальный колориметр, показанный на рис. 1.12, для испытания предложенных изготовителю радиоприемников образцов пластмассы глубокого красного цвета и коричневатого-красного, обусловленного красителем XG-12S, мы смогли бы легко сделать это, поместив сначала первый, а затем второй образец в одно из двух полей сравнения, освещенное лампой накаливания, и найдя количества красного, зеленого и синего основных цветов, необходимые для уравнивания этих полей в первом и во втором случаях. Мы обнаружим, что наборы координат цветов двух образцов несколько отличаются друг от друга. Различные наборы цветовых координат характеризуют образцы, когда они освещены лампой накаливания.

Описывая аддитивное смешение цветов и законы, связанные со зрительным уравниванием по цвету, мы достаточно вольно обращались с названиями цветов, таких, как красный, зеленый, синий,

нейтральный и т. п., основываясь на своем субъективном опыте восприятия при выполнении операций уравнивания по цвету. Такая практика совершенно обычна и очень полезна для начинающих, когда им приходится знакомиться с понятием цветовых стимулов и проделывать самостоятельно действия по уравниванию цветов. Однако необходимо снова подчеркнуть, что наш опыт восприятия цвета может быть подвергнут радикальным изменениям, когда в экспериментах по смешению цветов изменяются условия наблюдения. Тем не менее зрительно воспринимаемое равенство двух цветов, т. е. цветовое уравнивание двух стимулов различного спектрального состава, остается в сущности неизменным при подобных изменениях. Именно зрительно воспринимаемое равенство цветов, а также законы, которыми оно определяется, интересуют нас в первую очередь; характеристика стимулов в терминах нашего субъективного восприятия (цветовой тон, насыщенность и светлота), или в иных терминах — на данной стадии изучения основ науки о цвете не является существенной.

Переход от цветовых координат, которые определяют цвет смеси основных цветов в рассматриваемом выше эксперименте, к параметрам, определяющим цветовой тон, насыщенность и яркость, которые характеризуют наше субъективное цветовое восприятие цветового стимула, является сложным, и он тесно связан с условиями наблюдения, преобладающими во время эксперимента. На первой стадии изложения, когда мы используем такие наименования цветов, как красный, зеленый, синий и другие, нам необходимо ясно осознавать приблизительность этих наименований, которые могут иметь определенный смысл только в случае, если мы считаем, что на протяжении всего изложения условия наблюдения неизменны. Например, мы полагаем, что поверхность, окружающая рассматриваемые цветовые детали, создает при ярком дневном освещении стимул, близкий к тем стимулам, которые мы наблюдаем на полях сравнения при цветовых измерениях.

Трехкоординатное цветовое пространство. Законы цветового уравнивания, получаемые при аддитивном смешении световых потоков (цветовых стимулов) в том виде, как они сформулированы в законах Грассмана и следствиях из них, можно выразить простыми алгебраическими уравнениями и геометрически проиллюстрировать в трехмерном пространстве, называемом также трехкоординатным цветовым пространством. В этом пространстве каждый цвет, заданный тремя цветовыми координатами, представляется вектором. На рис. 1.13 в наклонной проекции изображена простая геометрическая интерпретация трехкоординатного цветового пространства. Три основных цвета, красный (**R**), зеленый (**G**), синий (**B**), изображенные в виде прямых линий, расположенных под некоторыми углами, являются осями системы координат. Если

R, G, B есть цветовые координаты цвета **S** по отношению к выбранным основным цветам **R, G, B**, то цвет **S** есть вектор с проекциями **R, G, B** на соответствующие координатные оси. Взаимные расположения трех осей основных цветов задаются более или менее произвольно. Эти оси в любом случае, как и оси любой косоугольной декартовой системы координат, единственным возможным образом описывают трехмерное пространство при условии, что

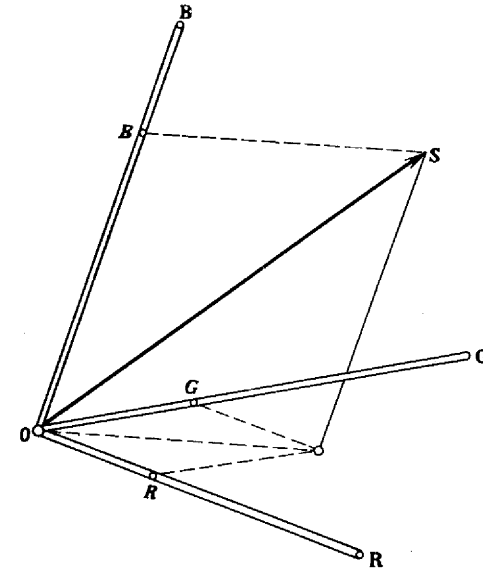


Рис. 1.13. Геометрическая интерпретация трехкоординатного цветового пространства.

R, G и B представляют собой красный, зеленый и синий основные цвета соответственно. Цвет **S** представлен вектором в векторном пространстве **R, G, B**. Цветовые координаты **R, G, B** являются проекциями вектора **S** на координатные оси **R, G, B**.

они исходят из одного центра (**O**) и не лежат в одной плоскости; это соответствует тому, что ни один из основных цветов не может быть получен какой-либо смесью (линейной комбинацией) двух других основных цветов. Масштабы на трех осях, т. е. единичные количества трех основных цветов, тоже можно выбрать произвольным образом, и только практические соображения побуждают нас сделать тот или иной целесообразный выбор. Один из целесообразных выборов масштабов основан на том, что равные количества **R, G, B** создают ахроматический цвет, соответствующий вектору (**N**), который пересекает единичную плоскость $R + G + B = 1$ в центральной точке **N**. Такой выбор масштаба проиллюстрирован рис. 1.14. В устройстве для уравнивания цветов,

в котором поля сравнения окружены поверхностью, на которой создается стимул типа дневного света, цвет этой поверхности принимается за ахроматический цвет вектора \mathbf{N} . В этом конкретном случае, когда оба поля сравнения и окружающее их поле уравнены

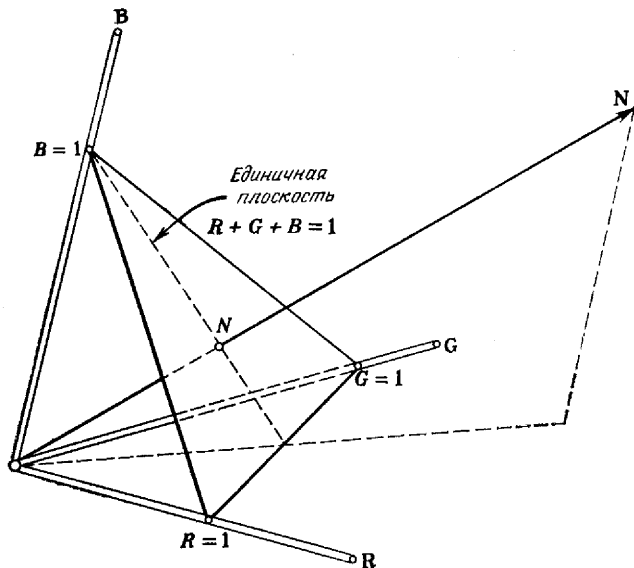


Рис. 1.14. Единичная плоскость и нейтральный цвет \mathbf{N} в трехкоординатном цветовом пространстве, определенном выбором масштабов на осях \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} .

по цвету, цвета будут восприниматься как нейтральные ахроматические, или как белые (того или иного оттенка).

Алгебраическое выражение равенства между цветом \mathbf{S} и соответствующим образом подобранной смесью трех основных цветов \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} наиболее удобно записать в векторной форме:

$$\mathbf{S}(R, G, B) = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}. \quad (1.2)$$

Если цвет \mathbf{S}_1 с координатами R_1, G_1, B_1 смешивается со вторым цветом \mathbf{S}_2 с координатами R_2, G_2, B_2 , то образуется новый цвет \mathbf{S}_0 , координаты которого мы обозначим через R_0, G_0, B_0 . В соответствии с уравнением (1.2) получаем

$$\mathbf{S}_0(R_0, G_0, B_0) = \mathbf{S}_1(R_1, G_1, B_1) + \mathbf{S}_2(R_2, G_2, B_2), \quad (1.3)$$

или в более наглядной форме

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_0(R_0, G_0, B_0) &= (R_1\mathbf{R} + G_1\mathbf{G} + B_1\mathbf{B}) + \\ &+ (R_2\mathbf{R} + G_2\mathbf{G} + B_2\mathbf{B}) = \\ &= (R_1 + R_2)\mathbf{R} + (G_1 + G_2)\mathbf{G} + (B_1 + B_2)\mathbf{B}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Из этого следует, что координаты цвета смеси двух цветов представляют собой просто суммы соответствующих координат двух смешиваемых (или, как часто говорят, складываемых) цветов:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_1 + R_2, \\ G_0 &= G_1 + G_2, \\ B_0 &= B_1 + B_2. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Можно легко увидеть, что это правило верно и для смеси более чем двух цветов, и мы можем записать уравнения общего вида в форме

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + \dots + R_n \equiv \sum_{i=1}^n R_i, \\ G &= G_1 + G_2 + \dots + G_n \equiv \sum_{i=1}^n G_i, \\ B &= B_1 + B_2 + \dots + B_n \equiv \sum_{i=1}^n B_i. \end{aligned} \quad (1.6)$$

В нашей модели векторного пространства смешивание цветов соответствует сложению векторов. Сложение двух векторов $\mathbf{S}_0 = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$ показано на рис. 1.15. На нем представлена единичная плоскость и на ней точки трех ее пересечений S_1, S_2 и S_0 с тремя цветовыми векторами $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ и \mathbf{S}_0 . Поскольку $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ и \mathbf{S}_0 лежат в одной плоскости, три точки S_1, S_2 и S_0 попадают на одну прямую — линию пересечения плоскости векторов $(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_0)$ с единичной плоскостью.

Единичная плоскость представляет для нас особый интерес. Важно отметить, что любой цветовой вектор \mathbf{S} , или по крайней мере его продолжение, пересекает единичную плоскость в точке S . Эта точка пересечения S однозначно соответствует вектору \mathbf{S} ; поэтому ее можно использовать для определения вектора \mathbf{S} во всех отношениях, кроме его длины, т. е. абсолютной величины. Мы называем S точкой цветности цвета \mathbf{S} , или просто цветностью \mathbf{S} . Участок единичной плоскости, заключенный внутри цветового охвата данной системы цветовых координат, обычно называют графиком цветности (или диаграммой цветности, или цветовым треугольником).

Термин «цветность» предполагает корреляцию с чувственно-воспринимаемой величиной, раньше называвшейся нами ощущение цветности (она объединяет цветовой тон и насыщенность), которая всегда связана с данным стимулом, воспринятым при определенных условиях наблюдения. Как указывалось выше, такая корреляция может иметь смысл только в том случае, когда условия наблюдения заданы и неизменны. Только тогда мы имеем

право предполагать, что точка цветности S , расположенная вблизи центральной точки N графика цветности, характеризует стимул, который будет восприниматься как почти ахроматический. И только в этом случае точки цветности, расположенные вблизи углов графика цветности, можно считать соответствующими стимулам, порождающим в восприятии насыщенные красный, зеленый и синий цвета. Однако указанную связь между цветностью и ощущением

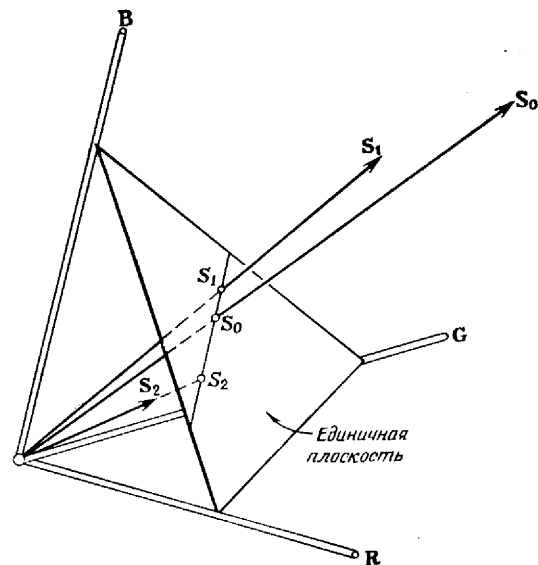


Рис. 1.15. Аддитивное смешение цветов S_1 и S_2 дает цвет S_0 .

Геометрически S_0 представляет собой сумму векторов S_1 и S_2 . Все три вектора лежат в плоскости, которая пересекает единичную плоскость трехкоординатного цветового пространства по прямой линии S_1 , S_0 , S_2 . Точки S_0 , S_1 , S_2 называются точками цветности цветов S_0 , S_1 , S_2 соответственно. Единичная плоскость носит название графика (или диаграммы) цветности.

цветности ни в коей мере нельзя рассматривать как простую. Решение задачи по определению ощущения цветности даже для одного стимула по его известной цветности связано со значительными трудностями.

Чтобы установить положение точки S на графике цветности (и тем самым определить цветность вектора S), мы вводим *координаты цветности* r , g , b (рис. 1.16). При изучении рис. 1.14 и 1.15 становится очевидным, что углы треугольника, изображенного на рис. 1.16, представляют собой пересечения осей основных цветов с единичной плоскостью. Они образуют систему отсчета на графике цветности, а их координаты цветности r , g , b задаются координатами $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ и $(0, 0, 1)$ для красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов соответственно. Координаты r ,

g , b произвольной точки S определяются как кратчайшие расстояния от S до трех сторон треугольника $(G)(B)$, $(B)(R)$ и $(R)(G)$.

Форма треугольника зависит от первоначально выбранной ориентации осей трех основных цветов в трехмерном пространстве. Мы сказали, что этот выбор может быть произвольным и, следовательно, треугольник любой формы может служить графиком цвет-

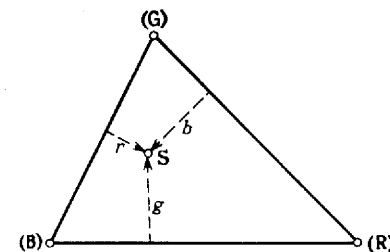


Рис. 1.16. График цветности (единичная плоскость) трехкоординатного цветового пространства.

Углы треугольника представляют собой точки цветностей (R) , (G) , (B) основных цветов R , G , B , а S является точкой цветности цвета S с координатами цветности r , g , b .

ности. У равностороннего треугольника есть преимущество симметрии по отношению ко всем трем основным цветам. Прямоугольный треугольник, используемый в настоящее время в качестве диаграммы цветности, имеет то преимущество, что его легко изобразить на обычной бумаге-миллиметровке.

Можно показать, что координаты цветности r , g , b цвета S связаны с координатами этого цвета R , G , B следующими простыми соотношениями:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B}, \\ g &= \frac{G}{R+G+B}, \\ b &= \frac{B}{R+G+B}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

откуда следует, что

$$r + g + b = 1. \quad (1.8)$$

Линейная зависимость между тремя координатами цветности, выраженная в уравнении (1.8), показывает, что для однозначного определения положения точки S на графике цветности необходимо и достаточно только двух координат (например, r и g); третья координата (b) всегда может быть найдена простым сложением первых двух и вычитанием полученной суммы из единицы.

Отрицательные координаты цвета — промежуточное звено в изложении. Определение цвета с помощью метода цветковых координат привело к возникновению нескольких полезных понятий, которые инженеры, физики, физиологи и психологи часто считали загадочными и головоломными. Одна из таких загадок заключается в появлении отрицательных чисел при определении цвета упомянутым методом. Если стимул, который при данных условиях наблюдения может восприниматься как бледный синезеленоватый, определяется цветовыми координатами $R = 3$, $G = -4$, $B = 4$, мы легко можем понять, что это означает: для воспроизведения этого конкретного цвета нужно взять 3 единицы красного основного цвета, сложить (смешать) с ними 4 единицы зеленого основного цвета и добавить к полученной смеси 4 единицы синего основного цвета. Однако, если цветовые координаты насыщенного голубого цвета оказываются равными $R = -3$, $G = 4$, $B = 4$, это, по всей видимости, означает, что для воспроизведения такого цвета требуется сложить 4 единицы синего основного цвета и 4 единицы зеленого основного цвета, после чего из полученной смеси отнять три единицы красного основного цвета. Обычно при таком подходе возникает вопрос: «Как можно вычесть три единицы красного основного цвета из смеси, в которой его вообще нет?».

С отрицательными значениями цветковых координат неизбежно приходится сталкиваться в цветной фотографии и полиграфии, а также в цветном телевидении. Любой цвет, входящий в цветовой охват конкретных основных цветов системы (например, красного, зеленого и синего), может быть определен как сумма (смесь) положительных количеств основных цветов. Цветовой охват ограничен в пространственной интерпретации тремя плоскостями ($R = 0$, $G = 0$ и $B = 0$), которые пересекаются с единичной плоскостью по прямым, образующим три стороны треугольника, показанного на рис. 1.15. Любой цвет $S(R, G, B)$ входит в этот охват, если точка его цветности $S(r, g, b)$ расположена внутри цветного треугольника на единичной плоскости. Одна или две координаты цвета (и, следовательно, одна или две координаты цветности) становятся отрицательными, как только цвет S выходит за пределы цветного охвата системы. На рис. 1.17 изображены цвет S_1 , заключенный внутри цветного охвата системы, и цвет S_2 , находящийся вне его. Для определения цветов, выходящих за пределы цветного охвата системы, необходимо использовать отрицательные значения цветковых координат. Например, в случае показанного на рис. 1.17 цвета S_2 значение координаты G отрицательно.

Такие цвета могут быть определены экспериментально, путем визуального уравнивания. Если цвет S имеет цветковые координаты $R = -3$, $G = 4$, $B = 4$, нам следует просто сложить (смешать) три единицы красного основного цвета R с этим исследуемым цве-

том S , а не добавлять R к смеси двух других основных цветов G и B . Мы найдем, что сумма $S + 3R$ уравнивает сочетание $4G + 4B$, т. е.

$$S + 3R = 4G + 4B. \quad (1.9)$$

Согласно следствию б) из законов Грассмана, которое эквивалентно арифметической аксиоме: если равные величины вычитаются из

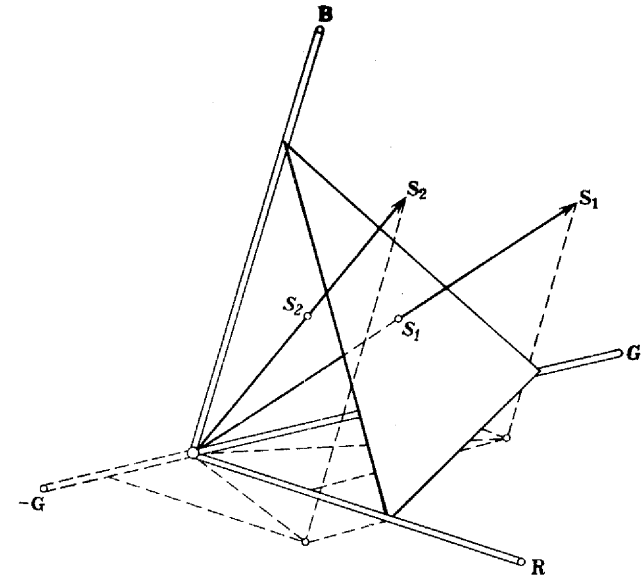


Рис. 1.17. Цветовой охват, получаемый смешением красного (R), зеленого (G) и синего (B) основных цветов.

S_1 является примером цвета, входящего в этот охват, а S_2 — примером цвета, выходящего за пределы цветного охвата системы.

равных, то и результаты вычитаний равны, мы можем записать

$$S = -3R + 4G + 4B \quad (1.10)$$

и идентифицировать величины $(-3, 4, 4)$ с соответствующими цветковыми координатами R, G, B цвета S .

Преобразование основных цветов. Не существует двух в точности одинаковых трехцветных колориметров. Некоторые из них изготавливаются разными преднамеренно; другие, предназначенные для работы в одной и той же цветовой координатной системе (с одинаковыми наборами трех основных цветов), все же могут давать при их эксплуатации систематически различающиеся результаты. Совершенно естественным поэтому является желание срав-

нить результаты, получаемые при цветовых измерениях с помощью одного трехцветного колориметра, с результатами, получаемыми при работе с другими. На основании третьего закона Грассмана, утверждающего, что цвета стимулов в их смесях можно рассматривать совершенно независимо от их спектрального состава, можно выписать формулы, показывающие, как рассчитать цветовые координаты любого цвета, которые мы получим при его измерении на одном трехцветном колориметре, по координатам того же самого цвета, определенным с помощью любого другого трехцветного колориметра с известными основными цветами.

Если установлено, что координаты какого-либо цвета в системе первой триады основных цветов равны R, G, B , то координаты того же цвета X, Y, Z в системе второй триады основных цветов будут определяться соотношениями

$$\begin{aligned} X &= X_r R + X_g G + X_b B, \\ Y &= Y_r R + Y_g G + Y_b B, \\ Z &= Z_r R + Z_g G + Z_b B, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где X_r, Y_r, Z_r — количества основных цветов второй триады, сумма которых уравнивает цвет ($R = 1, G = 0, B = 0$), X_g, Y_g, Z_g — количества тех же цветов, сумма которых уравнивает цвет ($R = 0, G = 1, B = 0$), и, наконец, X_b, Y_b, Z_b — их количества, уравнивающие в сумме цвет ($R = 0, G = 0, B = 1$). Можно увидеть, что выписанные уравнения преобразования справедливы для любого из этих трех цветов. Действительно, взяв первый основной цвет ($R = 1, G = 0, B = 0$) и приравняв нулю B и G в уравнениях (1.11), а R положив равным 1, мы получим $X = X_r, Y = Y_r, Z = Z_r$, как и предусматривалось условием. Значения цветовых координат X_r, X_g, \dots, Z_b , присутствующие в уравнениях (1.11), называются коэффициентами преобразования системы цветовых координат. Расположенные в виде таблицы чисел, насчитывающей три строки и три столбца, они образуют *матрицу преобразования* системы цветовых координат. Как только задается матрица преобразования, так однозначным образом определяется и соотношение между двумя наборами основных цветов (X, Y, Z) и (R, G, B). Система уравнений (1.11) является естественным следствием того положения, что можно взять любую сумму стимулов и рассматривать ее как отдельный стимул. Она справедлива для аддитивного смешения (сложения) любой составляющей с двумя любыми другими составляющими при условии, что можно взять сумму составляющих смеси и затем обращаться с этой суммой так, как если бы она была отдельной составляющей в другой системе. Иными словами, она представляет собой закон сложения любых трех составляющих, выраженный в терминах двух различных наборов основных цветов.

Уравнения обратного преобразования для трехкомпонентных смесей находятся решением системы уравнений (1.11) относительно R, G, B . Мы получаем

$$\begin{aligned} R &= \frac{Y_g Z_b - Y_b Z_g}{\Delta} X + \frac{X_b Z_g - X_g Z_b}{\Delta} Y + \\ &\quad + \frac{X_g Y_b - X_b Y_g}{\Delta} Z, \\ G &= \frac{Y_b Z_r - Y_r Z_b}{\Delta} X + \frac{X_r Z_b - X_b Z_r}{\Delta} Y + \\ &\quad + \frac{X_b Y_r - X_r X_b}{\Delta} Z, \\ B &= \frac{Y_r Z_g - Y_g Z_r}{\Delta} X + \frac{X_g Z_r - X_r Z_g}{\Delta} Y + \\ &\quad + \frac{X_r Y_g - X_g Y_r}{\Delta} Z, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где Δ называется *определителем* исходной матрицы преобразования и записывается как

$$\begin{aligned} \Delta &= X_r (Y_g Z_b - Y_b Z_g) + X_g (Y_b Z_r - Y_r Z_b) + \\ &\quad + X_b (Y_r Z_g - Y_g Z_r). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Матрица преобразования, определяемая системой уравнений (1.12), называется обратной по отношению к исходной матрице системы (1.11). Вид уравнений (1.12) более сложен, так как в них должно учитываться то обстоятельство, что вторая система цветовых координат может иметь три новых основных цвета, каждый из которых является трехкомпонентной смесью первого набора основных цветов. Уравнения (1.12) полезны как отправной пункт для проектирования цветовоспроизводящих элементов устройств, в которых должны вырабатываться три отдельных изображения каких-либо объектов с тем, чтобы последующее сложение трех изображений давало цветную репродукцию этих объектов. Именно на этом принципе основаны некоторые системы цветной фотографии и цветного телевидения. Но о них мы будем говорить позднее.

Остается выписать уравнения преобразования для координат цветности. Очевидно, что переход от цветовых координат R, G, B к цветовым координатам X, Y, Z с использованием (1.11) будет сопровождаться переходом от координат цветности r, g, b к координатам цветности x, y, z . Новые координаты цветности x, y, z связаны с X, Y, Z уравнениями, аналогичными (1.7): $x = X/(X + Y + Z)$, $y = Y/(X + Y + Z)$, $z = Z/(X + Y + Z)$. Эти уравнения вместе с (1.11) и (1.7) приводят к следующим уравнениям пре-

образования координат цветности:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X_r r + X_g g + X_b b}{(X_r + Y_r + Z_r) r + (X_g + Y_g + Z_g) g + (X_b + Y_b + Z_b) b}, \\ y &= \frac{Y_r r + Y_g g + Y_b b}{(X_r + Y_r + Z_r) r + (X_g + Y_g + Z_g) g + (X_b + Y_b + Z_b) b}, \\ z &= \frac{Z_r r + Z_g g + Z_b b}{(X_r + Y_r + Z_r) r + (X_g + Y_g + Z_g) g + (X_b + Y_b + Z_b) b}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Соотношения $r + g + b = 1$ (1.8) и $x + y + z = 1$ дают возможность исключить b из (1.14) и игнорировать уравнение для z . Сделав это, мы можем записать

$$x = \frac{(X_r - X_b) r + (X_g - X_b) g + X_b}{[(X_r - X_b) + (Y_r - Y_b) + (Z_r - Z_b)] r + [(X_g - X_b) + (Y_g - Y_b) + (Z_g - Z_b)] g + [X_b + Y_b + Z_b]}, \quad (1.15)$$

$$y = \frac{(Y_r - Y_b) r + (Y_g - Y_b) g + Y_b}{[(X_r - X_b) + (Y_r - Y_b) + (Z_r - Z_b)] r + [(X_g - X_b) + (Y_g - Y_b) + (Z_g - Z_b)] g + [X_b + Y_b + Z_b]}.$$

Уравнения (1.15) можно выразить в обобщенном виде:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_{11} r + a_{12} g + a_{13}}{a_{31} r + a_{32} g + a_{33}}, \\ y &= \frac{a_{21} r + a_{22} g + a_{23}}{a_{31} r + a_{32} g + a_{33}}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где коэффициенты a_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$) представляют собой символические обозначения соответствующих коэффициентов в (1.15), например $a_{12} = X_g - X_b$. Отметим, что знаменатель в уравнениях для x и y одинаков. Это является характерной чертой всех подобных преобразований, которые известны под общим наименованием проективных преобразований плоскости (в нашем случае — плоскости графика цветности).

Итак, мы убедились, что линейному (или аффинному) преобразованию трехмерного цветового пространства соответствует проективное преобразование графика цветности. Справедливо также и обратное утверждение: проективному преобразованию графика цветности соответствует аффинное преобразование трехмерного цветового пространства. Эти два типа преобразований весьма существенно отличаются один от другого типом искажений пространства или плоскости, соответственно с которыми может быть связано их существование. При проективном преобразовании (1.16) существует возможность обращения точек с конечными координатами (r, b) в точки (x, y), расположенные на бесконечности, и наоборот. За счет этого мы можем, производя простые операции,

внести очень большие искажения в какой-либо данный график цветности. Из (1.16) легко видно, что за это свойство проективных преобразований ответствен знаменатель $a_{31} r + a_{32} g + a_{33} \equiv D$, который при $D = 0$ является уравнением прямой линии в плоскости (r, g). Соответствующая ей линия в плоскости (x, y) должна находиться в бесконечности (это явно следует из условия $D = 0$). Рассмотренное свойство проективных преобразований не присуще аффинным преобразованиям (1.11), поскольку в их выражении отсутствуют величины, записываемые в виде отношения. Точки, расположенные на бесконечности, на ней же и остаются независимо от того, какие мы выберем коэффициенты преобразования; соответственно точки, лежащие в конечных (финитных) областях пространства, после преобразования всегда будут расположены в таких же областях. Однако имеется свойство, общее для аффинных и проективных преобразований: при любом из них прямые линии переходят в прямые линии.

При изучении проективных преобразований были установлены многочисленные геометрические свойства графиков цветности [716]. Многие из этих геометрических свойств имеют непосредственное отношение к психофизическому понятию цвета и зачастую помогают уяснению его смысла. Примером может служить часто кажущаяся озадачивающей интерпретация понятия точки цветности; выходящей за пределы цветового охвата, ограниченного сторонами цветового треугольника (рис. 1.15). С помощью проективных преобразований можно легко показать, что подобное расположение точки цветности не имеет никакого психофизического значения, пока речь идет о реальных цветах. Можно подобрать такие преобразования, которые превращают «внутренние» цветности во «внешние», и наоборот. Можно определить условия, позволяющие заранее выяснять, сохранит ли данное проективное преобразование все «внутренние» точки в пределах цветового треугольника [712].

В следующей главе этой книги (см. раздел о равноконтрастных графиках цветности) мы познакомимся с проективными преобразованиями, специально подбираемыми так, чтобы построить графики цветности, на которых кратчайшее расстояние между двумя точками было бы прямо пропорционально воспринимаемому различию в ощущении цветности с постоянным коэффициентом пропорциональности, независимо от расположения точек на графике.

Функции сложения цветов. В изложении проблемы зрительного цветового уравнивания мы подошли к этапу, на котором можем провести специальный эксперимент по такому уравниванию. Как мы увидим позднее, результаты этого эксперимента представляют собой психофизические данные, которые могут служить основой для построения теорий цветового зрения и создания практиче-

ского метода измерения цвета. Цель нашего специального эксперимента заключается в определении *функций сложения цветов* для наблюдателя с нормальным цветовым зрением.

Мы опять прибегнем к помощи визуального колориметра, показанного на рис. 1.12. Однако на этот раз для нас удобнее будет использовать в этом колориметре монохроматические (спектральные) цветовые стимулы. Монохроматический стимул представляет собой поток излучения в очень узком интервале $\Delta\lambda$ видимого диапазона; центр интервала (центральную длину волны) обозначим просто λ . Типичная ширина подобного интервала $\Delta\lambda$ равна 5 нм; при этом, разумеется, нас интересуют все такие интервалы, которые, будучи взятыми вместе, образуют непрерывный спектр в видимом диапазоне длин волн излучения — примерно от 380 до 770 нм. Обычно монохроматический стимул именуют просто стимулом длины волны λ , подразумевая, конечно, что эта длина волны является центральной в узком интервале длин волн $\Delta\lambda$, взятом в пределах указанного непрерывного спектра.

С помощью *монохроматора* мы получаем стимул длины волны λ . Монохроматор представляет собой оптическое устройство, разлагающее поток излучения (например, испускаемый лампой накаливания) в его спектр и дающее нам возможность выделить из этого спектра любой нужный нам узкий участок, излучение которого пропускается выходной щелью монохроматора, образуя необходимый нам цветовой стимул длины волны λ . Величина стимула измеряется, например, его энергетической яркостью, т. е. величиной потока излучения, испускаемого единицей площади (в нашем случае — площади выходной щели) в единицу телесного угла и в расчете на единичный интервал длин волн ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$). Эта величина регулируется оптическим attenuатором (ослабителем), помещенным у выходной щели монохроматора. Простым и эффективным оптическим attenuатором является клинообразный нейтральный светофильтр с высоким коэффициентом пропускания на его тонком конце, непрерывно уменьшающимся при перемещении к толстому концу, где его значение мало. Передвигая клин вдоль выходной щели, мы меняем значение энергетической яркости стимула, уменьшая или увеличивая его. Надлежащая калибровка этого так называемого фотометрического клина позволяет нам количественно точно оценивать ослабление исходного потока излучения из щели.

Для нашего визуального колориметра нам нужно четыре монохроматора: три — для получения трех основных стимулов системы цветовых координат и один — для создания испытательного стимула (тест-стимула). Монохроматоры устанавливаются вместо источников света, показанных на рис. 1.12; однако предусматривается возможность перемещения их поодиночке с одной стороны цветового поля сравнения на другую. Нам сразу же станет

ясна необходимость этого конструктивного новшества, поскольку цвет монохроматического тест-стимула часто должен быть лишен насыщенности перед цветовым уравниванием двух половинок поля. Такое состояние тест-стимула достигается добавлением к нему соответствующего стимула одного из основных цветов, с тем чтобы мы могли уравнять цвет получившейся смеси цветом подходящей смеси двух оставшихся основных стимулов. Как было показано раньше, подобный перевод одной из цветовых координат с одного поля сравнения на другое делает эту координату отрицательной.

После этих конструктивных изменений мы готовы к проведению запланированного эксперимента по уравниванию цветов. Основные стимулы устанавливаются монохроматическими излучениями с длинами волн $\lambda_R = 700,0$ нм для красного цвета (R), $\lambda_G = 546,1$ нм для зеленого (G) и $\lambda_B = 435,8$ нм для синего (B). Единицы основных цветов выбираются так, что их энергетические яркости относятся между собой примерно как $L_R : L_G : L_B = 72,1 : 1,4 : 1,0$. Этот выбор производится на основе вспомогательного эксперимента, при котором цвет смеси единичных количеств основных цветов уравнивается с цветом *равноэнергетического стимула*. Равноэнергетический стимул можно представить себе как аддитивную смесь всех монохроматических стимулов, составляющих непрерывный спектр от 380 до 770 нм, в котором каждый стимул имеет одну и ту же энергетическую яркость $L_{0\lambda}\Delta\lambda$.

Набор стимулов с длиной волны λ , составляющих при сложении равноэнергетический спектр, служит также тест-стимулом, и мы просмотрим эти стимулы один за другим, от $\lambda = 380$ нм до $\lambda = 770$ нм с интервалами $\Delta\lambda = 5$ нм. Общее число тест-стимулов равной энергетической яркости, каждый из которых испускается одним из четырех монохроматоров, составляет 79.

Производя реальное уравнивание цветов, мы вскоре обнаружим, что нет никакой необходимости поддерживать каждый тест-стимул на постоянной энергетической яркости. Например, окажется желательным повысить энергетическую яркость вблизи концов видимого спектра, чтобы обеспечить более разумную величину стимула при функционировании только дневного зрения, т. е. зрения, обусловленного механизмом работы колбочек в сетчатке. Если мы знаем энергетическую яркость тест-стимула при цветовом уравнивании, то мы легко можем рассчитать количества первичных цветов, которые будут уравнивать тест-стимул той же длины волны, но другой энергетической яркости. Чтобы сделать это, достаточно вспомнить следствие в) из законов Грассмана. Пусть $L_\lambda\Delta\lambda$ — энергетическая яркость тест-стимула при уже совершенном цветовом уравнивании, а $L_{0\lambda}\Delta\lambda$ — энергетическая яркость, при которой такого уравнивания еще необходимо достичь. Тогда количества основных цветов $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$,

т. е. цветовые координаты в первом случае, должны быть умножены на частное $L_{0\lambda}\Delta\lambda/L_{\lambda}\Delta\lambda$. В результате мы получим новые

Таблица 1.2

Функции сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, средние для наблюдателей с нормальным цветовым зрением, рассматривавших круглое поле с угловым размером в 2° . Энергетические яркости монохроматических основных цветов R (700,0 нм), G (546,1 нм), B (435,8 нм) относятся приблизительно как $L_R : L_G : L_B = 72,1 : 1,4 : 1,0$ [101].

Тест-стимул постоянной энергетической яркости на длине волны λ (нм)	Функции сложения цветов (ординаты кривых сложения, или удельные координаты)		
	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$
380	0.00003	-0.00001	0.00117
400	0.00030	-0.00014	0.01214
420	0.00211	-0.00110	0.11541
440	-0.00261	0.00149	0.31228
460	-0.02608	0.01485	0.29821
480	-0.04939	0.03914	0.14494
500	-0.07173	0.08536	0.04776
520	-0.09264	0.17468	0.01221
540	-0.03152	0.21466	0.00146
560	0.09060	0.19702	-0.00130
580	0.24526	0.13610	-0.00108
600	0.34429	0.06246	-0.00049
620	0.29708	0.01828	-0.00015
640	0.15968	0.00334	-0.00003
660	0.05932	0.00037	0.00000
680	0.01687	0.00003	0.00000
700	0.00410	0.00000	0.00000
720	0.00105	0.00000	0.00000
740	0.00025	0.00000	0.00000
760	0.00006	0.00000	0.00000

цветовые координаты $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, которые и будут координатами стимулов длины волны λ постоянной энергетической яркости $L_{0\lambda}\Delta\lambda$.

Наконец, подчеркнем еще раз, что наблюдатель следит за двумя полями сравнения той формы, которая изображена на рис. 1.12. В глазу наблюдателя угловые размеры двух полей срав-

нения составляют 2° . Эта величина является максимальной при использовании для оценки цвета только области желтого пятна. Как указывалось раньше, цвет области, окружающей поля сравнения, не сказывается на результатах уравнивания этих полей, и мы можем эту область оставить темной.

Типичные, хотя и весьма сжатые, данные по цветовому уравниванию при условиях, оговоренных выше и связанных с использованием трех фиксированных основных цветовых стимулов R (700,0 нм), G (546,1 нм) и B (435,8 нм), приведены в табл. 1.2.

В каждой строке табл. 1.2 для тест-стимула длины волны λ приведены измеренные координаты цвета $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$. Отметим, что во многих случаях одна из координат цвета отрицательна, а это указывает на то, что цветовое уравнивание фактически достигается использованием одного из основных цветов для уменьшения насыщенности цвета тест-стимула. В других случаях одна или две координаты цвета могут равняться нулю, что указывает на возможность цветового уравнивания с использованием двух или одного основного цвета соответственно.

Удельные координаты $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ монохроматических (спектральных) стимулов различных длин волн, но одной и той же энергетической яркости, взятые в совокупности, образуют, как их принято называть, *функции сложения (или смещения) цветов* по отношению к данным основным цветам R , G , B . На рис. 1.18 приведены эти функции, вычерченные в виде кривых по значениям, сведенным в табл. 1.2. Длины волн λ тест-стимулов и основных цветов отложены по оси абсцисс, а цветовые координаты (при одной и той же энергетической яркости) тест-стимулов — по оси ординат. Как и следовало ожидать, эти функции являются непрерывными и, более того, достаточно гладко непрерывными. У них есть положительные и отрицательные участки, переходы между которыми совершаются при значениях длин волн, соответствующих основным цветам.

Конкретные экспериментальные данные, приведенные выше, включают результаты, полученные Гилдом [205] и Райтом [702]. С помощью линейного преобразования они вывели функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ для стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г.

В то время как функции сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ относятся к реальным основным цветам (R при 700,0 нм, G — 546,1, B — 435,8 нм), функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ относятся к *нереальным* основным цветам X , Y , Z , т. е. физически не существующим. Нереальные основные цвета были выбраны так, чтобы облегчить колориметрические расчеты, связанные с функциями сложения цветов. Мы отмечали на рис. 1.18 и в табл. 1.2, что $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ обладают как положительными, так

и отрицательными значениями, которые доставляют некоторые неудобства при численных колориметрических расчетах и преобразованиях, с использованием функций сложения цветов.

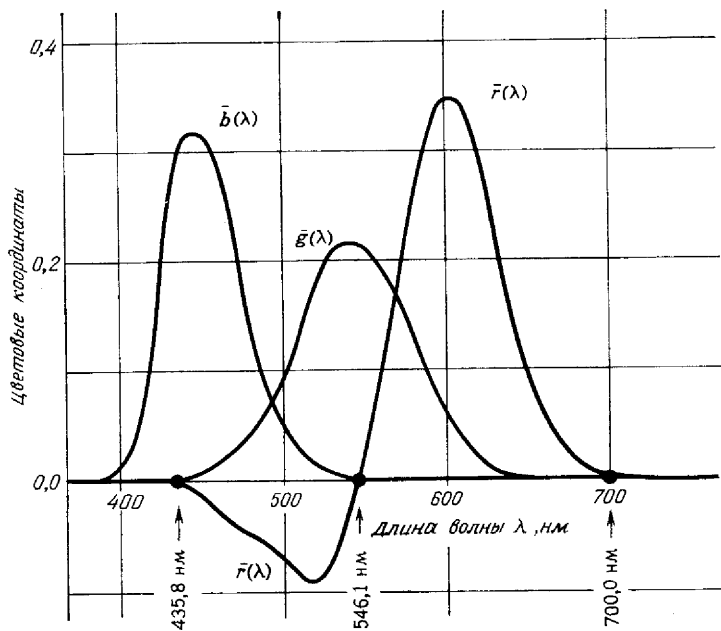


Рис. 1.18. Цветовые координаты $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ спектрально чистых стимулов различной длины волны, но одинаковой энергетической яркости (при использовании в качестве основных цветов спектральных стимулов: **R** с длиной волны 700,0 нм, **G** — 546,1 и **B** — 435,8 нм).

Единичные значения основных цветов выбраны так, что их энергетические яркости относятся как $L_R : L_G : L_B = 72,1 : 1,4 : 1,0$. Этот набор из трех координат спектральных цветов (удельных координат) $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ называют также функциями сложения цветов по отношению к данному ряду основных цветов **R**, **G**, **B**. Следует оговорить, что изображенные функции справедливы для среднего наблюдателя с нормальным цветовым зрением.

Конечно, эту нежелательную особенность функций сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ нельзя обойти в визуальных экспериментах, где необходимо использовать реальные цвета. Однако новые функции сложения, которые оказываются положительными в пределах всего видимого спектра, могут быть получены линейным преобразованием функций $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$. Имеется много таких линейных преобразований, из которых мы могли бы выбрать какое-то одно. Однако для всех из них характерно то обстоятельство, что основные цвета, к которым привязаны новые функции

сложения цветов, должны быть нереальными, и поэтому они являются лишь математическим вспомогательным средством.

МКО в 1931 г. выбрала одно конкретное линейное преобразование для перехода от функций сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ к стандартным функциям сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ не только с целью сделать эти функции $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ положительными

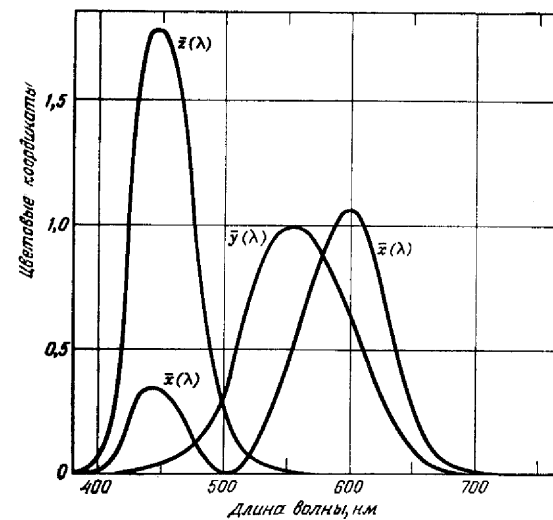


Рис. 1.19. Удельные координаты цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, полученные линейным преобразованием из удельных координат цвета $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, показанных на рис. 1.18.

Координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ выражают различные цвета через нереальные основные цвета **X**, **Y**, **Z** и определяют те свойства стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г., от которых зависит правильность уравнивания цвета.

повсюду в видимом спектре, но и использовать их некоторые другие свойства для колориметрических вычислений [314].

Подробно о выбранном линейном преобразовании можно прочитать в издании МКО 1971 г., а также в книге Вышецки и Стайлса [736], которая подытоживает экспериментальные работы Гилда [205] и Райта [702] и выражает их результаты через $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

Мы будем время от времени ссылаться на стандартные функции сложения цветов МКО 1931 г. во многих последующих разделах настоящей книги. В частности, мы встретим эти функции в разделе о *фундаментальных стандартах колориметрии*.

На нынешней стадии нашего изложения нам придется довольствоваться графическим изображением функций $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$

(рис. 1.19) и трехмерным цветовым пространством, построенным на основных цветах **X**, **Y**, **Z** (рис. 1.20 и 1.21).

На рис. 1.20 представлена геометрическая модель трехкоординатного цветового пространства, определяемого основными цветами **X**, **Y**, **Z**. Его единичную плоскость $X + Y + Z = 1$ называют графиком цветности системы МКО 1931 г. Отметим, что

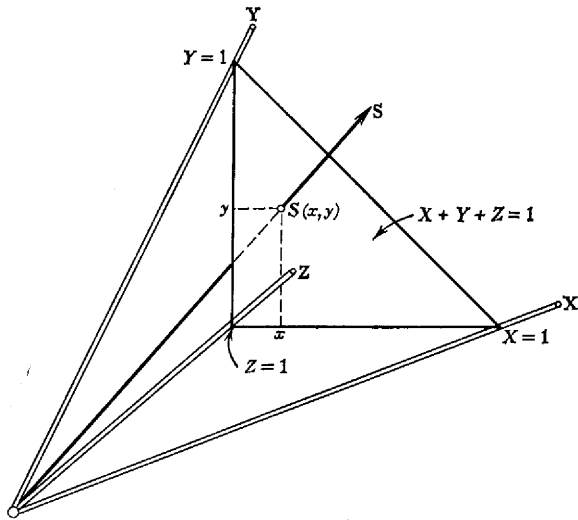


Рис. 1.20. Трехкоординатное цветовое пространство, построенное на основных цветах МКО 1931 г. **X**, **Y**, **Z**.

Ориентация осей основных цветов выбрана так, чтобы единичная плоскость ($X + Y + Z = 1$) в положительном квадранте давала прямоугольный треугольник, называемый графиком цветности. Цвет **S** пересекает единичную плоскость в точке **S**, именуемой точкой цветности; ее положение определяется координатами цветности x, y .

цветовой треугольник в этой системе является прямоугольным. Как и в трехкоординатном цветовом пространстве, построенном на основных цветах **R**, **G**, **B** (рис. 1.13—1.16), координаты цветности x, y, z в системе **X**, **Y**, **Z** связаны с цветовыми координатами X, Y, Z простыми соотношениями:

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

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

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

с очевидным условием

$$x + y + z = 1$$

На рис. 1.20 показаны прямоугольные координаты цветности x, y , выбранные таким образом, чтобы определить точку цветности **S** цвета **S**.

На рис. 1.21 представлено то же самое трехкоординатное цветовое пространство, определяемое основными цветами **X**, **Y**, **Z**. Однако на нем дополнительно показаны примеры цветов **S** (λ) монохроматических стимулов длин волн λ , причем λ , изменяясь,

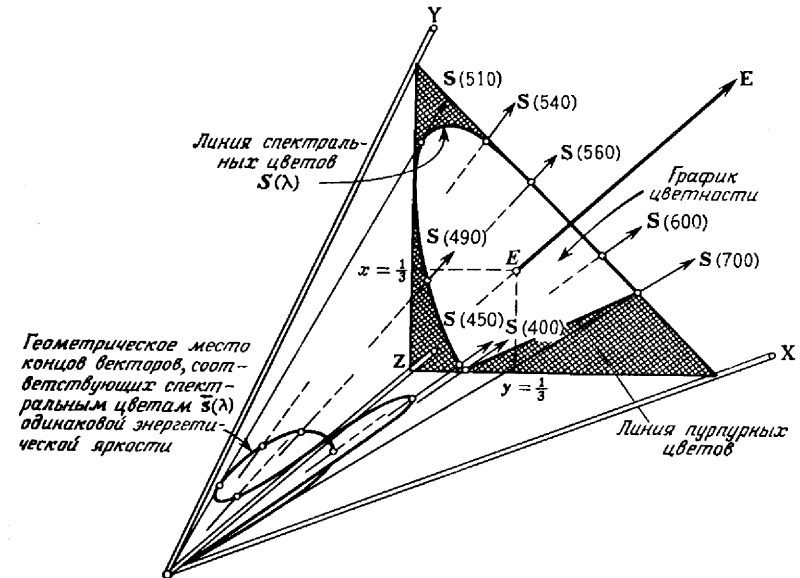


Рис. 1.21. Трехкоординатное цветовое пространство, построенное на основных цветах МКО 1931 г. **X**, **Y**, **Z**.

Показаны график цветности (x, y) и на нем линия пурпурных цветов. Кроме того, изображена линия, являющаяся геометрическим местом точек конца всех векторов **S** (λ), спектральных цветов стимулов длины волны λ и постоянной энергетической яркости. Цвет **E**, пересекающий график цветности в точке **E** ($x = y = 1/3$) представляет собой цвет равноэнергетического стимула.

принимает значения от 400 нм, что соответствует коротковолновому концу видимого спектра, до 700 нм (участок вблизи длинноволнового конца этого спектра). Точки пересечения векторов **S** (λ) с единичной плоскостью, взятые в совокупности, образуют линию, состоящую из прямой и кривой. Эту линию обычно называют *линией чистых спектральных цветов* на графике цветности. Линия спектральных цветов начинается при значении длины волны 400 нм и заканчивается при 700 нм. Точки цветности стимулов, которые мы можем получить, смешивая в различных пропорциях стимулы длин волн $\lambda = 400$ нм и $\lambda = 700$ нм, расположены на прямой линии, соединяющей точки цветности **S** (400) и **S** (700). Ее

иногда называют *линией пурпурных цветов* на графике цветности, так как *пурпурные* стимулы получают аддитивным смешением *синих* стимулов [S (400)] и *красных* [S (700)] при соблюдении обычных условий наблюдения.

Если рассмотреть монохроматические стимулы постоянной энергетической яркости на всех длинах волны λ , то цвета $s(\lambda)$ этих стимулов изображаются непрерывной совокупностью векторов, концы которых образуют в трехкоординатном цветовом пространстве кривую, начинающуюся вблизи начала координат (0) для цвета S (400) и заканчивающуюся примерно там же для цвета S (700). Составляющие каждого из этих векторов представляют собой, разумеется, удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, определенные из условия равноэнергетичности спектра и показанные на рис. 1.19.

Совокупность чистых спектральных цветов $S(\lambda)$ и различных аддитивных смесей S (400) и S (700) образует в трехкоординатном цветовом пространстве конус, внутри которого должны располагаться цвета S любых аддитивных смесей спектральных (монохроматических) цветов. Поверхность конуса представляет собой границу для всех реальных цветов. О цветах, выходящих за пределы (цветового охвата системы), часто говорят, как о *нереальных* цветах. Основные цвета системы X, Y, Z являются характерными примерами *нереальных* цветов.

Для того чтобы выяснить, относится ли данный цвет S к реальным или *нереальным* цветам, достаточно рассмотреть положение точки его цветности S на цветовом графике. Если S находится внутри области, ограниченной линиями спектральных и пурпурных цветов, либо совпадает с какой-либо точкой этих линий, то цвет S реален. Если же S расположена вне указанной области, S представляет собой *нереальный* цвет.

Координаты X, Y, Z любого реального цвета никогда не принимают отрицательных значений, так как весь конус реальных цветов целиком расположен в положительном квадранте цветового пространства, определенного основными цветами X, Y, Z. Удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ являются особым типом цветовых координат X, Y, Z только в том смысле, что они относятся к монохроматическим стимулам одинаковой энергетической яркости во всем диапазоне видимого излучения. Соответствующие цвета $s(\lambda)$ изображаются векторами, направленными вдоль образующей конуса, и представляют собой реальные цвета.

Цвет равноэнергетического стимула изображается вектором E пересекающим единичную плоскость в центре цветового треугольника; координаты его цветности одинаковы: $x_E = y_E = z_E = 1/3$. Это является естественным следствием произвольного, но целесообразно продуманного выбора единичных значений, определяющих масштабы на осях основных цветов

X, Y, Z (речь идет о выборе соотношений между этими единичными значениями). Аналогичная нормировка обычно производится в любом другом трехкоординатном цветовом пространстве, например, построенном на основных цветах R, G, B (рис. 1.14). Одно из следствий подобной нормировки заключается в том, что площади под кривыми всех трех функций сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (рис. 1.19) одинаковы.

БИСТРАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЦВЕТОВЫХ СТИМУЛОВ

Другой способ получения смеси цветов состоит в освещении наблюдаемого цветового поля меняющимися попеременно в очень быстрой последовательности то одним потоком излучения, то другим. Если смена одного цветового стимула другим происходит достаточно быстро, цвета отдельных стимулов вообще не воспринимаются; не воспринимается даже мерцание, сопутствующее такой смене. Однако воспроизводится устойчивый однородный цвет, отличающийся от цвета каждого из обоих используемых стимулов. Существует очень простое соотношение между цветом смеси и составляющими ее цветами.

Давайте проанализируем, что происходит с группой колбочек сетчатки, испытывающих такое попеременное возбуждение. Каждой колбочке требуется лишь доля секунды, чтобы отреагировать на любой стимул. Но если частота смены стимулов достаточно велика, в течение этой доли секунды колбочка испытает воздействие многих кратковременных импульсов потока излучения попеременно изменяющегося цвета. Она окажется не в состоянии реагировать на подобный пульсирующий стимул иначе, чем на однородный стимул с тем же самым средним спектральным распределением потока излучения для каждой части спектра. Поэтому соотношение будет следующим: цвет смеси попеременно сменяющих друг друга двух стимулов равен цвету их среднего по времени, причем усреднение происходит так, что вклад каждого из стимулов пропорционален времени его воздействия. Глаз увидит цвет, соответствующий однородному во времени распределению суммы двух потоков излучения.

Основываясь на третьем законе Грассмана, мы можем записать следующее правило смешения цветов во времени. Если цветовые координаты первого стимула R_1, G_1, B_1 , а координаты второго стимула в той же системе основных цветов — R_2, G_2, B_2 , то координаты цвета R, G, B, полученного в результате описанного смешения, выразятся как

$$\begin{aligned} R &= f_1 R_1 + f_2 R_2, \\ G &= f_1 G_1 + f_2 G_2, \\ B &= f_1 B_1 + f_2 B_2, \end{aligned} \quad (1.17)$$

где f_1 — доля полного времени воздействия обоих стимулов, в течение которой на сетчатку воздействует только первый стимул, а f_2 — доля этого же промежутка, в течение которой воздействует только второй стимул. Это правило отчасти напоминает закон уравнивания цветов путем аддитивного смещения стимулов, описанный ранее. Вследствие этого сходства смещение цветов посредством быстрого чередования стимулов часто неточно называют *аддитивным смещением*. Однако оно отличается от аддитивного смещения хотя бы даже тем, что f_1 и f_2 — величины, меньшие единицы ($f_1 + f_2 = 1$). Поэтому смещение при быстрой смене стимулов более правильно именуют смещением путем усреднения.

Простейший способ уравнивать неизвестный цвет с помощью усреднения цветов во времени заключается в использовании вращающегося диска, разделенного на секторы разной окраски.

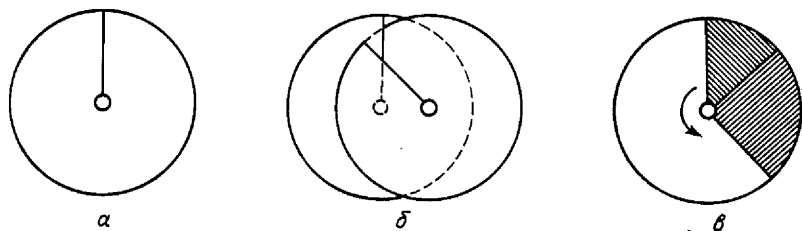


Рис. 1.22. Схема диска Максвелла, при вращении которого осуществляется смещение цветов путем усреднения во времени.

Такой диск (рис. 1.22) известен как диск Максвелла; он назван так в честь значительного вклада, сделанного Максвеллом при исследовании проблем цвета с применением этого диска [424]. Пусть образец неизвестного цвета покрывает маленький диск, а образцы трех цветов, выбранных в качестве основных (это могут быть красный, зеленый и синий) закреплены на секторах другого диска, например ограничены щелями, прорезанными вдоль его радиусов. Второй диск должен быть совершенно черным, с тем чтобы он не отражал никакого света в глаз наблюдателя. При выполнении этих условий мы получаем необходимые составные части трехцветного колориметра. Наблюдатель должен менять относительные размеры красного, зеленого, синего и черного секторов до тех пор, пока при вращении второго диска не будет достигнуто уравнивание неизвестного цвета. Если эти относительные размеры равны f_r , f_g и f_b (например, каждый из них определяется отношением угла, занимаемого соответствующим сектором, к 360°), то неизвестный цвет может быть полностью определен набором чисел f_r , f_g и f_b . Фактически эти числа представляют собой координаты измеряемого цвета в системе основных цветов, закреплен-

ных на секторах вращающегося диска (красного, зеленого, синего). Отметим, однако, что сумма трех таких чисел не равна единице, поскольку имеется еще и черный сектор.

Иногда задают вопрос: «Почему используется четырехкомпонентная смесь, получаемая вращением разделенного на секторы диска, для определения цвета, который для нормального наблюдателя есть величина трехмерная?». Ответ заключается в том, что переменные (f_1, f_2, f_3, f_4), регулируемые наблюдателем, не являются независимыми. Когда наблюдатель выбирает три из них, он тем самым фиксирует четвертую, которая равна остатку от 360° . Поэтому четыре сектора дают только три степени свободы.

При рассматривании удаленного объекта, состоящего из отдельных деталей, имеет место именно стимуляция фоторецепторов глаза быстро сменяющейся последовательностью цветовых стимулов. Механизмом, ответственным за это, служат мелкомасштабные произвольные движения глаз (тремор). На каждую колбочку сетчатки воздействует последовательность различных стимулов, и колбочка реагирует восприятием цвета, усредненного по времени. Дерево, расположенное слишком далеко, чтобы можно было различить каждый его отдельный лист, воспринимается как совокупность некоторого количества участков разного цвета, являющегося усреднением по цвету окраски еще более мелких участков. Одни из этих участков, на которых листья хорошо освещены, имеют яркий цвет, другие, находящиеся в тени, — темный. Если элементы объекта столь малы, что их изображения проектируются каждое на одну-единственную колбочку совершенно неподвижного глаза (в этом случае в глаз попадает постоянный, а не непрерывно меняющийся стимул), воспринимаемый однородный цвет есть усреднение цветов неразрешаемых глазом элементов; таким образом, и здесь справедлив тот же самый закон. Художники используют этот тип смещения цветов, создавая мозаики и картины в стиле пуантилизма (на них наносят группы маленьких, расположенных очень близко одна от другой, точек или пятнышек разного цвета; на некотором удалении они воспринимаются как целостные цветные изображения). В полиграфии на этом принципе основана полутоновая печать.

В кино в глаз зрителя каждую секунду попадает 24 ярких изображения, разделенных темными промежутками, примерно равными длительности воздействия яркого изображения. Воспринимаемые устойчивые цвета представляют собой усреднения по времени яркой картины и темного интервала. Таким образом, поток излучения, попадающий в глаз кинозрителя при движении ленты в кинопроекторе, приблизительно равен половине потока излучения, попадающего в глаз при остановке ленты и проецировании на экран неподвижного кадра. В черно-белом телевидении каждый точечный элемент изображения вспыхивает 30 раз в секунду,

а разделяющие эти вспышки темные промежутки времени примерно в 1000 раз больше времени вспышки. В результате поток излучения от экрана телевизора составляет менее одной тысячной потока излучения, который может испускаться участком экрана, возбуждаемого сканирующим электронным лучом. Таким образом, воспроизведение цвета путем быстрой смены последовательности стимулов является частью нашей повседневной жизни, особенно тогда мы смотрим на то, что создали для собственного удовольствия. Покупка и продажа устройств, воспроизводящих цвет подобным образом, составляет существенную часть нашей торговли.

СМЕШИВАНИЕ КРАСИТЕЛЕЙ

Когда потребитель вручает изготовителю образец цвета и просит о том, чтобы изделие (бумага, пластмасса, ткань, окрашенное изделие и т. д.) имело точно такой же цвет, изготовитель почти всегда вынужден прибегать к смешиванию красителей. Обычно он располагает набором окрашивающих веществ, ни один из которых не дает нужного цвета. Поэтому он выбирает краску (пигмент или краситель), придающий изделию цвет, наиболее близкий к требуемому, и затем добавляет небольшие количества одной или двух других красок с целью получить требуемый цвет. Если необходимо окрасить бумагу или ткань, он смешает в красильной ванне две или больше красок, регулируя их относительные количества так, чтобы цвет смеси был тождествен заданному или хотя бы был приемлемо близок к нему. Аналогичным образом для поставок пластмассы или краски затребованного потребителем цвета изготовитель, как правило, должен приготовить смесь из находящихся в его распоряжении красок. В общем случае поток света, попадающий на изделия перечисленных типов, претерпевает сложные превращения. Часть света, попадая на частицу пигмента или окрашенную нить, поглощается; другая часть рассеивается. Рассеянный свет затем падает на другие частицы пигмента; весь процесс повторяется вновь до тех пор, пока становится невозможным проследить, что же происходит с каким-либо отдельным элементом падающего пучка света. Однако физики разработали методы, помогающие изготавливать смеси красок так, чтобы они создавали требуемый цвет. Эти сложные, но важные методы рассматриваются в последней главе книги.

АНОМАЛИИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

До сих пор предполагалось, что наблюдатель обладает нормальным цветовым зрением, и мы убедились, что нормальное цветовое зрение трехмерно. Для наблюдателя с таким зрением цвет

может быть определен утверждением, что он тождествен трехкомпонентной смеси, например смеси трех количеств (потоков излучения) красного, зеленого и синего цветов. Поэтому говорят, что у нормального наблюдателя зрение трихроматично, а его самого называют трихроматом. Такие наблюдатели могут значительно отличаться один от другого по своей способности оценивать тонкие цветовые отличия, но это — разница в степени, а не типе цветоразличения. Другие люди с рождения совершенно неспособны различать цвета, разница между которыми очевидна для наблюдателя с нормальным цветовым зрением. В этих случаях говорят о врожденной цветовой слепоте. Существуют люди, цветовое зрение которых повреждено в результате воспаления сетчатки или зрительного нерва. Принято говорить, что у них — приобретенная цветовая слепота. Если цветно-слепой наблюдатель может уравнивать все цвета, которые он способен воспринимать, смещением всего лишь двух разных цветовых стимулов, его называют частично цветно-слепым. Его зрительная система отличается от нормальной трихроматичной; ее называют дихроматичной, а самого такого наблюдателя — дихроматом. Экспериментально было установлено, что дихроматы считают правильными уравнивания цветов, произведенные нормальными наблюдателями с такой же, как у них, пигментацией хрусталика и желтого пятна, и вдобавок они оценивают, как равные, цвета, резко отличающиеся один от другого для нормального глаза. Есть еще одна группа людей, считающих равными стимулы любого цвета, если только равны их яркости. Зрение подобных наблюдателей именуют монохроматичным, а их самих — монохроматами. Наконец, имеются люди, которым для уравнивания воспринимаемых ими цветов необходимы смеси трех стимулов, однако в большинстве случаев равенство цветов, установленное наблюдателем с нормальным цветовым зрением, представляется им несоблюденным, причем это обстоятельство невозможно объяснить допущением о необычно сильной или слабой пигментации хрусталика и желтого пятна. Таких людей называют *аномальными трихроматами*.

Аномалии цветового зрения у наблюдателей распознаются главным образом по ошибкам, которые эти наблюдатели совершают при уравнивании цветов. Разумеется речь идет об ошибках с точки зрения наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Однако, как ни парадоксально, может показаться, что у нас есть относительно надежное представление о цветах, воспринимаемых цветно-слепыми наблюдателями. Подобная информация поступает в основном в результате обследования тех немногих наблюдателей, у которых один глаз нормален, а второй воспринимает цвет аномально [110, 191, 331, 609].

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Удобный способ характеристики любого типа зрительной системы заключается в описании того, каким представляется равноэнергетический спектр наблюдателю с данным типом зрительной системы. Равноэнергетический спектр характеризуется одинаковым спектральным распределением энергии цветового стимула в пределах всего видимого диапазона. Каждый стимул, воздействующий на глаз, есть либо часть этого спектра, либо может рассматриваться как сочетание некоторого числа таких частей. Поэтому описание восприятия равноэнергетического спектра представляет собой в то же время достаточно полное описание свойств зрительной системы, обуславливающей это восприятие.

Нормальная трихроматия. Для наблюдателя с нормальным зрением видимый спектр в широком диапазоне потоков излучения представляется последовательностью чистых спектральных цветов — от темно-красного через ярко-красный, оранжевый, желтый, яркий желто-зеленый, зеленый, синий до темно-фиолетового. При обычных условиях наблюдения (адаптации зрения к дневному свету) наиболее яркая часть равноэнергетического спектра приходится на участок длин волн от 540 до 570 нм (желтовато-зеленый), а от центральной точки этого интервала (в среднем 555 нм) яркость понижается как в сторону более длинных, так и в сторону более коротких волн. Эти изменения яркости коррелируют с функцией световой эффективности нормального глаза, максимум которой приходится на длину волны 555 нм (рис. 1.12, колбочки). Поскольку цветовое зрение нормального глаза трихроматично, он способен регистрировать три типа цветовых различий. Удобно классифицировать эти различия следующим образом: светлое — темное, желтое — синее и красное — зеленое. Другими словами, нормальный наблюдатель способен отличить цвета темного объекта от цветов светлого, желтоватые цвета от синеватых и зеленоватые от красноватых. Например, он может отличить зеленовато-серые от красновато-серых, зеленовато-желтые от красновато-желтых, голубые от красновато-синих; все эти примеры характеризуют различие красного и зеленого.

Аномальная трихроматия. Трихроматы, для которых нормальные цветовые уравнивания неприемлемы, как бы сильно или слабо ни был пигментирован нормальный глаз, разделяются главным образом на два основных типа, именуемых протаномальными и дейтераномальными. По отношению к способности различать цвета наблюдатели этих двух типов занимают промежуточное положение между нормальными трихроматами и дихроматами — протанопами и дейтеранопами соответственно, о которых речь

пойдет несколько ниже. Аномальный трихромат с большей или меньшей трудностью различает цвета, между которыми соответствующий дихромат не видит никакой разницы вообще. Однако оценить степень повреждения чувствительности к различению цветов у аномального трихромата (по сравнению с нормальным)

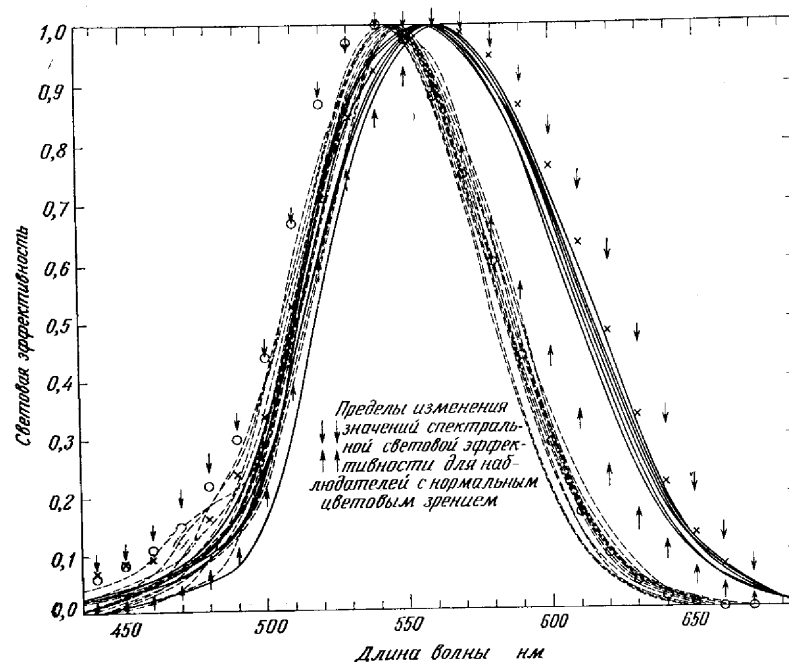


Рис. 1.23. Функции относительной спектральной световой эффективности нормальных наблюдателей и наблюдателей с аномалиями цветового зрения [329].

— — — данные обследования двенадцати протаномальных наблюдателей (Нелсон, Маккиан и Райт); — — — данные обследования шести дейтераномальных наблюдателей (Нелсон); O результаты усреднения данных по шести наблюдателям-протанопам; X результаты усреднения по шести наблюдателям-дейтеранопам [329]. Отметим, что функции световой эффективности дейтеранопов и дейтераномальных трихроматов хорошо укладываются в обозначенные стрелками пределы изменчивости подобных функций для нормальных наблюдателей (Гибсон и Тиндалл), в то время как функции, характеризующие протанопов и протаномальных трихроматов, значительно ниже нормы на длинноволновом участке спектра. Все кривые нормализованы так, что их максимальные значения равны единице.

невозможно, и корреляция между зрительными восприятиями аномального трихромата и соответствующего дихромата низка. Такое повреждение необходимо измерять индивидуально в каждом отдельном случае. Более того, функция спектральной световой эффективности наблюдателей с протаномальной любой степени выглядит так, как если бы они были вообще лишены чувствительности в длинноволновом конце видимого спектра (рис. 1.23).

С другой стороны, функция спектральной световой эффективности наблюдателей с дейтераномальным зрением расположена целиком внутри допустимых пределов изменения этой функции наблюдателей с нормальным трихроматическим зрением.

Дихромазия. Наблюдатели-дихроматы способны к цветоразличению только двух типов — одного ахроматического (светлое — темное) и одного хроматического (либо желтое — синее, либо красное — зеленое, обычно первого из них).

Спектр видимого излучения для наблюдателя с цветовой слепотой, при которой невозможно цветоразличение красное — зеленое, представляется имеющим только два цветовых тона: коротковолновый конец спектра кажется синим, длинноволновый — желтым. Эти два участка спектра разделены областью с центром на длине волны ~ 495 нм. Излучение такой длины волны представляется наблюдателю-дихромату указанного типа не имеющим какого-либо цветового тона вообще, наподобие дневного света, и длина волны 495 нм носит название *нейтральной точки*. Насыщенность цвета повышается от нуля на нейтральной точке как к длинноволновому, так и к коротковолновому концам спектра. Разумеется, для наблюдателя с этим типом дихромазии яркость цветов равноэнергетического спектра снижается по мере приближения к концам спектра, как это имеет место и для наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Существует два подтипа этого вида цветовой слепоты; для одного характерна ненормально низкая спектральная световая эффективность на длинноволновом участке спектра, для другого она не отличается существенно от нормы.

Цветовая слепота с ненормально низкой спектральной чувствительностью на длинноволновом конце спектра, при которой не различаются красные и зеленые цвета, называется *протанопией*. Длина волны, излучение которой дает при протанопии ощущение наиболее яркого цвета, расположена вблизи 540 нм, что вполне определено, хотя и не очень сильно, выходит за пределы нормы. Протаноп путает красный и голубой цвета с серым и с друг с другом.

Цветовая слепота на различение красный — зеленый второго из упомянутых подтипов (по существу с нормальной функцией спектральной световой эффективности) называется *дейтеранопией*. Существует ряд данных, которые свидетельствуют, что функция спектральной световой эффективности среднего дейтеранопа даже слегка превышает нормальную на длинноволновом участке спектра (рис. 1.23). В среднем для дейтеранопа наиболее ярким воспринимается цвет излучения с длиной волны ~ 560 нм. Дейтераноп путает пурпурно-красный и зеленый цвета с серым и друг с другом.

Дихроматическое зрение может также состоять в неразличении желтых и синих цветов (более точно, зеленовато-желтых и пур-

пурно-синих). Этот тип дихромазии называется *тританопией*. Функция спектральной световой эффективности у тританопа нормальна, или почти нормальна, с возможным незначительным отклонением от нормы на коротковолновом конце спектра, которое трудно отделить от эффекта сверхвысокой пигментированности хрусталика и желтого пятна. Цвета видимого спектра представляются тританопу красными на длинноволновом конце и становятся все более и более сероватыми по мере приближения к нейтральной точке (на длине волны ~ 570 нм). От нейтральной точки к коротковолновому концу спектра воспринимаемый им цветовой тон — это зеленый или голубой, насыщенность которого возрастает до длины волны примерно 470 нм, после чего резко понижается до нуля на самом конце спектра. У некоторых тританопов имеется вторая нейтральная точка вблизи коротковолнового конца (430 нм и менее); их иногда называют *тетранопами*. Другие тританопы воспринимают зеленый или голубой цвет понижающейся насыщенности до самой меньшей длины волны, на которой они еще могут хоть что-нибудь видеть. Тританоп путает синеvато-пурпурный и зеленоvато-желтый цвета друг с другом и с серым цветом. Тританопия часто бывает результатом воспаления или отслоения сетчатки, но редко — врожденной.

Для получения функций сложения цветов дихроматов из функций нормального трихромата могут быть привлечены теории цветового зрения, обсуждением которых мы займемся ниже. Используемая при этом математическая процедура сложна, и заинтересованного читателя мы отсылаем к работе [736].

Монохромазия. Полностью цвето-слепой наблюдатель в состоянии совершать лишь один тип цветоразличения — светлое — темное; никакие хроматические цветоразличения для него невозможны. Воспринимаемый им видимый спектр имеет не одну или две нейтральных точки, он целиком нейтрален. Поэтому монохромазию часто называют еще *ахроматопсией*, или *ахроматопией*. Монохромазия может возникнуть из-за неправильного развития колбочек сетчатки. Обусловленный этим фактором вид монохромазии именуется либо колбочковой слепотой, либо врожденной полной цветовой слепотой. Для зрения монохроматов, страдающих такой слепотой, в любое время суток характерно наличие центральной скотомы (темного пятна в поле зрения), обычное для нормального сумеречного зрения. Кроме того, у них проявляется тенденция к фотофобии (страху света), характерной для сов и нормальных адаптированных к темноте наблюдателей. В основе ее лежат попытки использовать палочковое зрение для рассматривания слишком ярких объектов зрения. Наблюдателей с этим видом монохромазии объединяют также низкая острота зрения и нистагм, т. е. непрерывное круговое движение глазного яблока как бы

Таблица 1.3

Классификация и характеристики различных зрительных систем

Обозначение системы в соответствии с числом различаемых компонент	Цветовые различения, возможные при подобном типе системы	Длина волны, при которой функция спектральной световой эффективности максимальна, нм	Длины волн нейтральных точек в видимом спектре, нм	Употребительное наименование зрительной системы
Трихромазия	Светлое — темное Желтое — синее Красное — зеленое	555	Отсутствуют	Нормальная система
	Светлое — темное Желтое — синее Красное — зеленое (слабо)	540	Отсутствуют	Протаномалия
	Светлое — темное Желтое — синее Красное — зеленое (слабо)	560	Отсутствуют	Дейтераномалия
Дихромазия (частичная цветовая слепота)	Светлое — темное Желтое — синее	540	493	Протанопия
	Светлое — темное Желтое — синее	560	497	Дейтеранопия
	Светлое — темное Красное — зеленое	560	572	Тританопия
Монохромазия (полная цветовая слепота)	Светлое — темное	510	Все	Врожденная цветовая слепота (колбочковая слепота)
	Светлое — темное	560	Все	Приобретенная цветовая слепота

в попытке компенсировать пониженную остроту зрения за счет попеременного использования периферийных участков сетчатки, расположенных по разные стороны центральной слепой области. Функция спектральной световой эффективности наблюдателя с колбочковой слепотой такая же, как и у нормального наблюдателя, адаптированного к темноте. По сравнению с нормой его функция спектральной световой эффективности сильно понижена на длинноволновом конце спектра и имеет максимум при 510 нм (рис. 1.2, палочки) вместо 555 нм.

Менее распространенной причиной монохромазии является воспаление зрительного нерва. Для обусловленной им монохромазии в отличие от колбочковой слепоты характерны нормальная острота зрения, хорошее зрение в области желтого пятна и нормальная функция спектральной световой эффективности с максимумом на длине волны ~560 нм.

В табл. 1.3 приведены классификация и характеристики основных типов цветового зрения. Более подробное рассмотрение этой темы читатель может найти в работе [278].

ПРИЧИНЫ ЦВЕТОВОЙ СЛЕПОТЫ

Человек, у которого цветовое зрение существенно отличается от нормального, лишен многого в современном мире. Он не может правильно и надежно реагировать на цветовые сигналы (на улице, на железной дороге, в море, в воздухе); он не извлекает полных преимуществ из способов цветовой маркировки (рабочая одежда, телефонные провода, предупредительные знаки на производстве, идентификация назначения радиодеталей при их сборке и т. д.); многие профессии (химик, хирург, контролер цвета готовых изделий, художник-дизайнер по интерьеру, летчик и даже бухгалтер) либо чересчур опасны для него, либо ставят его в намного худшее (по сравнению с коллегами) положение. Он представляет собой одновременно и проблему, и возможность при деловых начинаниях: проблему, потому что предприниматель не может поручить ему задания, которые он не в состоянии выполнить; возможность, потому что у него есть особые нужды и в совокупности подобные ему люди образуют выделенную группу потребителей, нужды которых до сих пор успешно не удовлетворялись. И для предпринимателя, и для самого человека с аномалией цветового зрения на важнейший вопрос: «Можно ли излечить цветовую слепоту?» — отвечают: «И да, и нет».

Врожденная цветовая слепота. Все виды цветового зрения, перечисленные в табл. 1.3 (кроме последнего) были обнаружены у людей, не перенесших до этого болезней глаз или зрительного нерва. Поэтому их следует рассматривать как врожденные дефекты

зрения. Неразличение или неверная идентификация красного и зеленого цветов (протанопия и протаномалия; дейтеранопия и дейтераномалия) известны как дефекты, обусловленные наследственностью, связанной с полом родителей [298]. Мать, сама обладающая нормальным цветовым зрением, может иметь в своем генетическом аппарате скрытые причины этих дефектов и передать дефекты своим сыновьям, у которых они проявляются. Однако дочери такой женщины, при условии, что у их отца нормальное цветовое зрение, имеют нормальное цветовое зрение, либо сами становятся носителями перечисленных дефектов. Цветно-слепые дочери появляются в результате брачного союза цветно-слепого мужчины с женщиной, которая является скрытой носительницей того же самого дефекта, или же в случае, когда оба родителя имеют дефект цветового зрения одного и того же типа (либо прото-форма, либо дейтеро-форма). Поэтому врожденная цветовая слепота гораздо чаще встречается среди мужчин, чем среди женщин. Это убедительно подтверждает табл. 1.4, отражающая результаты обследо-

Таблица 1.4

Распределение врожденной цветовой слепоты по ее типам

Типы дефектов	Процент людей, имеющих указанные дефекты	
	мужчины	женщины
Протаномалия	1,0	0,02
Дейтераномалия	4,9	0,38
Протанопия	1,0	0,02
Дейтеранопия	1,1	0,01
Тританопия	0,002	0,001
Врожденная полная цветовая слепота	0,003	0,002

дования 5 000 школьников фон Плантой [531] и 18 000 школьников Ваалером [673]. В ходе подобных обследований было установлено, что дефекты цветового зрения обнаруживаются в среднем у 8% мальчиков, в то время как среди девочек соответствующая цифра составляет менее 0,5%. Из факта, что 8% сыновей путают красный и зеленый цвета, следует, что ~16% всех матерей являются скрытыми носительницами дефектов, ответственных за подобное неразличение. Опубликованные данные различных исследователей о процентных соотношениях встречаемости прото-формы и дейтеро-формы врожденной частичной цветовой слепоты довольно хорошо согласуются между собой [255].

Врожденная полная цветовая слепота встречается среди женщин не намного чаще, чем среди мужчин. Ее рассматривают как

особенность, которая часто наблюдается у людей, чьи родители были связаны близким кровным родством. Однако из табл. 1.4 видно, что полная цветовая слепота представляет собой случай, намного более редкий, чем частичная цветовая слепота.

Врожденная тританопия встречается еще реже. Соответствующее процентное соотношение, приведенное в табл. 1.4, взято из работы Райта [707]. Этому редкому случаю врожденной цветовой слепоты в последние годы уделялось значительное внимание по мере того, как обнаруживалось и обследовалось все больше людей с таким дефектом [107, 248, 682].

Попытки излечить врожденные дефекты цветового зрения предпринимались часто, начиная с 1870 г. Из числа применявшихся способов лечения упомянем о нагревании глаз с помощью горячих компрессов, назначении массивных доз различных витаминов, облучении глаз красным и зеленым светом и о цветовой тренировке, основанной на идентификации предъявляемых окрашенных образцов, а также на назывании цветов. Сообщалось о некоторых случаях исцеления. Мы обсудим подобные сообщения ниже в связи с описанием тестов, служащих для проверки правильности цветовых восприятий. Но пока скажем, что достоверность исцеления не была подтверждена ни в одном случае. По-видимому, убедить глаза развить способность воспринимать цвет, если эта способность не была запрограммирована в хромосомах в момент зачатия, столь же трудно, как с помощью какого-либо подходящего лечения убедить собаку превратиться в кошку. Для коррекции недостатков зрения аномальных трихроматов предлагали носить окрашенные фильтры в виде защитных очков [355]; однако другие исследователи показали, что такая коррекция невозможна [373, 710]. Поэтому на вопрос: «Можно ли излечить врожденные аномалии цветового зрения?» — следует категоричный отрицательный ответ.

Приобретенная цветовая слепота. Дефект цветового восприятия в центре или на периферии поля зрения может возникнуть в результате любого заболевания, затрагивающего сетчатку, зрительный нерв или зрительные центры в коре затылочной части мозга. Наиболее распространенной болезнью центральной нервной системы, вызывающей дефекты цветовосприятия в центре поля зрения, является рассеянный склероз. Его последствия включают искажения восприятия формы объектов. Несколько генерализованных (захватывающих весь организм) неинфекционных заболеваний вызывают неврит зрительного нерва с сопутствующей ему потерей способности различения цвета и формы. Наиболее распространенными являются изменения нормального состава крови (злокачественное малокровие и вторичная анемия, или лейкемия) и болезни, связанные с нарушением нормального обмена веществ, в том числе авитаминозы (недостаточность витамина B₁, диабетичес-

ческая амблиопия и неврит зрительного нерва во время беременности). Дефекты в цветовом восприятии, которые иногда возникают в результате ушибов головы, вероятно, обусловлены либо подобным невритом зрительного нерва, либо повреждениями зрительных центров коры головного мозга. Наиболее частое возникновение дефектов цветового восприятия за счет прекращения нормального функционирования колбочек в центре сетчатки связано с токсической амблиопией (резким снижением остроты зрения) и отравлением ядами, действие которых избирательно проявляется в угнетении цветовой чувствительности центра сетчатки (в противоположность более обычным дефектам цветоразличения на периферии сетчатки). К таким ядам относятся:

Дисульфид углерода. Используется при изготовлении волокон, резины, взрывчатых веществ, инсектицидов, обоев, а также при выделке кожи и обработке шкур.

Свинец. Свинцовое отравление обнаруживается среди маляров, водопроводчиков, клепальщиков, рабочих, изготавливающих и восстанавливающих аккумуляторы, и типографских наборщиков.

Вещества, применяемые при обезболивании путем введения в спинномозговую жидкость.

Сульфаниламиды. Могут вызывать неврит зрительного нерва или кровоизлияния в зрительный нерв.

Нюхательный табак, иодоформ и страмоний. Случаи редки.

Таллий. Используется в промышленности как крысиный яд и как депилаторий.

Табак — алкоголь. Сочетания, намного чаще других веществ вызывающие нарушение зрения.

Стало уже классическим предположение, что токсические вещества и заболевания, воздействующие на передающие элементы зрительного механизма (слой нервных волокон сетчатки, зрительный нерв и зрительный тракт), понижают способность к различению красного и зеленого цветов. В этих случаях результатом воздействия является не аномальная трихромазия (дейтераномалия) в том смысле, что нормальное цветовое уравнивание становится невозможным, а ошибки в определении цвета, которые имеют сходный характер. Приобретенное понижение способности к различению красное — зеленое сопровождается также снижением по сравнению с нормой остроты зрения и способности отличать желтый цвет от синего и светлый тон от темного. Этот дефект с течением времени прогрессирует до тех пор,

пока в конечном счете не превращается в дейтеранопическую форму цветовой слепоты (полное неразличение красного и зеленого цветов). Однако этот дефект отличается от врожденной дейтеранопии тем, что сопровождается понижением как остроты зрения, так и способности к различениям желтое — синее, светлое — темное. Если имеет место продолжительное отравление или заболевание, наступает полная цветовая слепота.

Точные характеристики процесса, проходящего через стадию приобретенного снижения способности отличать красный цвет от зеленого, стадию дейтеранопии и заканчивающегося полной цветовой слепотой, недостаточно хорошо изучены, поскольку состояние зрительной системы пациента ежедневно меняется. Поэтому для обозначения симптомов воспаления зрительного нерва часто используют наименование «прогрессирующая цветовая слепота с неразличением красного и зеленого цветов».

С другой стороны, повреждения (например, вызываемые сифилитической инфекцией), которые затрагивают в первую очередь рецепторный механизм (колбочки), вначале вызывают снижение способности к различению желтого и синего цветов. В случаях отслоения сетчатки от сосудистой оболочки это наблюдается всегда. Приобретенная тританопия в противоположность приобретенной неспособности отличать красный цвет от зеленого может стабилизироваться. Тогда ее можно отделить от врожденной тританопии главным образом по воспоминаниям больного о испытывавшимся им ранее ощущениям желтого и синего цветов. Возможен также случай ее локализации, когда тританопичным становится лишь малый участок сетчатки, в то время как вся остальная часть сетчатки остается нормальной. Приобретенная тританопия ведет к полной цветовой слепоте лишь тогда, когда вслед за ней возникает прогрессирующая цветовая слепота с неразличением красного и зеленого цветов. Однако последняя, как было указано выше, может и сама по себе привести к полной цветовой слепоте.

Определенных методов лечения приобретенной цветовой слепоты не существует, поскольку она является лишь симптомом какого-то заболевания. Лечение направлено на устранение причины. Нормальное зрение восстанавливается обычно постепенно, причем порядок следования стадий выздоровления обратен тому, который характеризует развитие основного заболевания. Поэтому на вопрос: «Можно ли излечить приобретенную цветовую слепоту?» — квалифицированно отвечают: «Да». Иными словами, иногда подобное повреждение нормального зрения бывает незначительным и временным; в других случаях оно остается необратимым. Более подробный обзор проблем, связанных с приобретенной цветовой слепотой, дан Грютцнером [202].

ТИПЫ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО ГЛАЗА

Подчеркнув еще раз, что зрение человека с нормальными глазами трихроматично только при обычных условиях наблюдения, перечислим обстоятельства, при которых нормальные глаза становятся частично или полностью цвето-слепыми.

Зрительное восприятие нецентральных участками сетчатки.

Зрительное восприятие на участках сетчатки, несколько удаленных от желтого пятна, сходно как с дейтераномалией, так и с ранними стадиями прогрессирующей цветовой слепоты с неразличением красного и зеленого цветов. Оно характеризуется гораздо более низкой способностью к цветоразличению красное — зеленое, чем к различениям желтое — синее и темное — светлое, хотя способности к этим различениям также значительно уменьшаются по сравнению с центральным зрением. Зрительное восприятие в зоне сетчатки, еще более близкой к ее периферии (удаленной по углу примерно на 25—40° от желтого пятна) дихроматично. На крайней периферии сетчатки (более чем 40° от желтого пятна) зрительное восприятие по типу весьма сходно с полной цветовой слепотой. Однако границы между трихроматичной, дихроматичной и монохроматичной зонами нормальной сетчатки не резки и не фиксированы. Их точное положение зависит от яркости цветового поля, используемого при обследовании, и окружающей его поверхности, а также от размеров этого поля [450].

Недостаточные размеры наблюдаемых объектов. Площадку заданной яркости, воспринимаемую желтым пятном и окружающей его (парафовеальной) областью сетчатки, можно так уменьшить в размерах, что становятся невозможными цветоразличения типа желтое — синее, хотя различения красное — зеленое и темное — светлое могут производиться все еще достаточно легко. Измерения показали, что при размерах наблюдаемых полей ~15' в поперечнике нормальная сетчатка реагирует подобно тританопическому глазу [709]. Частично этот эффект резкого снижения способности различать цвета малых наблюдаемых полей (в особенности цвета в области спектра от синего до зеленого) может быть объяснен механизмом локальной адаптации. Наиболее сильное снижение способности к цветоразличению происходит тогда, когда наблюдатель смотрит на цветовое поле малых размеров в течение длительного времени [32, 426]. Дальнейшее уменьшение наблюдаемой площадки приводит к невозможности отличать даже красный цвет от зеленого, хотя способность к различению светлое — темное все еще сохраняется. Для наблюдаемых цветовых полей указанных размеров трихроматичная область желтого пятна и парафовеаль-

ная становится монохроматичными, как в случае полной цветовой слепоты. Это подчеркивает трудность выбора цветовых сигналов, предназначенных для восприятия на больших расстояниях, и объясняет преимущественное использование красного и зеленого цветов в сигнальных огнях. При обычных расстояниях, на которых подаются цветовые сигналы, синий и зеленый сигнальные огни малой интенсивности воспринимаются очень похожими друг на друга, а фиолетовый и зеленовато-желтый — совершенно не различимыми. Это обстоятельство в достаточной степени объясняет тот факт, что для сигнализации на большие расстояния синий и фиолетовый цвета вообще не применяются.

Недостаточная яркость. Нормальный адаптированный к темноте глаз реагирует на слабые стимулы во всех отношениях точно так же, как глаз с врожденной цветовой слепотой. Разумеется, если яркость испытательного цветового поля достаточно высока, чтобы привести в действие механизм колбочкового зрения, предшествующая адаптация к темноте не препятствует восприятию цветовых различий.

Недостаточное время. Светящаяся поверхность может быть воспринята адаптированным к свету глазом как яркая вспышка, если излучение от нее падает в глаз в течение столь короткого времени, что ее цвет не фиксируется. В этих условиях, как и в импульсной фотометрии, нормальный глаз успевает производить только различения светлое — темное, т. е. тип зрения очень напоминает приобретенную полную цветовую слепоту.

Способность преодолевать эти недостатки цветового зрения делает одного наблюдателя с нормальным цветовым зрением более ценным, чем другого. Для выполнения многих задач более ценен тот наблюдатель, который может правильно различать цвета небольших тусклых объектов, видимых в течение короткого времени, даже если он схватывает их только уголком глаза. Было установлено, что в среднем нарушение зрительного восприятия у аномальных трихроматов при перечисленных условиях сказывается значительно сильнее, чем у нормальных наблюдателей. Вследствие обнаруженной у некоторой части наблюдателей пониженной зрительной восприимчивости проводились разработки тестов для проверки зрения с целью выявления не только дихроматов, но и аномальных трихроматов, которых якобы нельзя допускать к выполнению задач, непосильных для дихроматов. В результате такого подхода аномальные трихроматы иногда лишались работы, с которой они могли весьма удовлетворительно справляться.

ТЕСТЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ СЛЕПОТЫ

Тесты для проверки нормального цветового зрения предназначены главным образом для выявления протанопов, дейтеранопов и аномальных трихроматов с крайне слабым различением красного и зеленого цветов. Обнаружение других форм цветовой слепоты с практической точки зрения относительно несущественно, поскольку, во-первых, лиц с такими недостатками зрения очень мало в общей массе населения, во-вторых, тест для выявления всех типов цветовой слепоты гораздо труднее разработать и, в-третьих, неразличение красного и зеленого цветов чревато особенно серьезными последствиями на улице, на железных дорогах, в море и в воздухе, поскольку наибольшая часть сигнальных огней во всех видах транспорта имеет именно зеленый или красный цвет. Все тесты, применение которых было успешным, обладают следующими общими чертами: 1) они включают набор цветовых образцов красноватого и зеленоватого оттенков, которые испытуемый должен отличить друг от друга; 2) эти образцы представляют собой малые по площади окрашенные участки, в результате чего будут выявлены не только дихроматы, но и аномальные трихроматы; 3) обследуемому лицу предъявляются указанные малые окрашенные площадки, перемешанные с площадками, окрашенными в другие цвета, в результате чего сводятся на нет попытки части испытуемых либо скрыть нарушения цветового зрения путем угадывания предъявленных цветов и их сочетаний, либо скрыть наличие нормального зрения путем намеренно ошибочного указания цветов; 4) они содержат красные, зеленые, различным образом разноокрашенные и так называемые фоновые цветовые образцы самых различных степеней светлоты и желтоватого оттенка с тем, чтобы испытуемый не смог воспользоваться своей способностью отличать желтый цвет от синего и темные цвета от светлых. По существу различные успешно применяемые тесты отличаются друг от друга только формой реакции испытуемого.

Тест Хольмгрена. Испытуемому предъявляется набор небольших разноокрашенных мотков шерстяной пряжи, и он должен выбрать из них те, которые похожи на три мотка большего размера, окрашенные в красный, зеленый и розовый цвета.

Карты Нагеля. Испытуемому последовательно показывают определенное количество карт. На каждую карту нанесен ряд небольших круглых цветных пятен, образующих кольцо. На некоторых картах все пятна имеют слабую зеленую окраску, причем одни из них светлые, а другие — темные. На других картах цвет пятен представляет собой сочетание зеленого с серым, светло-розовым и другими мешающими цветами и так далее. От испытуе-

мого требуется указать, на какие карты нанесены пятна только одного цветового тона, а на какие — нескольких тонов.

Карты Стиллинга. Среди беспорядочно нанесенных на эти карты разноокрашенных пятнышек имеются расположенные и окрашенные так, что наблюдатель с нормальным цветовым зрением может прочесть образуемую ими цифру. Этого не может сделать (на некоторых из карт) дихромат и аномальный трихромат с очень слабым различением красного и зеленого цветов. Некоторые же из карт трудно прочесть даже наблюдателю с нормальным цветовым зрением.

Карты Исихара. В этой усовершенствованной форме теста по картам Стиллинга имеются как карты, которые могут быть прочитаны человеком с нормальным цветовым зрением (но не могут быть прочитаны дихроматами), так и карты, на которых наблюдатель с нормальным цветовым зрением видит одно число, а наблюдатель с резко ослабленным различением красного и зеленого цветов — другое число. Эти последние карты носят название карт с двумя числами. Другое усовершенствование, введенное Исихара, представляет собой карту, на которой испытуемый с сильным понижением цветоразличения красное — зеленое видит синеватую фигуру на коричневатом фоне. Нормальный наблюдатель вследствие одновременного цветового контраста видит на этой же карте резко выделяющийся рисунок в красных и зеленых тонах и совершенно не замечает синеватого оттенка. Наконец, среди карт Исихара есть образцы для лиц, не знающих цифр, т. е. фактически неграмотных. На этих картах вместо чисел изображены линии, которые нужно проследить от начала до конца.

АО X-P-P-тест. Этот тест представляет собой упорядоченный набор 20 псевдоизохроматичных пластинок (т. е. на первый взгляд окрашенных каждая одинаково, но на самом деле несколько различающихся в разных своих участках по цветовым характеристикам). Тест был разработан Харди, Рэндом и Риттлером (по первым буквам фамилий которых он и обозначается X-P-P), как продолжение работы, проводившейся ими в подкомитете по изучению цветовой слепоты Совета по проблемам цвета, образованного совместно научными и техническими обществами США. Принцип проверки по этому тесту аналогичен используемому в картах Стиллинга и Исихара, однако вместо чисел наблюдатель должен распознать на пластинках простые геометрические фигуры (круг, треугольник, крест).

Другие тесты, основанные на использовании окрашенных карт. К другим тестам, основанным на принципах, разработанных

Стиллингом и Исихаром с незначительными видоизменениями, относятся наборы карт Рабкина и Бёстрема — Кугельберга, а также тест для проверки цветового зрения, разработанный в Токийском медицинском колледже.

При проведении всех подобных тестов с картами испытуемый должен попытаться увидеть в цветовой картине число или простые геометрические фигуры. Эти тесты удобны, легки для проведения обследований в различных условиях и позволяют поставить большинству испытуемых достаточно точный диагноз. Однако всем им присущи и определенные недостатки: 1) характер спектрального распределения освещения, при котором проводится обследование, влияет на то, какое число или символ сможет увидеть данный конкретный наблюдатель; 2) на результат обследования влияет также количество пигмента хрусталика и желтого пятна в глазу наблюдателя; 3) вследствие технических трудностей, которых невозможно избежать, точного воспроизведения цвета фигуры, который для определенного типа наблюдателей должен в точности совпадать с цветом фона, не происходит. Первые из двух перечисленных недостатков приводят к тому, что некоторые из аномальных трихроматов, слабо различающих красный и зеленый цвета, благополучно проходят проверку по этим тестам с первого же обследования. Третий недостаток дает возможность лицу с ослабленным различением красного и зеленого цветов научиться безошибочно прочитывать любую предлагаемую карту по оттенкам других цветов, неизбежно присутствующим на отпечатанной карте. Именно это обстоятельство поддерживает ошибочную веру в то, что врожденные аномалии цветового зрения могут быть излечимы.

Аномалоскоп. Протаномалия и дейтераномалия выявляются с помощью прибора, известного под названием аномалоскопа Рэля, который дает смесь излучений двух участков спектра (красного и зеленого) с тем, чтобы наблюдатель уравнил ее цвет излучением третьего участка (желтого). Успешно используются также разновидности аномалоскопа, в которых излучения нужных цветов создаются путем применения стеклянных или желатиновых светофильтров. Отклонение от нормальных пропорций количеств красного и зеленого для уравнивания желтого сразу выявляет аномалию цветового зрения, а степень точности установки регуляторов прибора указывает, насколько хорошо наблюдатель отличает красный цвет от зеленого.

Предпринимателю необходимо знать о цветовом зрении своих работников. Перечисленные тесты позволяют быстро выделить тех людей, у которых цветовое зрение достаточно аномальное, чтобы быть помехой при выполнении той или другой работы. Таких людей следует направлять на такие производственные операции, которые не требуют принятия решений на основании цветовых

восприятий. Их нужно поощрять уметь распознавать дефекты цветового зрения вообще и присущие им отклонения от нормального цветового зрения в частности. Обычно невозможно устранить дефекты цветового зрения, однако тот, у кого имеется этот недостаток, может научиться избегать ответственности, вероятно связанной с возникновением дорогостоящих ошибок.

Имеется обширная литература, посвященная тестам для проверки цветового зрения и интерпретации результатов исследований в соответствии с этими тестами [34, 356, 384, 528].

ТЕОРИИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Теории цветового зрения объясняют явления нормального и аномального цветового зрения. Наиболее фундаментальными опытыми фактами, на которых должна основываться каждая теория цветового зрения, являются факты, относящиеся к зрительному уравниванию цветов или, в более широком смысле, к психофизическим аспектам цветового зрения. Для трихроматического зрения такие факты наиболее полно и кратко выражаются законами Грассмана. Любая теория цветового зрения должна также включать физиологические аспекты этого явления. Другими словами, она должна объяснять действие, производимое энергией излучения, которая поглощается рецепторами сетчатки (палочками и колбочками) и преобразуется в нервные импульсы. Наконец, всякая теория цветового зрения должна принимать во внимание его психологические аспекты, т. е. должна объяснять, как нервная активность в коре головного мозга приводит к цветовому восприятию.

Существует много различных теорий, пытающихся объяснить большинство или некоторые из аспектов цветового зрения. Ни одна из таких теорий не развита до столь высокого уровня, чтобы считаться полностью удовлетворительной, поскольку ни одной из них не удается строго ответить на все вопросы об установленных фактах, относящихся к психофизическому, физиологическому и психологическому аспектам цветового зрения. Сложность проблемы и кажущиеся непреодолимыми трудности в экспериментировании с человеческим глазом и человеческим мозгом не позволили до сих пор построить непротиворечивую и удовлетворительную теорию. Тем не менее задача о различаемости нами цветов продолжает оставаться мощным стимулом для многих ученых, и на пути к решению этой задачи был достигнут значительный прогресс особенно в последние годы.

Экспериментальные факты, относящиеся к цветовому уравниванию, долго использовались как отправной пункт, с которого необходимо начинать построение теории цветового зрения. Причиной этому служило то, что с самого начала принималось как

непреложная основа следующее: зрительный процесс, частью которого является механизм действия колбочек и зрительного нерва, должен быть таким, чтобы предсказывать цветовые уравнения в соответствии с законами Грассмана. Это означает, что зрительный процесс должен управляться набором функций спектрального распределения, которые линейно связаны с функциями сложения цветов, т. е. функциями, характеризующими возможности наблюдателя по сложению цветов. Функции сложения цветов, о которых мы подробно говорили выше, определяются как координаты цветов равноэнергетического спектра, взятые по аргументу λ (длина волны излучения) и измеренные по отношению к некоторому конкретному набору основных цветов.

Первым предложил теорию цветового зрения Томас Юнг в 1807 г. Он постулировал наличие в сетчатке механизмов трех типов, наиболее чувствительных к коротковолновому участку видимого спектра, к средневолновому участку и к длинноволновому участку. Три различных механизма были связаны с тремя главными цветами — красным, зеленым и фиолетовым.

Эксперименты по уравниванию цветов Максвелла [423, 424] и работа Грассмана [196] явились бесспорными доказательствами в пользу трехкомпонентной теории Юнга. Они дали возможность Гельмгольцу [231, 232] придать ей форму, известную теперь под названием теории цветового зрения Юнга — Гельмгольца. Гельмголец несколько видоизменил теорию Юнга с целью распространить ее на дихроматическое зрение. Он постулировал, что дихроматическое зрение является результатом подавления одной из трех функций спектральной чувствительности, контролирующей реакции колбочек. Соответственно и основные цвета были выбраны им так, чтобы согласоваться с цветами, неразличимыми при дихроматическом зрении. В случае протанопии отсутствует «красный» процесс, при дейтеранопии — «зеленый», а при тританопии — «фиолетовый».

Положение в спектре основных цветов, о которых свидетельствуют конкретные процессы, связанные с дихроматическим зрением, неоднократно определялось в экспериментах по цветовому уравниванию, выполнявшихся дихроматами [330, 352, 369, 506, 512, 655, 707]. Точное положение этих основных цветов до сих пор неизвестно, так как их экспериментальное определение оказалось чрезвычайно трудной задачей [152, 365, 581]. Однако все же можно получить разумный набор основных цветов, анализируя результаты подобных экспериментов; этот набор затем может быть использован для количественного определения реакций колбочек по Юнгу — Гельмгольцу.

Обычно предполагают, что функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. характеризуют цветоуравнивающие свойства желтого

пятна среднего наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Как указывалось ранее, эти функции соответствуют (воображаемому) набору основных цветов X, Y, Z , которые определяют трехкоординатное цветовое пространство МКО 1931 г. Экспериментально определенные недостающие основные цвета P, D, T , характеризующие три типа дихроматического зрения, можно выразить через основные цвета МКО X, Y, Z . Так, например, P задается координатами цвета X_p, Y_p, Z_p ; D — координатами X_D, Y_D, Z_D ; T задается цветовыми координатами X_T, Y_T, Z_T . Затем производится простое линейное преобразование типа уравнения (1.12) с тем, чтобы получить координаты цветов P, D, T из координат X, Y, Z . Ординаты $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ функций сложения, определенных МКО в 1931 г., также подвергаются преобразованиям, в результате которых мы получаем новые функции сложения $\bar{p}(\lambda), \bar{d}(\lambda), \bar{t}(\lambda)$. Из этих последних функций можно получить функции спектральной чувствительности (спектральной световой эффективности) $\bar{s}_1(\lambda), \bar{s}_2(\lambda), \bar{s}_3(\lambda)$ трех типов колбочек, функционирующих в нормальной сетчатке. Для этого следует разделить $\bar{p}(\lambda), \bar{d}(\lambda), \bar{t}(\lambda)$ на спектральный коэффициент пропускания $T(\lambda)$ всех элементов глаза, включая желтое пятно (табл. 1.1). Таким образом, $\bar{s}_1(\lambda) = \bar{p}(\lambda)/T(\lambda)$, $\bar{s}_2(\lambda) = \bar{d}(\lambda)/T(\lambda)$, $\bar{s}_3(\lambda) = \bar{t}(\lambda)/T(\lambda)$. Джадд [338] разработал уравнения преобразования не только для теории Юнга — Гельмгольца, но и для нескольких других теорий. При использовании основных цветов Питта [529] получают следующие уравнения преобразования, связывающие функции сложения МКО 1931 г. с реакциями колбочек Юнга — Гельмгольца:

$$\begin{aligned}\bar{p}(\lambda) &= T(\lambda) \bar{s}_1(\lambda) = 0,3550\bar{x}(\lambda) + 4,7250\bar{y}(\lambda) - 0,0800\bar{z}(\lambda), \\ \bar{d}(\lambda) &= T(\lambda) \bar{s}_2(\lambda) = -2,3000\bar{x}(\lambda) + 6,7950\bar{y}(\lambda) + 0,5050\bar{z}(\lambda), \\ \bar{t}(\lambda) &= T(\lambda) \bar{s}_3(\lambda) = 5,0000\bar{z}(\lambda).\end{aligned}\quad (1.18)$$

На рис. 1.24 приведены функции относительных спектральных реакций $\bar{p}(\lambda), \bar{d}(\lambda), \bar{t}(\lambda)$, соответствующие (1.18).

Из теории Юнга — Гельмгольца следует, что протанопы должны воспринимать все цвета в виде оттенков зеленого и фиолетового, а дейтеранопы — в виде оттенков красного и фиолетового. Однако эксперименты на наблюдателях, один глаз которых обладает нормальным цветовым зрением, а другой — дихроматичен, не подтверждают этих предсказаний. Протанопы и дейтеранопы видят оттенки синего и желтого цветов примерно такими же, как цветные тона, воспринимаемые в обычных условиях наблюдения нормальным трихроматом на длинах волн спектра 575 и 470 нм соответственно [331].

Фик [153] дал другое объяснение дихроматизма. Вместо того чтобы допустить неспособность одного из типов колбочек реагировать на излучение, Фик предположил, что и колбочки, реагирующие на красный и зеленый цвета, содержат одинаковую смесь пигментов, поглощающих длинноволновое и коротковолновое

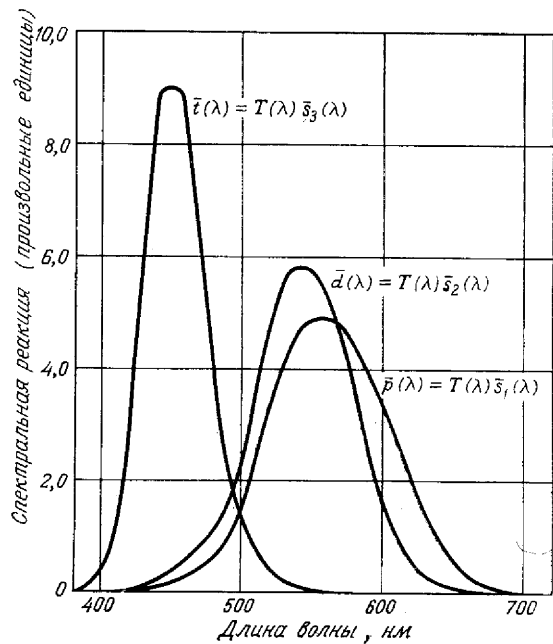


Рис. 1.24. Функции относительного спектрального распределения реакций глаза, обусловленных работой колбочек в сетчатке глаза по теории Юнга — Гельмгольца [529].

В приведенные кривые не введена поправка на спектральный коэффициент пропускания $T(\lambda)$ внутриглазных сред. Они представляют собой линейные преобразования кривых сложения цветов МКО 1931 г. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$; при их получении использовались основные цвета.

излучение. В результате реакции на красный и зеленый цвета почти одинаковы, что соответствует реакции на желтый цвет. У дейтеранопов смесь фотопигментов такова, что обуславливает весьма близкую к нормальной функцию общей световой эффективности, в то время как смесь фотопигментов у протанопов едва ли содержит (или содержит очень мало) фотопигмент, поглощающий длинноволновое излучение. В результате функция световой эффективности протанопов значительно меньше в длинноволновой части спектра, чем у нормальных наблюдателей (рис. 1.23).

В некоторых теориях, например в теории Кёнига [366, 367], постулируется, что ощущение яркости обусловлено срабатыва-

нием специального рецепторного механизма, состоящего из группы колбочек, спектральная реакция которых совпадает с функцией нормальной световой эффективности. Восприятие цвета обеспечивается по меньшей мере двумя другими рецепторными механизмами, также образованными группами колбочек, но с очень узкими полосами спектральной чувствительности. Теории, исходящие из этих принципиальных положений, называются доминаторно-модуляторными теориями [137, 192, 193]. Доминаторные ответственны за ощущение яркости; модуляторы, модулируя доминантную реакцию, вызывают ощущения цвета. Некоторыми исследователями получены экспериментальные данные, указывающие на то, что в сетчатке может находиться более двух типов модуляторов [55, 56, 147, 192, 193, 227, 628, 630]. Суммарные функции спектральной реакции в доминаторно-модуляторной теории очень близки к функциям, получаемым в трехкомпонентной теории Юнга — Гельмгольца (рис. 1.24).

Теория Лэдда-Франклина [380, 382] или ранняя теория Кёнига [366, 369] представляют собой модификации теории Юнга — Гельмгольца, подчеркивающие необходимость учитывать реакции колбочек на психологические основные цвета — красный, зеленый, желтый и синий, а не на красный, зеленый и фиолетовый цвета, как в теории Юнга — Гельмгольца. Психологические цвета имеют унитарный цветовой тон, другими словами, психологический красный основной цвет воспринимается как не обладающий ни зеленоватым, ни голубоватым оттенком, психологический желтый основной цвет не имеет ни зеленоватого, ни красноватого оттенка и т. д. Для доказательства того, что красный, зеленый, желтый и синий должны служить основными цветами, приводились эволюционные доводы. Однако при выборе этих основных цветов трудно удовлетворительно объяснить восприятие яркости нормальными трихроматами, а также дейтеранопами и протанопами.

Теория Геринга иначе подходит к объяснению явления цветного зрения. Вместо того чтобы постулировать три типа реакций колбочек, как в теории Юнга — Гельмгольца, Геринг постулирует наличие трех типов противоположных пар процессов реакции на черный и белый, желтый и синий, красный и зеленый цвета. Эти реакции происходят на пострецепторной стадии действия зрительного механизма. Теория Геринга выдвигает на первый план психологические аспекты цветного зрения. Когда три пары реакций идут в направлении диссимилиации, возникают теплые ощущения белого, желтого и красного цветов; когда они протекают ассимилятивно, им сопутствуют холодные ощущения черного, синего и голубого цветов.

Гурвич и Джеймсон развили теорию Геринга противоположных процессов при цветном зрении до степени, когда различные явления цветного зрения могут быть количественно объяснены

как для наблюдателя с нормальным цветовым зрением, так и аномальным цветовым зрением [282—284, 300—303]. Спектральные чувствительности в виде трех функций длины волны $[\omega(\lambda) - \omega_0(\lambda)]$, $[y(\lambda) - b(\lambda)]$, $[r(\lambda) - g(\lambda)]$ определяются следующим образом:

белое — черное:

$$[\omega(\lambda) - \omega_0(\lambda)] = \bar{v}_1(\lambda) = a_{11}\bar{s}_1(\lambda) + a_{12}\bar{s}_2(\lambda) + a_{13}\bar{s}_3(\lambda);$$

красное — зеленое:

$$[r(\lambda) - g(\lambda)] = \bar{v}_2(\lambda) = a_{21}\bar{s}_1(\lambda) - a_{22}\bar{s}_2(\lambda) + a_{23}\bar{s}_3(\lambda); \quad (1.19)$$

желтое — синее:

$$[y(\lambda) - b(\lambda)] = \bar{v}_3(\lambda) = -a_{31}\bar{s}_1(\lambda) + a_{32}\bar{s}_2(\lambda) + a_{33}\bar{s}_3(\lambda).$$

Спектральные чувствительности $\bar{v}_1(\lambda)$, $\bar{v}_2(\lambda)$, $\bar{v}_3(\lambda)$ противоположных процессов представляют собой линейные преобразования спектральных чувствительностей $\bar{s}_1(\lambda)$, $\bar{s}_2(\lambda)$, $\bar{s}_3(\lambda)$ трех типов колбочек, функционирующих в нормальной сетчатке. Преобразования определяются положительными константами a_{ih} . Красно-зеленый и желто-синий процессы меняют свои реакции на противоположные при переходе от одного участка видимого спектра к другому, и это обращение учитывается в уравнениях (1.19) введением отрицательных знаков для a_{22} и a_{31} соответственно.

Как и в других теориях, которые мы обсуждали, спектральные чувствительности колбочек $\bar{s}_1(\lambda)$, $\bar{s}_2(\lambda)$, $\bar{s}_3(\lambda)$, будучи умножены на спектральный коэффициент пропускания внутриглазных сред $T(\lambda)$, превращаются по предположению в результат линейных преобразований функций сложения цветов нормального трихромата. Уравнения (1.18) представляют собой пример подобного преобразования, в котором кривыми сложения являются кривые, выбранные МКО в 1931 г. для стандартного колориметрического наблюдателя. Таким образом, при переходе от кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ к спектральным чувствительностям $T(\lambda)\bar{v}_1(\lambda)$, $T(\lambda)\bar{v}_2(\lambda)$, $T(\lambda)\bar{v}_3(\lambda)$ противоположных процессов последовательно производится два линейных преобразования. С помощью простой алгебраической процедуры можно заменить два преобразования одним линейным [336]. На рис. 1.25 показан результат такого преобразования. Изменение реакции в красно-зеленом и желто-синем процессах при переходе от одной области спектра к другой ясно выражено изменением знаков реакций, характеризующих эти хроматические процессы: отрицательного в одних участках спектра, положительного — в других. Для черно-белого, или ахроматического, процесса повсюду харак-

терно положительное спектральное распределение, функция которого приблизительно равна функции спектральной световой эффективности нормального наблюдателя.

Как трехкомпонентную теорию Юнга — Гельмгольца с ее многочисленными модификациями, так и теорию противоположных цветов Геринга можно отнести к одностадийным теориям. Обсужденные выше трехкомпонентные теории рассматривают глав-

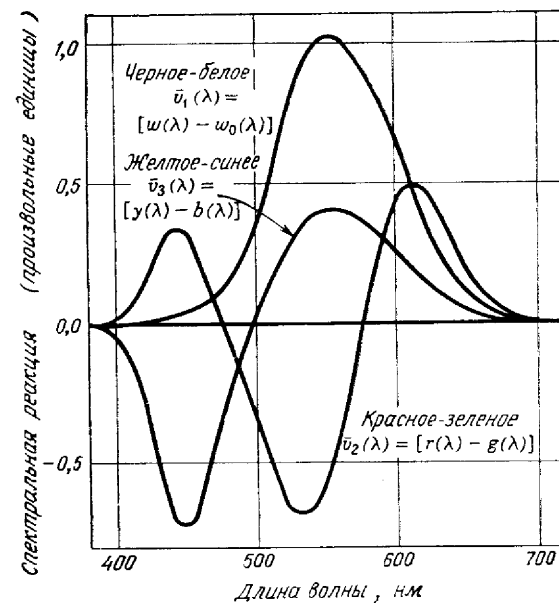


Рис. 1.25. Функции относительного спектрального распределения реакций зрительного механизма по теории противоположных цветов Геринга.

В кривых не учтен спектральный коэффициент пропускания $T(\lambda)$ внутриглазных сред. Изображенные функции являются линейными преобразованиями кривых сложения цветов МКО 1931 г. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

ным образом фотохимическую (пигментную) стадию или рецепторную (колбочковую); в теории противоположных цветов основную роль играет некоторая пострецепторная стадия механизма зрения. Фон Крис [374], Шрёдингер [590], Адамс [6, 7], Мюллер [463] и другие объединяют трехкомпонентные теории и теорию противоположных цветов с мультистадийной или стадийной теориями. Постулировалось, что на каждой стадии имеется свой отдельный набор основных цветов, а вместе с ним отдельный набор функций спектральных реакций. Подобного рода многостадийные теории имели больше степеней свободы и позволяли объяснить большее число разнообразных и противоречивых

явлений, относящихся к цветовому зрению [338]. Из всех многостадийных теорий наиболее полно разработана многостадийная теория Мюллера [163—165, 322, 354, 463].

Все теории цветового зрения, которых мы кратко коснулись, постулируют на некоторой стадии существование трех типов колбочек, и из цветоуравнивающих свойств зрения нормального трихромата обычно делается заключение, что эти три типа колбочек содержат фотопигменты с различными спектральными чувствительностями. Функции спектральной чувствительности колбочек выводятся дедуктивным путем из функций сложения цветов, причем в качестве исходного пункта принимается, что определенные фундаментальные основные цвета лежат в основе всего зрительного механизма.

Химический состав пигментов колбочек не был установлен, и работа Уолда [678] лишь косвенно указывала на существование колбочкового пигмента, который он назвал иодопсином, но который был выделен в чистом виде лишь из глаз цыплят [254]. Однако за последующие годы накапливаются дальнейшие доказательства, явно указывающие на существование трех колбочковых пигментов с различными спектральными чувствительностями.

Рантон [563], а также Рипс и Уил [552] использовали метод рефлектометрии глазного дна с целью показать, что в колбочках желтого пятна человека имеется более одного типа фотопигмента. К сожалению, этим методом нельзя очень точно измерить спектральный ход оптической плотности колбочковых пигментов.

Для измерения спектральной зависимости коэффициента поглощения отдельных колбочек, взятых с участков сетчатки человека и обезьяны, был разработан метод микроспектрофотометрии. Результаты, полученные при помощи этого метода Марксом и сотр. [422], а также Брауном и Уолдом [68], показывают, что зрительная система человека на рецепторной стадии в самом деле трехвариантна. Три типа колбочек содержат фотопигменты с максимумом спектрального коэффициента поглощения на длинах волн порядка 448, 528 и 567 нм.

Электрофизиологические эксперименты, проведенные для изучения зрительных систем различных позвоночных (исключая человека), также свидетельствовали о трехвариантной природе зрения на рецепторной стадии в тех случаях, когда поведение изучавшихся животных указывало на наличие у них цветового зрения. Хорошим примером подобного исследования является эксперимент Томиты и сотр. [660], изучавших отдельные колбочки в сетчатке карпа. Колбочки пронизывались микроэлектродами, диаметр кончиков которых составлял менее чем 10^{-7} м. Затем регистрировались изменения электрического потенциала при стимуляции колбочек энергией излучения различных длин волн. Было найдено, что три типа колбочек характеризуются тремя

различными спектральными функциями, определенными на основе амплитуды потенциала, как функции длины волны. Максимальные реакции наблюдались на длинах волн 462, 529 и 611 нм.

Электрофизиологический метод также используется при изучении проводящих нервных путей зрительного возбуждения за пределами рецепторного слоя. Регистрируются изменения электрического потенциала в тех случаях, когда вводятся микроэлектроды в сетчатку между рецепторами и ганглиозными клетками (рис. 1.3), а рецепторы стимулируются излучением различных длин волн. Однако спектральное распределение этих потенциалов, называемых *S*-потенциалами, резко отличается от распределения рецепторных потенциалов. Обнаружено два типа *S*-потенциалов [416, 470—472, 660]. Первый из них, названный *L*-потенциалом, отрицателен для всех спектральных стимулов, и, выраженный в функции длины волны, представляет собой сравнительно широкое спектральное распределение. Следует оговориться, что *L*-потенциалы определяются в условных единицах, поскольку значение этой *L*-величины, по-видимому, коррелирует со светимостью или яркостью стимула. Второй тип *S*-потенциалов условно измеряют в так называемых *C*-величинах, поскольку они коррелируют с ощущением цветности (сочетанием цветового тона и насыщенности) цветового стимула. Потенциалы, измеренные в *C*-величинах, могут принимать отрицательные или положительные значения в зависимости от длины волны стимула. Существует два вида *C*-величин: (*R* — *G*) и (*Y* — *B*). Измерения величины (*R* — *G*) дают положительный потенциал при длинноволновых (красных) стимулах и отрицательный при средневолновых (зеленых) стимулах. В результате спектральное распределение амплитуд потенциалов вначале отрицательно, а затем положительно (после пересечения спектральной оси) в области от 400 до 700 нм. Аналогичный характер имеет спектральное распределение амплитуд потенциалов, измеренных в (*Y* — *B*)-величинах, но оно отрицательно для всех длин волн в желтой области спектра и положительно — в синей области. Не удивительно, что эти результаты рассматриваются как очевидное доказательство в пользу существования механизмов кодирования цвета, причем в таком кодировании участвуют противоположные процессы.

При перемещении микроэлектродов в слой ганглиозных клеток регистрируются реакции, представляющие собой серии импульсов потенциала постоянной амплитуды, но различной частоты следования. И в данном случае мы вновь находим разные типы клеток, которые можно идентифицировать по различию частоты посылаемых ими импульсов. Такие исследователи, как Вагнер и сотр. [675, 676], Доу [127] и Гурас [188], выделили так называемые on-клетки, off-клетки и on — off-клетки. Первые из них посылают импульсы, когда начинается воздействие стимула

на сетчатку, вторые — когда это воздействие заканчивается, а клетки on — off срабатывают как в начале, так и в конце воздействия стимула. Частота следования импульсов зависит от величины стимула, его длины волны, а также от положения стимула в приемном поле слоя ганглиозных клеток.

Особый интерес вызывают on — off-клетки. Реакция on-клетки может возникнуть под влиянием стимулов коротких длин волн, а реакция off — при воздействии излучения с большими длинами волн, и наоборот. Например, генерация импульсов начинается после начала воздействия стимула с длиной волны 450 нм, либо прекращения действия стимула с длиной волны 700 нм. Установление наличия подобных механизмов возбуждения и подавления реакций интерпретируется как свидетельство существования механизмов кодирования первичных реакций на цвет, в которых принимают участие противоположные процессы.

Уникальной особенностью on — off-образований в слое ганглиозных клеток является характер организации его приемного поля. Образование, реагирующее генерацией импульсов, например в начале воздействия стимула с длиной волны 650 нм (красного), включается полностью в центре своего приемного поля, и, кроме того, начинает посылать импульсы (хотя и более слабые) также с периферии этого приемного поля. Когда на то же образование воздействует стимул с длиной волны 500 нм (зеленый), оно отвечает off-реакцией по всему приемному полю от центра до периферии [676]. Такой тип противоположных процессов предполагает наличие механизма, ответственного за зрительный феномен последовательного цветового контраста. Если ганглиозная клетка реагирует на начало воздействия стимула с длиной волны 650 нм и не реагирует на стимул с длиной волны 500 нм, она даст красную реакцию, когда зеленый стимул прекратит свое действие.

Результаты других экспериментов по изучению организации приемного поля [127] указывают на существование противоположных процессов, которые могли бы объяснить зрительный феномен одновременного цветового контраста.

Некоторые исследователи пошли еще дальше вдоль нервных проводящих путей зрительного восприятия и вживляли микроэлектроды в боковое коленчатое тело приматов [132, 133, 692]. Как и при изучении двух первых участков проводящих путей зрительного восприятия, было установлено, что боковое коленчатое ядро (LGN) содержит клетки с различными характеристиками электрических реакций. Некоторые из них представляют собой клетки, в которых не происходит никаких противоположных процессов по отношению к любым спектральным стимулам, т. е. они реагируют на стимулы любых длин волн либо увеличением частоты генерации импульсов (возбуждение), либо ее умень-

шением (торможение, подавление). В других же клетках наблюдались спектрально противоположные реакции. В таких клетках частота выработки импульсов увеличивается при воздействии стимулов из одних участков спектра и уменьшается, когда действуют стимулы из других участков спектра. Установлено существование четырех типов клеток со спектрально противоположными реакциями: а) клетки, отвечающие возбуждением на красный стимул и торможением на зеленый стимул — их называют (+ R — G)-клетками; б) клетки, возбуждающиеся при действии зеленого стимула и тормозящиеся при действии красного — их обозначают как (+ G — R)-клетки; в) клетки, возбуждающиеся в ответ на желтый стимул и тормозящиеся при воздействии синего — им присвоено наименование (+ Y — B)-клеток; г) клетки, отвечающие возбуждением на синий стимул и торможением на желтый — они получили название (+ B — Y)-клеток. Спектральное распределение различных типов клеток ядра коленчатого тела можно сравнить с психофизическими измерениями реакций на яркость и реакций на цветовой тон и насыщенность. Имеются факты в пользу того, что клетки без противоположных процессов участвуют в передаче информации о яркости; клетки, в которых происходят противоположные процессы, — в передаче информации о цветовом тоне и, наконец, оба вида клеток, действуя совместно, участвуют в передаче информации о насыщенности.

Кроме того, был достигнут определенный прогресс в изучении зрительных центров коры головного мозга с помощью электрофизиологических методов. На основании полученных данных можно предположить, что в этой оконечной области нервной передачи зрительного восприятия действуют клетки со спектрально противоположными и спектрально неизбирательными процессами, и что оба типа клеток продолжают обрабатывать информацию о цветовом стимуле, действовавшем на рецепторы сетчатки [458].

Для того чтобы обсуждение теорий цветового зрения соответствовало характеру и содержанию настоящей книги, оно по необходимости было кратким и подводило определенные итоги. Поэтому читатель, заинтересованный этим вопросом, должен будет обратиться к специальной литературе, на которую мы сослались по ходу изложения. Полезными в этом отношении могут оказаться и некоторые сравнительно недавние публикации [190, 300, 457, 562, 553]. Может случиться, что пройдет еще долгое время, прежде чем нам станет известна вся истина о механизме цветового зрения. Однако мы убедились, что было осуществлено быстрое и увлекательное продвижение в данной области, в частности благодаря применению методов физиологических исследований.

Глава 2

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Основной источник энергии — это солнце. Исходные материалы (сырье) мы получаем из земли — в шахтах и на полях. Наше благосостояние обусловлено использованием энергии солнца для превращения этих материалов в промышленные товары, которые мы можем использовать: пищу, питье, одежду, кров, лекарства, косметические товары, автомобили, поезда, самолеты, телефонные аппараты, радиоприемники, газеты, книги, кинофильмы, телевизоры и т. д. Почти каждый шаг переработки сырья в потребительские товары и доведения их до покупателя в какой-то степени определяется цветом исходных материалов или изделий. Поэтому неудивительно, что почти каждый деловой человек рано или поздно сталкивается с той или иной проблемой цвета. Она может возникнуть при контроле материалов, которые он приобретает, при контроле цвета собственной продукции, а также при отделке или упаковке изделий для продажи. В большинстве случаев проблему можно легко и экономично решить без применения цветовых стандартов или измерений. Однако при решении многих цветовых проблем целесообразно дополнить опытный глаз контролера специальными средствами и методами цветовых измерений. В последующем обсуждении основной упор будет сделан не на технических деталях колориметрии, а на возможностях этих методов и средств. Поскольку постоянно разрабатывается новая аппаратура и совершенствуется старая, важно выявить простые методы цветовых измерений и использовать для этого простые средства; важно также знать, когда окупятся значительные затраты на колориметрическое оборудование и проведение измерений.

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ

Ранее отмечалось, что основной способ измерения цвета объекта заключается в разложении на спектральные компоненты лучистого потока, направленного от объекта к глазу наблюдателя, и измерении каждого компонента в отдельности. Для разложения лучистого потока в спектр служит призма или дифракционная решетка; в сочетании со щелями и объективами этот диспергирующий элемент образует монохроматор (рис. 2.1). Исследуемый лучистый поток входит в щель (слева на рис. 2.1), коллими-

руется линзой в почти параллельный пучок, который после преломления его и разложения призмой фокусируется второй линзой в плоскости выходной щели *A*, которая служит для отделения одного узкого участка спектра от другого. За щелью *A* устанавливается чувствительный приемник или радиометр (термопара, фотоэлемент); комбинация радиометра с монохроматором называется *спектрорадиометром*. Этот прибор градуируется таким образом, чтобы можно было непосредственно считывать величину

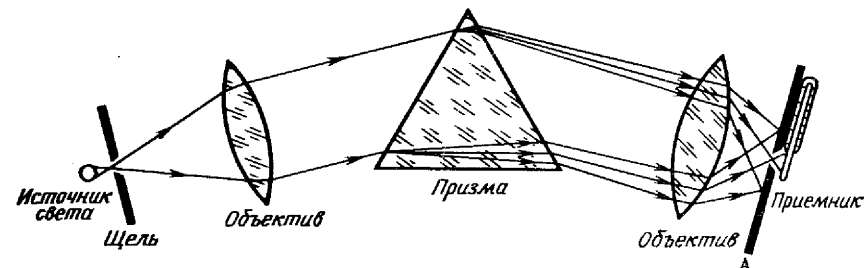


Рис. 2.1. Принципиальная схема однопризменного спектрорадиометра.

спектральной плотности лучистого потока, падающего на входную щель, в Вт·см⁻² на интервал длин волн в нм.

Спектрорадиометр, градуированный для непосредственного отсчета в абсолютных единицах таких величин, как спектральная плотность лучистого потока или связанные с ним спектральная и энергетическая яркость и спектральная плотность излучения, является ценным инструментом как для фотометрических, так и для колориметрических исследований самосветящихся объектов, к которым относятся лампы накаливания, люминесцентные лампы, телевизионные кинескопы и люминесцирующие материалы [229, 568]. Спектрорадиометр можно использовать для измерений несамосветящихся объектов, однако это делается редко, так как есть более простой способ таких измерений.

Основными характеристиками объекта, обуславливающими его цвет, являются спектральный коэффициент пропускания у прозрачных предметов и спектральный апертурный коэффициент отражения у непрозрачных.

Спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ определяется отношением пропущенного лучистого потока $\phi_{\lambda} d\lambda$ к падающему потоку $\phi_{0\lambda} d\lambda$ в узком спектральном интервале $d\lambda$:

$$\tau(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda} d\lambda}{\phi_{0\lambda} d\lambda},$$

где λ — центральная длина волны интервала $d\lambda$.

Определение спектрального апертурного коэффициента отражения $\beta(\lambda)$ более сложно из-за необходимости учитывать существ-

венную зависимость отражающих свойств непрозрачных объектов от условий освещения и наблюдения. Все диффузно отражающие свет материалы и изделия не являются идеально матовыми; им присущ в той или иной степени глянец. Часть падающего на поверхность лучистого потока отражается от нее более или менее зеркально; оставшаяся часть потока проникает через поверхность и после поглощения, рассеяния и многократных отражений в поверхностном слое материала повторно излучается почти диффузно.

Целесообразно оценить отражающие свойства непрозрачного объекта в сравнении с совершенным отражающим рассеивателем при тех же условиях освещения и наблюдения; в этом случае строгое определение спектрального апертурного коэффициента отражения может быть дано в следующем виде.

Спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta(\lambda)$ объекта представляет собой отношение спектрального лучистого потока, отраженного в направлениях, ограниченных данным конусом с вершиной в данной точке поверхности объекта, к спектральному лучистому потоку, отраженному в тех же направлениях идентично освещенным совершенным отражающим рассеивателем.

Рис. 2.2 иллюстрирует определение спектрального апертурного коэффициента отражения. Спектральный лучистый поток, падающий на совершенный отражающий рассеиватель и обозначенный $\phi_{0\lambda}d\lambda$, во всех отношениях идентичен спектральному потоку, падающему на исследуемый объект. Отраженный от совершенного отражающего рассеивателя или от исследуемого объекта спектральный лучистый поток ($\phi_{D\lambda}d\lambda$ или $\phi_{\lambda}d\lambda$ соответственно) проходит через апертуру A определенной формы и размера. Спектральный апертурный коэффициент отражения исследуемого объекта определится в виде

$$\beta(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda}^{(\omega)}d\lambda}{\phi_{D\lambda}^{(\omega)}d\lambda},$$

причем из рис. 2.2 легко заключить, что его величина в значительной степени зависит от угла освещения ϵ , угла наблюдения ϵ_1 и телесного угла ω конуса, определяемого размером и удалением апертуры A , особенно если объект имеет глянцевую поверхность. Например, если углы ϵ_1 и ϵ равны, а телесный угол ω мал, спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta(\lambda)$ может стать значительно больше единицы, поскольку в конус может попасть зеркальное изображение источника света.

В зависимости от величины телесного угла ω конуса, ограничивающего отраженный спектральный лучистый поток, спектральный апертурный коэффициент отражения может иметь два предельных значения. Если телесный угол ω конуса стремится

к нулю, спектральный апертурный коэффициент отражения является направленным *спектральным коэффициентом яркости*. Если телесный угол ω стремится к 2π (т. е. к полусфере над исследуемым объектом), спектральный апертурный коэффициент

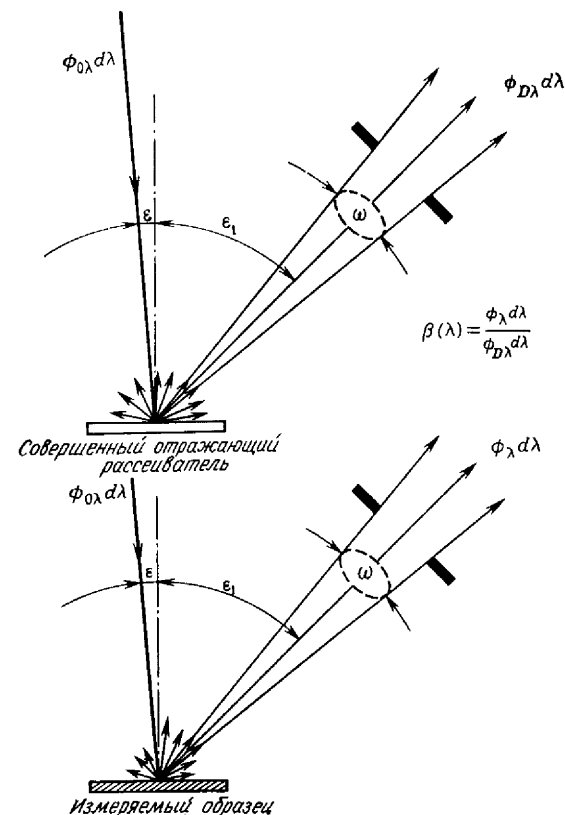


Рис. 2.2. Принципиальная схема измерения спектрального апертурного коэффициента отражения $\beta(\lambda)$ непрозрачного объекта.

отражения называется *спектральным коэффициентом отражения* и обозначается $\rho(\lambda)$. По определению совершенный отражающий рассеиватель отражает весь падающий лучистый поток $\phi_{0\lambda}d\lambda$ во всех направлениях равномерно и без потерь. Отсюда следует, что спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ исследуемого объекта представляет собой обычное отношение спектрального лучистого потока $\phi_{\lambda}d\lambda$, отраженного в полусфере над исследу-

мым объектом, к падающему потоку $\phi_{0\lambda} d\lambda$, т. е.

$$\rho(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda}^{(\omega=2\pi)} d\lambda}{\phi_{0\lambda} d\lambda}.$$

Прибор, который применяется для измерений спектральных коэффициентов пропускания и отражения, называется *спектрофотометром*. Очевидно, что спектрофотометр не требует градуировки для считывания величины спектрального распределения лучистого потока в абсолютных единицах, поскольку его цель заключается в обычном измерении отношения лучистых потоков в каждой длине волны спектра.

Спектрофотометры обычно имеют встроенный осветитель, включающий в себя источник света, излучающий достаточный лучистый поток во всех длинах волн интересующей части спектра. Фактическое спектральное распределение лучистого потока источника не имеет значения, поскольку прибор измеряет лишь отношения потоков в различных длинах волн. Важно отметить, что измеряемые спектрофотометром величины зависят от условий освещения и наблюдения. При измерениях спектральных коэффициентов пропускания падающий поток берется обычно вдоль перпендикуляра к поверхности образца при углах наблюдения, ограниченных углами вблизи продолжения того же самого перпендикуляра. При измерениях спектральных апертурных коэффициентов отражения непрозрачных образцов падающий поток обычно берется вдоль направления, несколько отклоняющегося от перпендикуляра к поверхности. Иногда весь отраженный поток для измерения собирается интегрирующей сферой; иногда этот поток собирается лишь в некоторых направлениях, например составляющих угол $\sim 45^\circ$. Поскольку спектральный апертурный коэффициент отражения в значительной степени зависит от условий освещения и наблюдения образца, некоторые из них были стандартизованы. Об этом речь ниже.

Необходимо кратко упомянуть об одной технической трудности, связанной с измерением спектрального апертурного коэффициента отражения. Так как не существует материала со свойствами совершенного отражающего рассеивателя, непосредственная реализация требуемого эталона такого рассеивателя невозможна. Тем не менее свойства некоторых материалов достаточно близки к свойствам совершенного отражающего рассеивателя, и они могут быть с помощью специальных методов прокалиброваны в качестве эталонов. Эти материалы используются в качестве рабочих стандартов при измерениях спектрального апертурного коэффициента отражения. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен позже.

Спектрофотометр является наиболее важным базовым прибором как для оценки цвета промышленных изделий, так и для

фундаментальных исследований в области колориметрии. В настоящее время выпускается множество спектрофотометров. Самые сложные из них автоматически регистрируют спектральные апертурные коэффициенты отражения (или спектральные коэффициенты пропускания) на перфорированных картах или лентах,

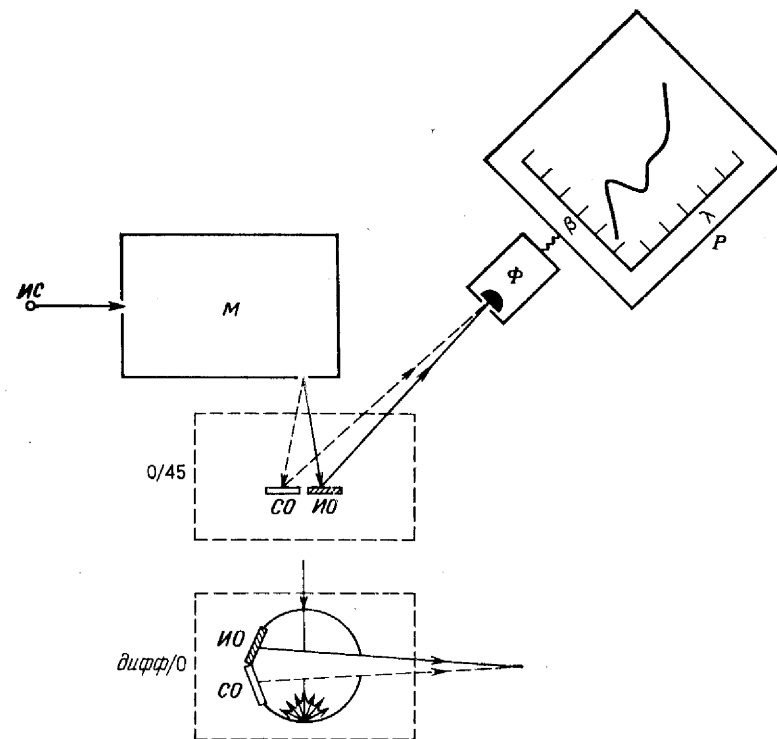


Рис. 2.3. Принципиальная блок-схема регистрирующего спектрофотометра. ИС — источник света; М — монохроматор; ИО — измеримый образец; СО — стандартный образец; Ф — фотоэлемент; Р — блок регистрации. Спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta(\lambda)$ исследуемого образца ИО измеряется относительно спектрального апертурного коэффициента отражения стандартного образца СО. Оба образца попеременно (в быстрой последовательности) освещаются по направлениям, близким к нормальным (0°) и измеряются фотоэлементом Ф в направлении, близком к 45° . Такая геометрия реализуется с помощью приставки 0/45 к монохроматору М. В нижней части рисунка показана приставка дифф/О, которая дает возможность измерять $\beta(\lambda)$ под углом, близким к нормали при диффузном освещении образцов.

удобных для непосредственного колориметрического анализа на цифровой вычислительной машине. Некоторые спектрофотометры регистрируют данные измерений на специальных бланках одновременно с разверткой по спектру. Существуют спектрофотометры нерегистрирующего типа с ручным управлением. Основные элементы регистрирующего спектрофотометра показаны на рис. 2.3.

В задачу настоящей книги не входит даже попытка описать все серийно выпускаемые в настоящее время спектрофотометры, применяемые в промышленности и исследовательских лабораториях; вместо этого предлагаются некоторые важные сведения, которые должен знать потенциальный заказчик, прежде чем он решится приобрести предлагаемый ему спектрофотометр. Спектрофотометр — дорогостоящий аппарат, и поэтому имеет смысл еще до приобретения оценить его потенциальные возможности.

ВЫБОР СПЕКТРОФОТОМЕТРА

В продаже нет таких универсальных спектрофотометров, которые были бы пригодны для решения любой задачи цветового контроля. Чтобы выбрать самый лучший и экономичный прибор для данной конкретной проблемы, необходимо четко сформулировать свои требования к нему.

Характер измеряемых образцов. Сперва следует составить перечень всех видов образцов, подлежащих измерению. Их можно разделить на три основные категории: прозрачные, полупрозрачные и непрозрачные. Затем следует перейти к перечислению ряда свойств измеряемых образцов, которые являются очень важными при спектрофотометрировании.

Во-первых, образцы имеют физические размеры. Любой спектрофотометр приспособлен для измерения образцов лишь определенных габаритов; следовательно, либо размеры образцов не должны превышать заданных, либо должна иметься возможность доведения их до нормы перед измерением.

Далее, важна устойчивость образцов к воздействию светового и теплового излучений, так как в процессе измерений образцы подвергаются действию лучистой энергии в течение определенного, причем иногда довольно длительного периода времени. В зависимости от конструкции спектрофотометра или метода проведения измерений лучистый поток, падающий на образец, может быть либо ограничен узким спектральным интервалом, либо содержать все длины волн в спектре излучения встроенного источника света. Последний случай может оказаться неблагоприятным для образца, так как сфокусированный на нем пучок обычно обеспечивает высокую интенсивность облученности поверхности (как в видимом, так и инфракрасном диапазонах спектра), что вызывает нагрев образца и, возможно, изменение его спектральной характеристики до завершения измерений. Помимо нагрева падающий поток может также вызвать в процессе измерений обесцвечивание образца с последующим изменением спектральной характеристики.

Некоторые материалы обладают свойством поглощать лучистый поток одной длины волны и излучать его при другой (как правило, большей) длине волны. Процесс, при котором происходит изменение длины волны, называется люминесценцией. Материал, поглощающий энергию в средней (зеленой) части спектра и излучающий ее при люминесценции в длинноволновой (красной) части, может при дневном свете иметь красноватый оттенок, однако любой спектрофотометр, не приспособленный для анализа потока, излучаемого образцом, дает завышенные значения коэффициента отражения в средней (зеленой) части спектра и не регистрирует поток люминесценции в длинноволновой (красной) части спектра. Такие ошибки имеют место в тех случаях, когда люминесцирующий образец установлен между выходной щелью монохроматора и приемником. Правильные измерения получаются тогда, когда образец непосредственно освещается источником света, а отраженный поток и поток люминесценции анализируются монохроматором при сканировании спектра. Однако результат измерений будет зависеть от спектрального распределения потока, излучаемого источником. Поскольку анализ спектральных характеристик люминесцирующих материалов, таких, как люминесцирующие краски, мыла и моющие средства, содержащие так называемые оптические отбеливатели, приобретает все более важное значение, эта проблема более подробно будет рассмотрена в одном из последующих разделов книги.

Поляризующие образцы (такие, как слюда, целлофан, атласные ткани) представляют собой другой вид образцов, которые вызывают трудности при спектрофотометрировании. Некоторые регистрирующие спектрофотометры, в которых образцы освещаются плоскополяризованным светом с постоянно меняющейся ориентацией, могут оказаться полностью непригодными для измерения поляризующих образцов. Только специальная модификация прибора дает возможность обойти эти трудности.

Некоторые промышленные изделия обнаруживают неоднородность цвета от точки к точке либо с правильным распределением неоднородности (текстильные изделия, полутоновая печатная кистью изделия, обработанное дерево, крапчатая облицовочная плитка). Если структура неоднородности существенна в сравнении с размером освещенного пятна, единственная кривая спектрального отражения (пропускания) не может быть надежным средством для определения среднего цвета неоднородного образца. Однако эту трудность можно обычно преодолеть повторными измерениями нескольких участков образца и усреднением результатов.

Наконец, следует разделить непрозрачные образцы на матовые, полуглянцевые или глянцевые. Это разделение важно, так

как различные условия освещения и наблюдения, реализованные в разных приборах, существенно влияют на измерение спектрального апертурного коэффициента отражения полуглянцевых и глянцевых образцов. Чтобы результаты измерения цвета полуглянцевых или глянцевых образцов коррелировали с визуальной оценкой, необходимо исключить из измерений свет, отраженный от поверхности. Это достигается в спектрофотометрах, в которых имеет место преимущественно однонаправленное (близкое к перпендикулярному) освещение образца, а измерение отраженного от него потока проводится в направлении, отклоняющемся от направления зеркального отражения (близкого к перпендикулярному) на много градусов (например, при отклонении на 45°). Во всяком случае более целесообразен выбор спектрофотометра, в котором реализована геометрия освещения и наблюдения, рекомендуемая в качестве стандартной.

Еще одну проблему для спектрофотометрирования представляют полупрозрачные образцы. Спектральные коэффициенты пропускания или отражения таких образцов существенно зависят от способа освещения и места установки образца в приборе. Условия измерений спектральных коэффициентов пропускания или отражения полупрозрачных образцов не стандартизованы, и в каждом конкретном случае исследователь сам должен решить, какие условия целесообразны.

Измерение однородных, матовых, непрозрачных, неполяризующих и нелюминесцирующих образцов обычно не представляет проблемы для современной спектрофотометрии. Если спектрофотометр находится в хороших условиях эксплуатации, то он обеспечит запись спектральных характеристик, коррелирующих с результатом, который можно ожидать при визуальной оценке образца. Конкретные условия освещения и наблюдения, реализованные в данном приборе, для таких образцов почти не имеют значения. Во всех случаях, когда образец обнаруживает неоднородность, глянец, недостаточную прозрачность, поляризующие свойства, люминесценцию или некоторую комбинацию этих свойств, необходимо убедиться, что выбранный спектрофотометр дает результаты, коррелирующие с тем, что наблюдается при визуальной оценке.

Объем измерений. Далее можно оценить количество измерений, которые нужно выполнить в течение определенного периода времени. Важно знать, что именно это обстоятельство помогает решить вопрос о приобретении спектрофотометра регистрирующего или нерегистрирующего типа. Регистрирующий спектрофотометр позволит осуществлять выборочный контроль серийно выпускаемой продукции без дорогостоящей остановки производства; в течение нескольких дней можно получить большой объем информации.

Нерегистрирующий же прибор потребовал бы значительных затрат средств и столь длительного времени, что информация, возможно, потеряла бы свое значение. Чтобы выполнить измерение спектральных характеристик в видимом спектре на регистрирующем спектрофотометре, может потребоваться от 30 с до 2 мин, в то время как такие же измерения на нерегистрирующем приборе часто могут потребовать более 30 мин. С другой стороны, высокая стоимость регистрирующего прибора ограничивает его экономичную эксплуатацию предприятиями, требующими выполнения нескольких сотен измерений в год, и фактически требует на все время работы прибора использования специально обученного оператора.

Диапазон спектра. Для оценки цвета предмета требуется получить его спектральные характеристики (спектральный апертурный коэффициент отражения для непрозрачных образцов и спектральный коэффициент пропускания для прозрачных образцов) во всем диапазоне видимого спектра, т. е. в пределах длин волн от 380 до 770 нм. В некоторых особых случаях, не обязательно связанных с оценкой цвета, может потребоваться расширение спектрального диапазона до ближней ультрафиолетовой (до 200 нм) и ближней инфракрасной (до 2000 нм) частей спектра. Ультрафиолетовый интервал может быть интересен при оценке спектральных характеристик люминесцирующих материалов, а инфракрасный — при изучении теплоабсорбционных свойств образцов.

В последние годы для измерения спектров отражения или пропускания стали серийно выпускаться спектрофотометры, в которых для получения монохроматического лучистого потока $\Phi_{0\lambda} d\lambda$ используется не монохроматор, а набор интерференционных фильтров, каждый из которых пропускает лучистый поток от встроенного источника лишь в различных узких спектральных интервалах. Интерференционные фильтры тщательно выбираются для обеспечения получения дискретных фиксированных монохроматических лучистых потоков с центральными длинами волн, равномерно расположенными вдоль видимого спектра. Фильтры устанавливаются на вращающемся диске, чем обеспечивается дискретное сканирование по спектру.

Из-за ограниченного количества интерференционных фильтров (10—40), установленных в таких приборах, сокращенная спектрофотометрическая характеристика может быть получена лишь в длинах волн, число которых равно количеству фильтров. Однако это ограничение не обязательно представляет собой неудобство, так как в большинстве текущих спектрофотометрических измерений, проводимых с целью последующего колориметрического анализа, не требуется детального спектрального анализа, который

может быть получен с помощью обычного спектрофотометра с монохроматором. Фактически сокращенная спектрофотометрия может сэкономить время при текущих измерениях.

Воспроизводимость и точность измерений. Воспроизводимость спектрофотометра оценивается возможностью прибора повторить измерение спектральных коэффициентов отражения или пропускания определенного стабильного образца. Считается, что спектрофотометр имеет очень высокую воспроизводимость, если результаты измерения спектрального коэффициента пропускания повторяются с погрешностью менее $\Delta\tau(\lambda) = \pm 0,001$. Это означает, что если однажды при измерениях было получено значение $\tau(\lambda) = 0,487$ на данной длине волны λ , то во всех остальных случаях измеренные значения $\tau(\lambda)$ будут находиться в пределах от 0,486 до 0,488. Относительная погрешность $\Delta\tau(\lambda)/\tau(\lambda)$ естественно растет с уменьшением $\tau(\lambda)$ и может стать весьма значительной при малых значениях, например при $\tau(\lambda) < 0,1$. Некоторые приборы дают возможность расширить шкалу при измерениях малых значений коэффициента пропускания в 5—10 раз, соответственно уменьшая относительную погрешность измерений в 5—10 раз. Иногда используются также логарифмические или другие нелинейные шкалы. Прибор дает плохую воспроизводимость измерений, если $\Delta\tau(\lambda)$ превышает значение $\pm 0,005$. Оценка воспроизводимости должна проводиться через различные временные интервалы. Прибор может хорошо повторить первоначальный результат при немедленном повторе, но дать большое расхождение, если после начала измерений прошел день или более.

Влияние спектрофотометрических ошибок на определение координат цвета и цветности может быть оценено эмпирически при проведении большого числа повторных измерений спектральных характеристик отражения или пропускания одного и того же образца с последующим расчетом соответствующих координат по спектральным данным. В результате измерений получается разброс данных вокруг среднего значения; величина этого разброса будет являться мерой воспроизводимости измерений на данном спектрофотометре. Колориметрическое значение спектрофотометрических ошибок может быть изучено статистическими методами [93, 405, 409, 502, 504, 554].

Точность спектрофотометра определяется его способностью обеспечить при данных условиях освещения и наблюдения измерение точных значений спектральных коэффициентов отражения или пропускания данного образца независимо от случайных погрешностей, имеющих место при повторных измерениях. Ценность погрешностей измерений будет зависеть от их конкретной цели. Например, может представлять интерес лишь однородность по цвету партии изделий, определяемая путем измерения спект-

ральных апертурных коэффициентов отражения ряда образцов, взятых с поточной линии. В этом случае важна лишь относительная разница между различными спектрофотометрическими записями. Следовательно, помехой является лишь плохая воспроизводимость измерений на приборе, а точность измерений не существенна в данном случае. С другой стороны, имеются другие примеры, когда требуется не только хорошая воспроизводимость, но и повышенная точность измерений. Например, если необходимо изготовить материал, который в определенных условиях освещения и наблюдения должен иметь цвет с заданными координатами, для измерений требуется достаточно точный спектрофотометр. Хорошая воспроизводимость хотя и необходима, но ее одной явно недостаточно. Существуют многочисленные виды систематических ошибок, например ошибки шкалы длин волн и фотометрической шкалы, а также ошибки, вызванные диспергированным и недиспергированным рассеянным светом, шириной щели, температурными изменениями и инерцией регистрирующего устройства [178, 359, 554]. Возможно, что некоторые из этих ошибок возникают из-за принципиальных дефектов конструкции или неправильной эксплуатации прибора; иногда они могут быть обусловлены невниманием или плохой подготовкой оператора.

Характеристики спектрофотометра должны периодически контролироваться; для облегчения такого контроля существуют соответствующие стандарты [104, 359, 736]. В некоторых случаях имеется возможность скорректировать систематические спектрофотометрические ошибки расчетными методами. В частности, это относится к ошибкам, вызываемым конечной шириной щелей монохроматора или спектральными интервалами пропускания интерференционных светофильтров, используемых в спектрофотометре [94, 554, 736].

Прочие требования. Наконец, для проведения некоторых специальных измерений или для непосредственного колориметрического анализа спектральных данных может потребоваться ряд специальных приспособлений к спектрофотометру. Например, если возникнет потребность в измерениях спектральной характеристики образцов при различной температуре, необходимо убедиться в комплектации прибора камерой для образцов с регулируемой температурой. Может также возникнуть необходимость измерения образцов при различных условиях освещения и наблюдения. В одном случае предпочтительно освещение в направлении, примерно перпендикулярном к образцу, а измерение в направлении, составляющем с перпендикуляром угол $\sim 45^\circ$; в другом же случае может потребоваться диффузное освещение, а измерение в направлении, близком к перпендикулярному. Различные условия освещения и наблюдения требуют оснащения

прибора приставкой 0/45 и приставкой дифф/0 с интегрирующей сферой.

Для непосредственного колориметрического анализа спектрофотометрических данных может потребоваться вычислительное устройство, подсоединенное к данному спектрофотометру. Выпускаются различные системы, однако наиболее перспективным является применение малогабаритных цифровых вычислительных машин, непосредственно связанных со спектрофотометром.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что выбор наиболее подходящего и экономичного в данном конкретном случае спектрофотометра — задача очень сложная, и ее решение требует детального знакомства как с колориметрией, так и с вопросами промышленного цветового контроля. Указанные проблемы были рассмотрены в различных трудах некоторых специалистов в области практической колориметрии; особый интерес для читателя может представить работа [307].

ОСНОВНЫЕ СТАНДАРТЫ В КОЛОРИМЕТРИИ

Один из основных физических параметров, определяющий цвет несамосветящихся объектов, задается спектральными апертурными коэффициентами отражения $\beta(\lambda)$ или спектральными коэффициентами пропускания $\tau(\lambda)$ объектов, измеряемыми на спектрофотометрах. Если два таких объекта имеют идентичные спектрофотометрические характеристики $\beta(\lambda)$ или $\tau(\lambda)$ для данных условий освещения и наблюдения, то при этих условиях они будут восприниматься одинаковыми по цвету независимо от индивидуальных свойств наблюдателя и от того, каким светом они освещены. Этот вывод не требует для своего подтверждения каких-либо преобразований спектрофотометрических данных, и о таких объектах говорят, что они колориметрически идентичны. При непосредственном сравнении двух спектральных кривых, имеющих не слишком схожую форму, можно качественно оценить разницу в цвете соответствующих образцов. Так, например, сопоставление кривых для образцов белого и рыжевато-коричневого цвета, которые представлены в верхней части рис. 2.4 (воспроизводящего ранее приведенный рис. 1.11), показывает, что второй образец темнее и имеет красновато-желтый оттенок по сравнению с первым. Такого рода вывод вытекает из простого сопоставления спектральных кривых апертурных коэффициентов отражения.

Однако если кривые различаются сложным образом, например при наличии трех или более точек взаимного пересечения (нижняя часть рис. 2.4), вывод о цветовых различиях образцов на основе простого сопоставления кривых не всегда возможен. Действительно, при некотором определенном освещении эти два образца будут восприниматься некоторыми наблюдателями одинаковыми

по цвету. Такие объекты создают *метамерные стимулы*, т. е. лучистые потоки, различающиеся по спектральному составу, но одинаковые по цвету. При ином освещении и для других наблюдателей уже нельзя ожидать сохранения цветового равенства, и между образцами появляется цветовое различие.

Представление о метамерных стимулах является базовым в колориметрии. Ранее, при обсуждении основных свойств цветового уравнивания, всегда имелись в виду именно метамерные стимулы, хотя сам этот термин и не использовался. В частности,

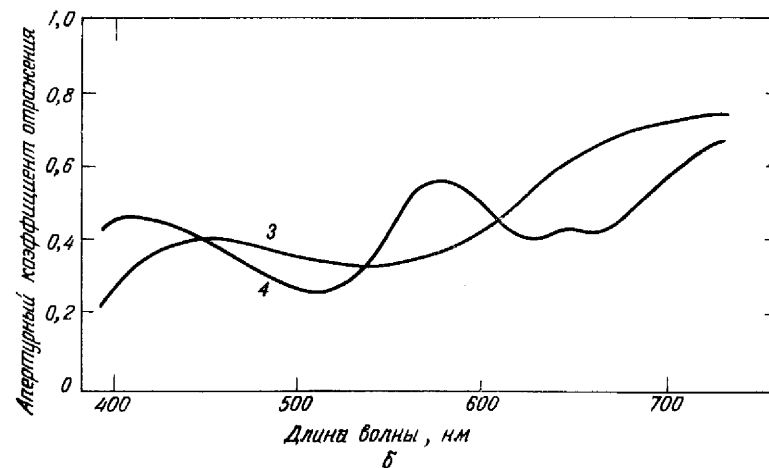
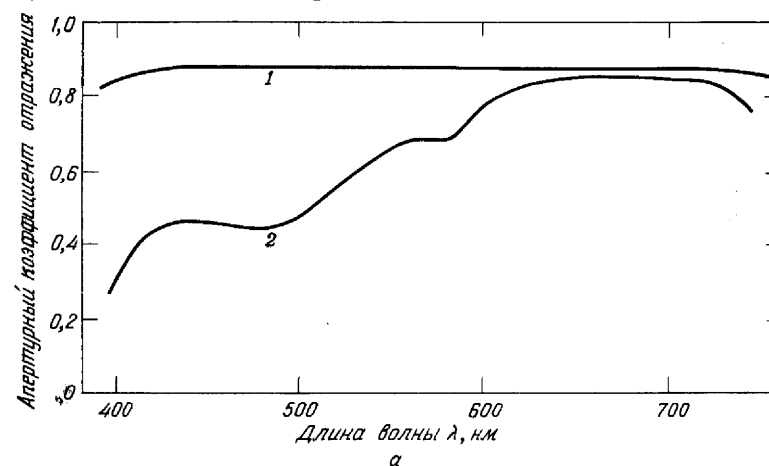


Рис. 2.4. Спектральные апертурные коэффициенты отражения нескольких гипотетических образцов.
а — белого (1) и рыжевато-коричневого (2); б — образцов (3) и (4), которые при определенном освещении образуют метамерную пару стимулов для данного, конкретного наблюдателя.

при экспериментальном определении функций сложения группа метамерных стимулов образуется путем смешения монохроматических стимулов различных длин волн. Более подробно метамеризм будет рассмотрен после введения математических выражений для координат цвета цветового стимула.

Если цветовой стандарт выполнен из того же материала с использованием тех же красителей, что и промышленное изделие, то они будут либо одинаковыми по цвету, либо между ними будет наблюдаться цветовое различие, обусловленное простой разницей в спектральных характеристиках. Никакого преобразования спектральных данных не требуется, так как прямое сопоставление двух кривых покажет, будет ли и в какой степени изделие отличаться по цвету от стандарта. Спектрофотометрические кривые фактически не нужны, поскольку соответствие изделия стандарту может быть с уверенностью установлено при непосредственном визуальном сравнении, выполненном с любым источником, дающим достаточное количество света (освещенность) для работы контролера.

Однако часто требуется, чтобы цветовой стандарт был более долговечным, чем само промышленное изделие. Это обстоятельство обуславливает широкое применение стекла и керамики для цветowych стандартов. В таких случаях материал и красители изделия и стандарта, как правило, различны и цветовое равенство в большинстве случаев оказывается до некоторой степени метамерным. Различия между спектральными кривыми обязательно носят в этом случае сложный характер, а интерпретация кривых требует знания особенностей наблюдателя и источника света, который используется для освещения изделия.

Перейдем к детальному обсуждению основных стандартов для колориметрии. Как отмечалось ранее, эти стандарты были установлены МКО в течение более четырех десятилетий и собраны воедино в публикации [101]. Колориметрические стандарты МКО являются основой так называемого метода классификации цвета МКО, получившего международное признание в науке и промышленности.

При обсуждении фундаментальных положений науки о цвете и, в частности, цветового сравнения было показано, что для определения координат цвета несамосветящегося объекта необходимо знать относительное спектральное распределение лучистого потока, падающего на объект, спектральные апертурные коэффициенты отражения объекта и функции сложения наблюдателя. Соответственно можно ожидать, что основные колориметрические стандарты посвящены: а) источникам освещения, б) измерению спектральных апертурных коэффициентов отражения и в) функциям сложения наблюдателей с нормальным цветовым зрением.

СТАНДАРТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Когда говорят об излучениях и источниках света, обычно имеют в виду спектральное распределение лучистого потока или так называемое спектральное распределение энергии. Если говорить более точно, нас интересует спектральный лучистый поток, падающий на единицу поверхности объекта, т. е. спектральная облученность, создаваемая излучением или источником света.

Существует множество источников света, при которых может наблюдаться объект; важнейшим из них является дневной свет. Известны различные фазы дневного света, такие, как свет ясного неба, прямой солнечный свет, свет от ясного неба в сочетании с солнечным светом, свет облачного неба. Различные фазы дневного света имеют различное спектральное распределение энергии.

Существует также множество искусственных источников света, таких, например, как лампы накаливания и люминесцентные лампы; эти источники также излучают потоки с различным спектральным составом [736].

Проводить цветовые измерения со всеми этими источниками невозможно, да в этом, к счастью, и нет необходимости, так как обычно достаточно измерить образец с одним источником. Если изготовитель заинтересован в определенном цвете изделия при дневном освещении, то опыт показывает, что нет необходимости контролировать цвет при всех фазах дневного света. Если изделие соответствует стандарту при одной фазе, например при свете от облачного неба, цветовое равенство сохраняется (или почти сохраняется) при всех остальных фазах. Аналогичное положение верно и для изделий, наблюдаемых всегда при освещении искусственным светом (например, облицовочной плитки в метро). Если цвет приемлем при освещении лампой накаливания с высокой цветовой температурой (прожектором), то он будет приемлем и при освещении низкотемпературной лампой (лампой накаливания мощностью 25 Вт).

Однако обычно не следует ожидать, что цветовое соответствие изделия стандарту, полученное при дневном освещении, сохранится при свете лампы накаливания или люминесцентной лампы. Можно ожидать, что единственным случаем, когда цветовое равенство не зависит от источника света, является случай, когда спектральные характеристики изделия и эталона идентичны по всему спектру, однако в этом тривиальном случае не требуется обращения к средствам колориметрии. Необходимость в колориметрии возникает тогда, когда изделие и эталон одноцветны при одном освещении и различны по цвету при других источниках света.

Таблица 2.1

Относительное спектральное распределение $S(\lambda)$ стандартных излучений А, В, С и D_{65} MRO¹⁾

λ (нм)	(A) $S(\lambda)$	(B) $S(\lambda)$	(C) $S(\lambda)$	(D_{65}) $S(\lambda)$	λ (нм)	(A) $S(\lambda)$	(B) $S(\lambda)$	(C) $S(\lambda)$	(D_{65}) $S(\lambda)$
300	0.93			0.03	575	110.80	101.90	100.15	96.1
05	1.13			1.7	80	114.44	101.00	97.80	95.8
10	1.36			3.3	85	118.08	100.07	95.43	92.2
15	1.62			11.8	90	121.73	99.20	93.20	88.7
20	1.93	0.02	0.01	20.2	95	125.39	98.44	91.22	89.3
325	2.27	0.26	0.20	28.6	600	129.04	98.00	89.70	90.0
30	2.66	0.50	0.40	37.1	05	132.70	98.08	88.83	89.8
35	3.10	1.45	1.55	38.5	10	136.35	98.50	88.40	89.6
40	3.59	2.40	2.70	39.9	15	139.99	99.06	88.19	88.6
45	4.14	4.00	4.85	42.4	20	143.62	99.70	88.10	87.7
350	4.74	5.60	7.00	44.9	625	147.24	100.36	88.06	85.5
55	5.41	7.60	9.95	45.8	30	150.84	101.00	88.00	83.3
60	6.14	9.60	12.90	46.6	35	154.42	101.56	87.86	83.5
65	6.95	12.40	17.20	49.4	40	157.98	102.20	87.80	83.7
70	7.82	15.20	21.40	52.1	45	161.52	103.05	87.99	81.9
375	8.77	18.80	27.50	51.0	650	165.03	103.90	88.20	80.0
80	9.80	22.40	33.00	50.0	55	168.51	104.59	88.20	80.1
85	10.90	26.85	39.92	52.3	60	171.96	105.00	87.90	80.2
90	12.09	31.30	47.40	54.6	65	175.38	105.08	87.22	81.2
95	13.35	36.18	55.17	68.7	70	178.77	104.90	86.30	82.3
400	14.71	41.30	63.30	82.8	675	182.12	104.55	85.30	80.3
05	16.15	46.62	71.81	87.1	80	185.43	103.90	84.00	78.3
10	17.68	52.10	80.60	91.5	85	188.70	102.84	82.21	74.0
15	19.29	57.70	89.53	92.5	90	191.93	101.60	80.20	69.7
20	20.99	63.20	98.10	93.4	95	195.12	100.38	78.24	70.7
425	22.79	68.37	105.80	90.1	700	198.26	99.10	76.30	71.6
30	24.67	73.10	112.40	86.7	05	201.36	97.70	74.36	73.0
35	26.64	77.31	117.75	95.8	10	204.41	96.20	72.40	74.3

В табл. 2.1-2.4, 2.6-2.11, 2.13, 2.15-2.17 сохранены обозначения дробей, принятые в американской литературе. — Прим. ред.

Чтобы можно было непосредственно сравнивать между собой результаты различных цветовых измерений, принято пользоваться одним из нескольких стандартных источников до тех пор, пока не возникнет серьезных причин использовать другие.

МКО проводит различие между источниками и излучениями. В то время как под источником понимается физический источник лучистой энергии, такой, как лампа или солнце и небо, термин «излучение» указывает на определенное спектральное распределение энергии, попадающей на исследуемый объект, причем это

Подолжение табл. 2.1

λ (нм)	(A) $S(\lambda)$	(B) $S(\lambda)$	(C) $S(\lambda)$	(D_{65}) $S(\lambda)$	λ (нм)	(A) $S(\lambda)$	(B) $S(\lambda)$	(C) $S(\lambda)$	(D_{65}) $S(\lambda)$
40	28.70	80.80	121.50	104.9	15	207.41	94.60	70.40	68.0
45	30.85	83.44	123.45	110.9	20	210.36	92.90	68.30	61.6
450	33.09	85.40	124.00	117.0	725	213.27	91.10	66.30	65.7
55	35.41	86.88	123.60	117.4	30	216.12	89.40	64.40	69.9
60	37.81	88.30	123.10	117.8	35	218.92	88.00	62.80	72.5
65	40.30	90.08	123.30	116.3	40	221.67	86.90	61.50	75.1
70	42.87	92.00	123.80	114.9	45	224.36	85.90	60.20	69.3
475	45.52	93.75	124.09	115.4	750	227.00	85.20	59.20	63.6
80	48.24	95.20	123.90	115.9	55	229.59	84.80	58.50	55.0
85	51.04	96.23	122.92	112.4	60	232.12	84.70	58.10	46.4
90	53.91	96.50	120.70	108.8	65	234.59	84.90	58.00	56.6
95	56.85	95.71	116.90	109.1	70	237.01	85.40	58.20	66.8
500	59.86	94.20	112.10	109.4	775	239.37			65.1
05	62.93	92.37	106.98	108.6	80	241.68			63.4
10	66.06	90.70	102.30	107.8	85	243.92			63.8
15	69.25	89.65	98.81	106.3	90	246.12			64.3
20	72.50	89.50	96.90	104.8	95	248.25			61.9
525	75.79	90.43	96.78	106.2	800	250.33			59.5
30	79.13	92.20	98.00	107.7	05	252.35			55.7
35	82.52	94.46	99.94	106.0	10	254.31			52.0
40	85.95	96.90	102.10	104.4	15	256.22			54.7
45	89.41	99.16	103.95	104.2	20	258.07			57.4
550	92.91	101.00	105.20	104.0	825	259.86			58.9
55	96.44	102.20	105.67	102.0	30	261.60			60.3
60	100.00	102.80	105.30	100.0					
65	103.58	102.92	104.11	98.2					
70	107.18	102.60	102.30	96.3					

спектральное распределение не обязательно может быть точно получено с помощью одного источника.

МКО рекомендует следующие стандартные излучения, определяемые относительным спектральным распределением энергии, приведенным в табл. 2.1.

Стандартное излучение А. Излучение А представляет собой излучение полного излучателя при абсолютной температуре 2856 К, определяемой по *Международной практической температурной шкале 1968 г.* [96].

Полный излучатель, называемый также абсолютно черным телом или излучателем Планка, является идеальным тепловым излучателем, спектральное распределение энергии которого зависит только от его температуры. Лучистая энергия генерируется

в замкнутом пространстве или полости, стенки которой равномерно нагреты до температуры T . Лучистый поток выходит через отверстие в стенке полости. Если отверстие достаточно мало, лучистый поток, прошедший через него (энергетическая светимость M), так же как и спектральная плотность лучистого потока, зависит исключительно от температуры стенок полости. Само отверстие является полным излучателем.

Спектральная плотность энергетической светимости M_λ полного излучателя определяется законом Планка:

$$M_\lambda = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (2.1)$$

где значения радиационных постоянных приняты следующими:

$$c_1 = 3,74150 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Линейные величины (включая длину волны λ) даны в метрах (м), лучистый поток (или мощность) в ваттах (Вт) и температура — в кельвинах (К). Переход от абсолютной температуры к шкалам Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) может быть сделан на основе соотношений

$$[^{\circ}\text{C}] = [\text{K}] - 273,15, \quad [^{\circ}\text{F}] = 9/5 [\text{K}] - 459,67.$$

Спектральное распределение энергии стандартного излучения А рассчитано по уравнению (2.1) при указанных значениях радиационных постоянных c_1 , c_2 и температуры $T = 2856 \text{ К}$. В табл. 2.1 приведены нормализованные значения спектрального распределения, т. е. все значения умножены на постоянный множитель так, чтобы при $\lambda = 560 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ (560 нм) получилось точно 100 (рис. 2.5). Такая нормализация общепринята, поскольку в колориметрических расчетах используется только относительное спектральное распределение энергии, обозначаемое символом $S(\lambda)$.

Поскольку речь идет о функции $S(\lambda)$ излучения А, величина радиационной константы c_1 не существенна; критична лишь величина c_2 , так как она влияет на форму функции $S(\lambda)$. Значение c_2 время от времени пересматривалось в соответствии с модификациями температурной шкалы. Когда в 1931 г. впервые было определено излучение А, $c_2 = 1,4350 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$, а T составляла 2848 К . Введение указанного выше нового значения c_2 приводит к более высокому значению температуры $T = (1,4388/1,4350) \cdot 2848 \approx 2856 \text{ К}$; при этом сохраняется принятое в 1931 г. спектральное распределение $S(\lambda)$ излучения А.

Стандартные излучения В и С. Излучение В предназначено для воспроизведения прямого солнечного излучения с коррелированной цветовой температурой, примерно равной 4870 К .

Излучение С предназначено для воспроизведения фазы дневного света с коррелированной цветовой температурой порядка 6770 К .

Как излучение В, так и излучение С (рис. 2.5) не вполне точно (как это первоначально предполагалось в 1931 г.) воспроизводят обычные фазы дневного света. Следует ожидать, что в недалеком будущем МКО примет решение об изъятии этих излучений из перечня рекомендуемых стандартных излучений. Вместо них

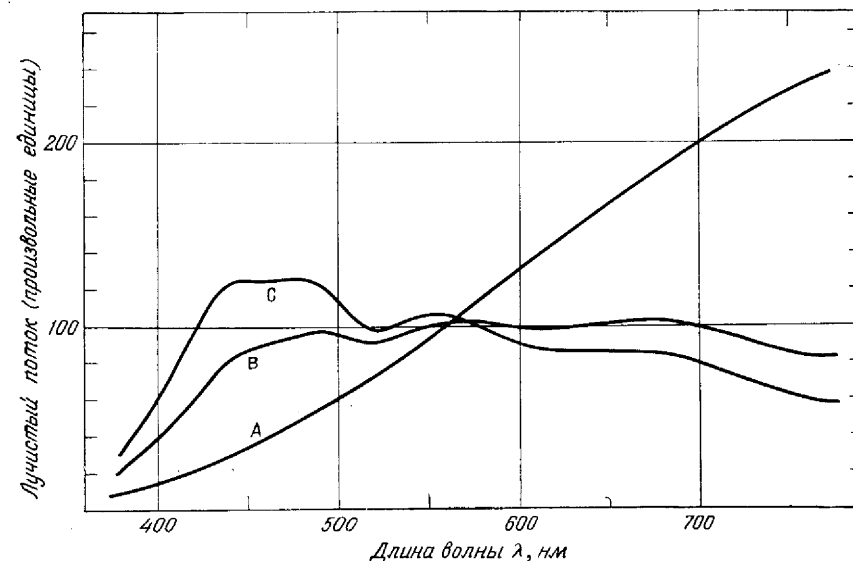


Рис. 2.5. Относительное спектральное распределение энергии стандартных излучений А, В и С МКО.

в тех случаях, когда для колориметрического анализа требуется средняя фаза дневного света, будет использоваться исключительно стандартное излучение D_{65} , введенное совсем недавно.

Следует отметить, что излучения обычно принято характеризовать *коррелированной цветовой температурой*. Такая практика введена много лет назад; она помогает сравнивать колориметрические характеристики различных излучений с помощью одного числа. Коррелированная цветовая температура излучения соответствует абсолютной температуре полного излучателя, свет которого имеет ту же цветность, что и данное излучение. Различные коррелированные цветковые температуры у разных излучений ничего не говорят о реальных температурах этих излучений или соответствующих источников света, а лишь о разнице по

цветности между ними. В одном из последующих разделов понятие «коррелированная цветовая температура» будет рассмотрено более подробно.

Стандартное излучение D_{65} . Излучение D_{65} представляет собой фазу дневного света с коррелированной цветовой температурой порядка 6500 К (рис. 2.6).

Данные по излучению D_{65} получены на основе многочисленных спектрорадиометрических измерений дневного света, выполненных в различных районах США, Канады и Великобритании

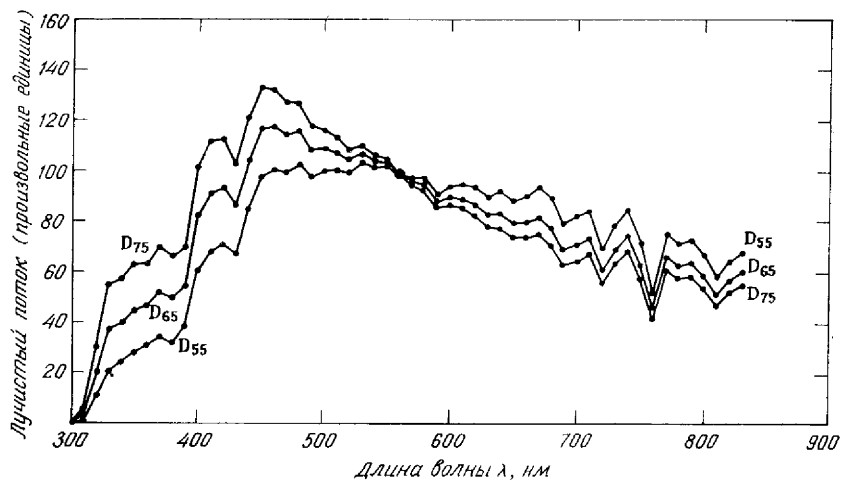


Рис. 2.6. Относительное спектральное распределение энергии стандартных излучений D_{55} , D_{65} , D_{75} МКО.

[350]. Значения относительного спектрального распределения энергии D_{65} и соответственно его коррелированной цветовой температуры при 6500 К хорошо согласуются с соответствующими значениями распределения и температуры суммарного излучения неба и солнца при определении их на горизонтальной поверхности. Изменение высоты солнца в течение периода времени между двумя часами после восхода и за два часа до заката, а также изменение состояния неба от облачного до ясного мало влияют на относительное спектральное распределение энергии суммарного дневного света, падающего на горизонтальную поверхность, во всем диапазоне видимого спектра. Фазы суммарного дневного света в основном лежат в диапазоне коррелированных цветковых температур от 6000 до 7000 К, причем 6500 К является хорошим приближением к среднему значению.

Другие излучения D. Когда данная поверхность облучается лишь какой-то областью всего неба, распределение спектральной плотности облученности в значительной степени зависит от того, каким именно участком неба облучается поверхность, и от состояния облачного покрова этого участка. Предельными случаями являются участок ясного синего неба и сам солнечный диск. Коррелированные цветковые температуры этих предельных фаз дневного света могут находиться в интервале от 100 000 до 4000 К соответственно. Дневной свет, проходящий через окно, лежит где-то между указанными крайними значениями.

Хотя диапазон коррелированных цветковых температур всех фаз дневного света довольно велик, была обнаружена [350] неожиданно простая, но важная функциональная связь между коррелированной цветковой температурой T_c и относительным спектральным распределением энергии $S(\lambda)$ дневного света. Было найдено, что для каждой определенной фазы дневного света, характеризуемой своей цветностью и соответственно T_c , существует единственное распределение $S(\lambda)$. Более того, можно вывести простую закономерность, позволяющую рассчитать распределение $S(\lambda)$ определенной фазы дневного света по всему видимому спектру от 300 до 830 нм через каждые 10 нм.

Можно вспомнить, что подобное соотношение существует для тепловых излучателей, в частности для абсолютно черного тела, лучистый поток которого зависит только от температуры самого излучателя [см. закон излучения Планка, уравнение (2.1)].

На основании результатов работы [350] МКО рекомендует всякий раз, когда нужно применять иное излучение D, нежели D_{65} , и соблюдать для определения его характеристик следующие правила.

Цветность. Координаты цветности x_D , y_D дневного света D в системе МКО 1931 г. должны удовлетворять следующему соотношению:

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275, \quad (2.2)$$

где x_D изменяется в пределах от 0,250 до 0,380. Коррелированная цветковая температура T_c дневного света D связана с x_D следующими формулами, базирующимися на уравнениях нормалей к линии цветностей абсолютно черного тела в равноконтрастном графике МКО 1960 г.

а. Для коррелированных цветковых температур приблизительно от 4000 до 7000 К:

$$x_D = -4,6070 \frac{10^9}{T_c^2} + 2,9678 \frac{10^6}{T_c^2} + 0,09911 \frac{10^3}{T_c} + 0,244063. \quad (2.3)$$

Таблица 2.2

Функции $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$
для расчета относительного
спектрального распределения энергии
 $S(\lambda)$ различных излучений D МКО

λ (нм)	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
300	0.04	0.02	0.0
310	6.0	4.5	2.0
320	29.6	22.4	4.0
330	55.3	42.0	8.5
340	57.3	40.6	7.8
350	61.8	41.6	6.7
360	61.5	38.0	5.3
370	68.8	42.4	6.1
380	63.4	38.5	3.0
390	65.8	35.0	1.2
400	94.8	43.4	-1.1
410	104.8	46.3	-0.5
420	105.9	43.9	-0.7
430	96.8	37.1	-1.2
440	113.9	36.7	-2.6
450	125.6	35.9	-2.9
460	125.5	32.6	-2.8
470	121.3	27.9	-2.6
480	121.3	24.3	-2.6
490	113.5	20.1	-1.8
500	113.1	16.2	-1.5
510	110.8	13.2	-1.3
520	106.5	8.6	-1.2
530	108.8	6.1	-1.0
540	105.3	4.2	-0.5
550	104.4	1.9	-0.3
560	100.0	0.0	0.0

б. Для коррелированных цветовых температур от 7000 до приблизительно 25 000 К

$$x_D = -2,0064 \frac{10^9}{T_c^3} + 1,9018 \frac{10^6}{T_c^2} + 0,24748 \frac{10^3}{T_c} + 0,237040. \quad (2.4)$$

Относительное спектральное распределение энергии. Относительное распределение $S(\lambda)$ дневного света D должно рассчитываться по формуле

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda), \quad (2.5)$$

где $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ — функции длины волны λ , приведенные в табл. 2.2, а M_1 , M_2 — коэффициенты, значения которых расчи-

Продолжение табл. 2.2

λ (нм)	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
570	96.0	-1.6	0.2
580	95.1	-3.5	0.5
590	89.1	-3.5	2.1
600	90.5	-5.8	3.2
610	90.3	-7.2	4.1
620	88.4	-8.6	4.7
630	84.0	-9.5	5.1
640	85.1	-10.9	6.7
650	81.9	-10.7	7.3
660	82.6	-12.0	8.6
670	84.9	-14.0	9.8
680	81.3	-13.6	10.2
690	71.9	-12.0	8.3
700	74.3	-13.3	9.6
710	76.4	-12.9	8.5
720	63.3	-10.6	7.0
730	71.7	-11.6	7.6
740	77.0	-12.2	8.0
750	65.2	-10.2	6.7
760	47.7	-7.8	5.2
770	68.6	-11.2	7.4
780	65.0	-10.4	6.8
790	66.0	-10.6	7.0
800	61.0	-9.7	6.4
810	53.3	-8.3	5.5
820	58.9	-9.3	6.1
830	61.9	-9.8	6.5

тываются по значениям координат цветности x_D , y_D

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D}, \quad (2.6)$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D}.$$

Расчеты. Для облегчения практического применения указанных рекомендаций МКО в табл. 2.3 приведены значения x_D , y_D , M_1 и M_2 для коррелированных цветовых температур от 4000 до 25 000 К.

Хотя вышеприведенные формулы дают возможность рассчитать $S(\lambda)$ для любой коррелированной цветовой температуры, а табл. 2.3 облегчает этот расчет для широкого диапазона коррелированных цветовых температур, МКО настоятельно рекомендует в интересах стандартизации использовать D_{65} везде, где

Координаты цветности x_D, y_D в системе МКО 1931 г.
и коэффициенты M_1, M_2 излучений D с коррелированной
цветовой температурой T_c от 4000 до 25000 К.

Все коррелированные цветовые температуры T_c соответствуют
значению $c_2 = 1,4388 \times 10^{-2}$ м·К.

Стандартное излучение $D_{55}: T_c = 5500$ (1,4388/1,4380) \approx 5503 К.

Стандартное излучение $D_{65}: T_c = 6500$ (1,4388/1,4380) \approx 6504 К.

Стандартное излучение $D_{75}: T_c = 7500$ (1,4388/1,4380) \approx 7504 К.

T_c	x_D	y_D	M_1	M_2
4000	0.3823	0.3838	-1.505	2.827
4100	0.3779	0.3812	-1.464	2.460
4200	0.3737	0.3786	-1.422	2.127
4300	0.3697	0.3760	-1.378	1.825
4400	0.3658	0.3734	-1.333	1.550
4500	0.3621	0.3709	-1.286	1.302
4600	0.3585	0.3684	-1.238	1.076
4700	0.3551	0.3659	-1.190	0.871
4800	0.3519	0.3634	-1.140	0.686
4900	0.3487	0.3610	-1.090	0.518
5000	0.3457	0.3587	-1.040	0.367
5100	0.3429	0.3564	-0.989	0.230
5200	0.3401	0.3541	-0.939	0.106
5300	0.3375	0.3519	-0.888	-0.005
5400	0.3349	0.3497	-0.837	-0.105
5500	0.3325	0.3476	-0.786	-0.195
5600	0.3302	0.3455	-0.736	-0.276
5700	0.3279	0.3435	-0.685	-0.348
5800	0.3258	0.3416	-0.635	-0.412
5900	0.3237	0.3397	-0.586	-0.469
6000	0.3217	0.3378	-0.536	-0.519
6100	0.3198	0.3360	-0.487	-0.563
6200	0.3179	0.3342	-0.439	-0.602
6300	0.3161	0.3325	-0.391	-0.635
6400	0.3144	0.3308	-0.343	-0.664
6500	0.3128	0.3292	-0.296	-0.688
6600	0.3112	0.3276	-0.250	-0.709
6700	0.3097	0.3260	-0.204	-0.726
6800	0.3082	0.3245	-0.159	-0.739
6900	0.3067	0.3231	-0.114	-0.749
7000	0.3054	0.3216	-0.070	-0.757
7100	0.3040	0.3202	-0.026	-0.762
7200	0.3027	0.3189	0.017	-0.765
7300	0.3015	0.3176	0.060	-0.765
7400	0.3003	0.3163	0.102	-0.763
7500	0.2991	0.3150	0.144	-0.760
7600	0.2980	0.3138	0.184	-0.755
7700	0.2969	0.3126	0.225	-0.748
7800	0.2958	0.3115	0.264	-0.740
7900	0.2948	0.3103	0.303	-0.730

Продолжение табл. 2.3

T_c	x_D	y_D	M_1	M_2
8000	0.2938	0.3092	0.342	-0.720
8100	0.2928	0.3081	0.380	-0.708
8200	0.2919	0.3071	0.417	-0.695
8300	0.2910	0.3061	0.454	-0.682
8400	0.2901	0.3051	0.490	-0.657
8500	0.2892	0.3041	0.526	-0.652
9000	0.2853	0.2996	0.697	-0.566
9500	0.2813	0.2956	0.856	-0.471
10000	0.2788	0.2920	1.003	-0.369
10500	0.2761	0.2887	1.139	-0.265
11000	0.2737	0.2858	1.266	-0.160
12000	0.2697	0.2808	1.495	0.045
13000	0.2664	0.2767	1.693	0.239
14000	0.2637	0.2732	1.868	0.419
15000	0.2614	0.2702	2.021	0.586
17000	0.2578	0.2655	2.278	0.878
20000	0.2539	0.2603	2.571	1.231
25000	0.2499	0.2548	2.907	1.655
5503	0.3324	0.3475	-0.785	-0.198
6504	0.3127	0.3291	-0.295	-0.689
7504	0.2990	0.3150	0.145	-0.760

только возможно. В тех случаях, когда D_{65} не может быть использовано, рекомендуется пользоваться по возможности одним из двух распределений $S(\lambda)$ для излучений D_{55} или D_{75} , приведенных в табл. 2.4. Эти кривые $S(\lambda)$ соответствуют фазам дневного света с коррелированными цветовыми температурами порядка 5500 и 7500 К (рис. 2.6).

Рекомендации МКО по дневным излучениям D являются существенным достижением по сравнению с прежними рекомендациями по излучениям В и С. В частности, излучения D значительно более полно, чем В и С, представляют ультрафиолетовый диапазон спектра дневного света. Это особенно важно, когда колориметрическому анализу подвергаются образцы, люминесцирующие под действием ультрафиолетового излучения.

Однако рекомендации МКО не должны рассматриваться как последнее слово в вопросе об излучениях D. Нужно помнить, что,

Таблица 2.4

Относительное спектральное распределение энергии
 $S(\lambda)$ излучений D_{55} и D_{75} МКО

λ (нм)	(D_{55}) $S(\lambda)$	(D_{75}) $S(\lambda)$	λ (нм)	(D_{55}) $S(\lambda)$	(D_{75}) $S(\lambda)$
300	0.02	0.04	600	94.4	87.2
310	2.1	5.1	610	95.1	86.1
320	11.2	29.8	620	94.2	83.6
330	20.6	54.9	630	90.4	78.7
340	23.9	57.3	640	92.3	78.4
350	27.8	62.7	650	88.9	74.8
360	30.6	63.0	660	90.3	74.3
370	34.3	70.3	670	93.9	75.4
380	32.6	66.7	680	90.0	71.6
390	38.1	70.0	690	79.7	63.9
400	61.0	101.9	700	82.8	65.1
410	68.6	111.9	710	84.8	68.1
420	71.6	112.8	720	70.2	56.4
430	67.9	103.1	730	79.3	64.2
440	85.6	121.2	740	85.0	69.2
450	98.0	133.0	750	71.9	58.6
460	100.5	132.4	760	52.8	42.6
470	99.9	127.3	770	75.9	61.4
480	102.7	126.8	780	71.8	58.3
490	98.1	117.8	790	72.9	59.1
500	100.7	116.6	800	67.3	54.7
510	100.7	113.7	810	58.7	47.9
520	100.0	108.7	820	65.0	52.9
530	104.2	110.4	830	68.3	55.5
540	102.1	106.3			
550	103.0	104.9			
560	100.0	100.0			
570	97.2	95.6			
580	97.7	94.2			
590	91.4	87.0			

несмотря на многочисленные предварительные измерения, рекомендации не отражают сезонных изменений в спектральном распределении $S(\lambda)$ дневного света, которые, как известно, имеют место особенно в ультрафиолетовой части спектра. Не учтены также в рекомендациях некоторые различия в спектрах дневного света между различными географическими районами земного шара [115, 244, 475, 572, 651, 697]. И наконец, рекомендованные

данные относятся к дневному свету в незагрязненной атмосфере, что не всегда практически реально; это обстоятельство может иметь важное значение для колориметристов.

Для полного понимания метода МКО расчета $S(\lambda)$ дневного света D с данной коррелированной цветовой температурой T_c необходимо более подробно познакомиться с методом расчета координат цветности x , y , цветовым графиком x , y МКО и другими связанными с ними колориметрическими понятиями и величинами. Эти вопросы будут детально освещены позже.

Искусственные источники света, воспроизводящие стандартные излучения МКО. МКО рекомендует следующие источники света в качестве стандартных для воспроизведения вышеприведенных стандартных излучений при практическом контроле цвета окрашенных материалов в лабораториях.

Стандартный источник А МКО. Стандартное излучение А должно воспроизводиться газонаполненной лампой накаливания с вольфрамовой нитью при коррелированной цветовой температуре 2856 К. Для более точного воспроизведения спектрального распределения лучистого потока ультрафиолетовой части спектра излучения А рекомендуется пользоваться лампами с колбой или окном из плавленного кварца.

Калиброванные лампы с вольфрамовой нитью можно приобрести в метрологических лабораториях или национальных метрологических центрах.

Стандартные источники В и С МКО. Стандартные излучения В и С должны воспроизводиться стандартным источником А в комбинации с фильтрами, состоящими из двух слоев растворов V_1 , V_2 и C_1 , C_2 соответственно толщиной 1 см каждый, заполняющих две половины плоскопараллельной кюветы из бесцветного оптического стекла. Рецепты растворов приведены в табл. 2.5. Жидкостные фильтры для перехода от источника А к источникам В и С обычно называют фильтрами Девиса — Гибсона [126].

Стандартный источник D МКО. В настоящее время нет рекомендаций МКО по воспроизведению какого-либо из излучений D МКО. Сложность разработки таких рекомендаций определяется уникальным характером и неравномерностью спектрального распределения дневного света, как показано на рис. 2.6. Не известен какой-либо искусственный источник света с таким спектральным распределением, а преобразование спектрального распределения существующих источников с помощью фильтров или иных средств приводит лишь к частичным успехам [201, 243, 244, 427].

Таблица 2.5

Фильтры Девиса — Гибсона для перехода от стандартного источника А МКО к стандартным источникам В и С МКО

Фильтр под источник В

Раствор В₁

Медный купорос (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	2,452	г
Манинит [C ₆ H ₈ (OH) ₆]	2,452	г
Пиридин (C ₅ H ₅ N)	30,0	мл
Дистиллированная вода до объема	1000,0	мл

Раствор В₂

Сульфат кобальт-аммония [CoSO ₄ ·(NH ₄) ₂ SO ₄ ·6H ₂ O]	21,71	г
Медный купорос (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	16,11	г
Серная кислота (плотность 1,835 г·мл ⁻¹)	10,0	мл
Дистиллированная вода до объема	1000,0	мл

Фильтр под источник С

Раствор С₁

Медный купорос (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	3,412	г
Манинит [C ₆ H ₈ (OH) ₆]	3,412	г
Пиридин (C ₅ H ₅ N)	30,0	мл
Дистиллированная вода до объема	1000,0	мл

Раствор С₂

Сульфат кобальт-аммония [CoSO ₄ (NH ₄) ₂ SO ₄ ·6H ₂ O]	30,58	мл
Медный купорос (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	22,52	г
Серная кислота (плотность 1,835 г·мл ⁻¹)	10,0	мл
Дистиллированная вода до объема	1000,0	мл

Комитет по колориметрии МКО активно занимается этой проблемой, и в этой связи может представить интерес обзорный доклад Вышецки [729]. На рис. 2.7—2.10 приводятся примеры относительных спектральных распределений энергии искусственных источников, предназначенных для воспроизведения одного из стандартных излучений. В частности, на рис. 2.7 спектральное распределение отфильтрованного излучения ксеноновой дуговой лампы высокого давления сравнивается с распределением излучения D₆₅; на рис. 2.8 излучение D₆₅ сравнивается с отфильтрованным излучением лампы накаливания с вольфрамовой нитью, а на рис. 2.9 — D₆₅ сравнивается с излучением специально подобранной люминесцентной лампы. Если рассматривать весь спектр от 300 до 830 нм, наилучшее воспроизведение излучения D₆₅ достигается с помощью отфильтрованного излучения ксеноновой дуговой лампы высокого давления, хотя еще очевидны некоторые различия в спектрах. Если же исключить из рассмотрения ультрафиолетовую часть спектра (300—380 нм), достаточно хорошие резуль-

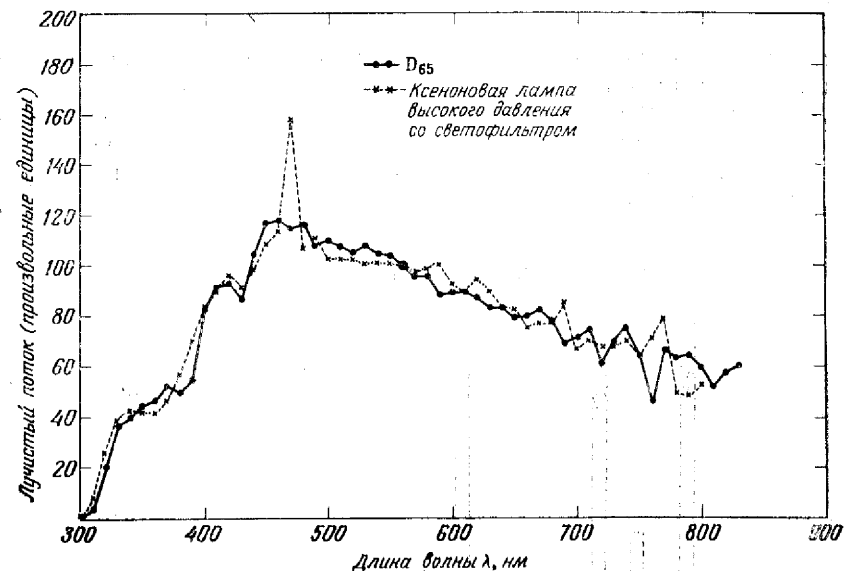


Рис. 2.7. Относительное спектральное распределение энергии фильтрованного излучения ксеноновой лампы высокого давления и стандартного излучения D₆₅ МКО [729].

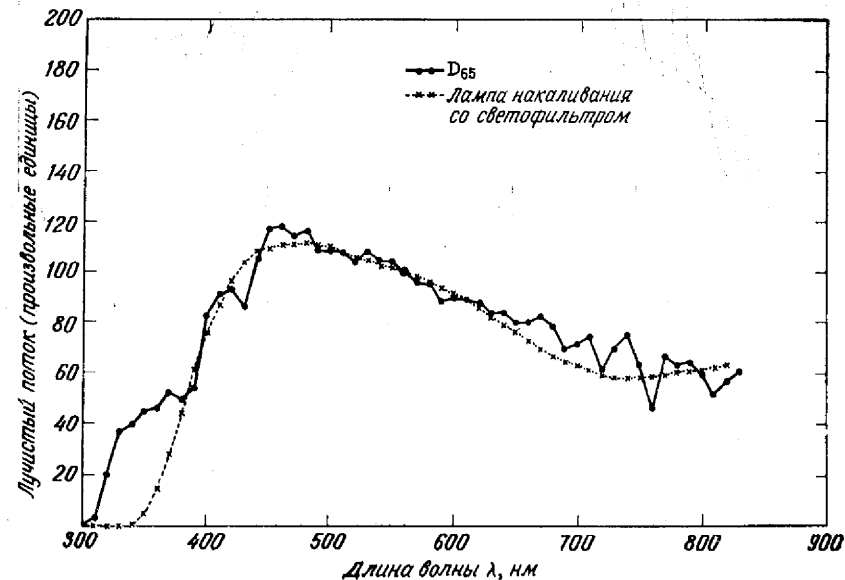


Рис. 2.8. Относительное спектральное распределение энергии фильтрованного излучения лампы накаливания и стандартного излучения D₆₅ МКО [729].

таты дает лампа накаливания с фильтрами. Люминесцентная лампа обеспечивает лишь грубое приближение к D_{65} .

На рис. 2.10 показано относительное спектральное распределение комбинации двух ламп в сравнении с распределением излучения D_{75} . Одна из двух ламп является люминесцентной, воспроизводящей главным образом ультрафиолетовую часть спектра,

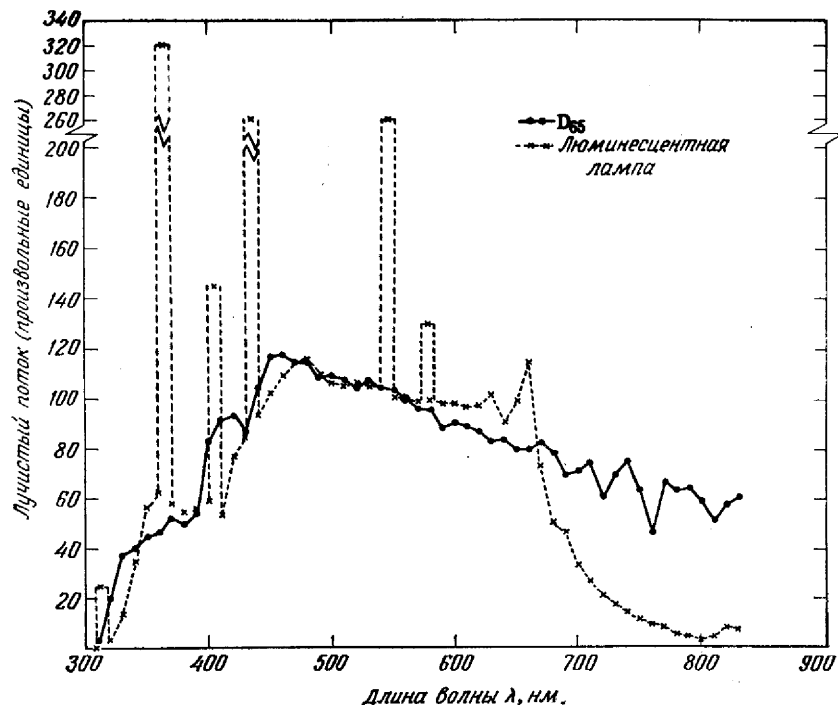


Рис. 2.9. Относительное спектральное распределение энергии люминесцентной лампы и стандартного излучения D_{65} МКО [729].

воспроизведение оставшейся части спектра обеспечивается лампой накаливания с фильтром. Обе лампы, установленные в одном осветительном приборе, составляют источник, удовлетворительно воспроизводящий излучение D_{75} .

Примеры, приведенные на рис. 2.7—2.10, можно рассматривать как наиболее удачные (с экономической точки зрения) примеры существующих в настоящее время источников для воспроизведения стандартного излучения МКО. Существуют другие примеры типовых источников, разработанных различными иссле-

дователями [729], однако неизвестно, можно ли выпускать серийно точные дубликаты этих источников. Неизвестно также, насколько эти источники стабильны в течение длительного срока эксплуатации как в отношении абсолютной величины потока, так и в отношении относительного спектрального распределения. Например, было показано [611], что спектральное распределение некоторых ксеноновых дуговых ламп высокого давления сильно меняется,

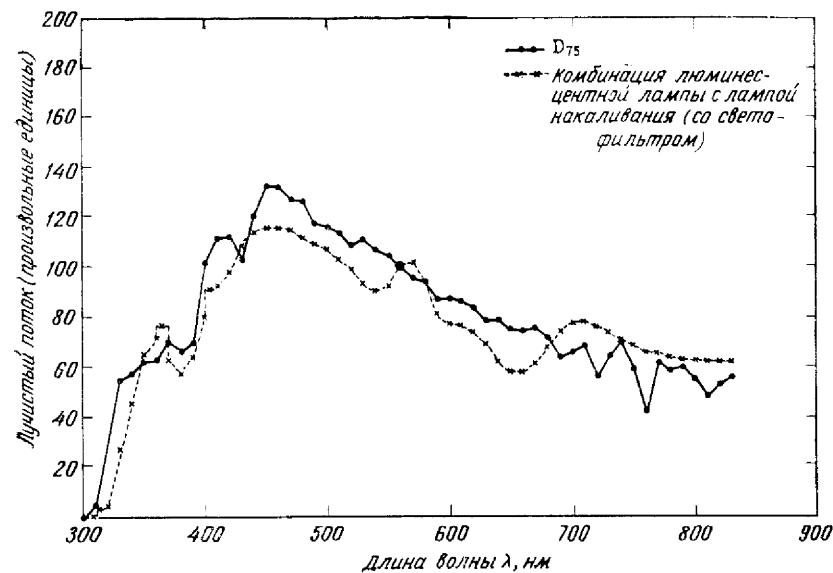


Рис. 2.10. Относительное спектральное распределение энергии комбинации излучения люминесцентной лампы с фильтрованным излучением лампы накаливания в сравнении с распределением стандартного излучения D_{75} МКО [729]. Люминесцентная лампа обеспечивает основную часть потока в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Обе лампы установлены в одном осветительном приборе.

особенно в коротковолновой части спектра, уже после 75 ч эксплуатации. Эти изменения приписывались образованию слоя вольфрама и отложению небольшого количества железа на внутренней поверхности кварцевой колбы лампы.

Другая проблема, которая должна быть решена перед разработкой рекомендаций для стандартного источника D , заключается в оценке качества воспроизведения определенным источником заданного спектрального распределения стандартного излучения, например D_{65} . Опыт показывает, что почти во всех случаях не обязательно иметь источник, точно воспроизводящий излучение D_{65} . Колориметрическая оценка, которая заключается в визуаль-

ном цветовом сравнении двух образцов при освещении D_{65} , часто бывает вполне приемлемой, несмотря на различия спектрального распределения реального источника и D_{65} .

Введение показателя качества воспроизведения, убедительного с точки зрения колориметрии и позволяющего руководствоваться им при выборе источника, соответствующего данной задаче, представляет известные трудности. Некоторые предложения по этому вопросу уже имеются [44, 543, 729], однако международного соглашения по оценке качества пока не достигнуто.

СТАНДАРТ АПЕРТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

В качестве эталона при проведении измерений апертурного коэффициента отражения МКО рекомендует совершенный отражающий рассеиватель.

Совершенный отражающий рассеиватель определяется как идеальный однородный рассеиватель с коэффициентом отражения, равным единице.

Хотя реальных поверхностей со свойствами совершенного отражающего рассеивателя не существует, с помощью специальных методов возможно проградуировать соответствующие «рабочие стандарты» в абсолютных единицах [80, 187, 374, 455].

Рабочие стандарты для измерений апертурного коэффициента отражения называются также «белыми стандартами». В последние годы в качестве соответствующих белых стандартов вместо ранее применявшихся поверхностей с нанесенной окисью магния используются диски, спрессованные из порошков окиси магния (MgO) или сульфата бария ($BaSO_4$). Диски легко прессуются с помощью специальных серийных порошковых прессов. Чистые порошки MgO или $BaSO_4$ могут быть приобретены расфасованными в бутылках, на которых указаны абсолютные значения коэффициента отражения. Величина спектрального коэффициента отражения таких рабочих стандартов несколько меняется в зависимости от длины волны и заключена в пределах 0,970—0,985 в видимом участке спектра.

В качестве рабочих стандартов используются также и другие материалы, например керамические плитки или плотные молочные стекла. Трудно отдать предпочтение какому-то одному материалу, поскольку все они имеют определенные ограничения в их применении. Существуют проблемы поддержания неизменными отражающих свойств рабочих стандартов в течение длительного времени: пыль, влага, облучение ультрафиолетом, неправильное обращение и так далее — все эти факторы по-разному воздействуют на различные материалы.

СТАНДАРТНЫЕ УСЛОВИЯ ОСВЕЩЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

МКО рекомендует приводить колориметрическую характеристику непрозрачных образцов при одном из следующих условий освещения и наблюдения.

1. 45/0: Образец освещается одним или несколькими пучками, оси которых составляют угол $45 \pm 5^\circ$ относительно нормали к поверхности образца. Угол между направлением наблюдения и нормалью к образцу не должен превышать 10° . Угол между осью освещающего пучка и любым его лучом не должен превышать 5° . Те же ограничения должны быть соблюдены и для наблюдаемого пучка.

2. 0/45: Образец освещается пучком, ось которого составляет с нормалью к образцу угол не более 10° . Образец наблюдается под углом $45 \pm 5^\circ$ относительно нормали. Угол между осью освещающего пучка и любым его лучом не должен превышать 5° . Те же ограничения должны быть соблюдены и для наблюдаемого пучка.

3. дифф/0: Образец освещается диффузно с помощью интегрирующей сферы. Угол между нормалью к образцу и осью пучка наблюдения не должен превышать 10° . Интегрирующая сфера может иметь любой диаметр при условии, что суммарная площадь отверстий не превышает 10% внутренней отражающей поверхности сферы. Угол между осью наблюдаемого пучка и любым его лучом не должен превышать 5° .

4. 0/дифф: Образец освещается пучком, ось которого составляет с нормалью к образцу угол не более 10° . Отраженный поток собирается с помощью интегрирующей сферы. Угол между осью освещающего пучка и любым его лучом не должен превышать 5° . Интегрирующая сфера может иметь любой диаметр при условии, что суммарная площадь отверстий не превышает 10% внутренней отражающей поверхности сферы.

Упомянутые четыре условия освещения и наблюдения схематически представлены на рис. 2.11. Для условий дифф/0 и 0/дифф приняты меры для уменьшения влияния зеркальной составляющей отраженного потока при смешанном отражении от образца: в конструкции интегрирующей сферы имеется *зеркальная ловушка*, эффективность которой зависит от размера, формы и положения.

Необходимо отметить, что в условиях 0/45 и 0/дифф образцы со смешанным отражением, т. е. одновременно и диффузным, и зеркальным, не должны измеряться при точном падении освещающего пучка по нормали. Это уменьшает возможность внесения в измерения систематической погрешности, обусловленной взаимными отражениями света между образцом и оптикой осветителя; при условии 0/дифф это дает возможность проводить измерения

как с исключением зеркальной составляющей (при введенной ловушке), так и без исключения последней (при снятой ловушке).

На рис. 2.11 показана также небольшая перегородка, размещенная в интегрирующей сфере между образцом и освещаемой

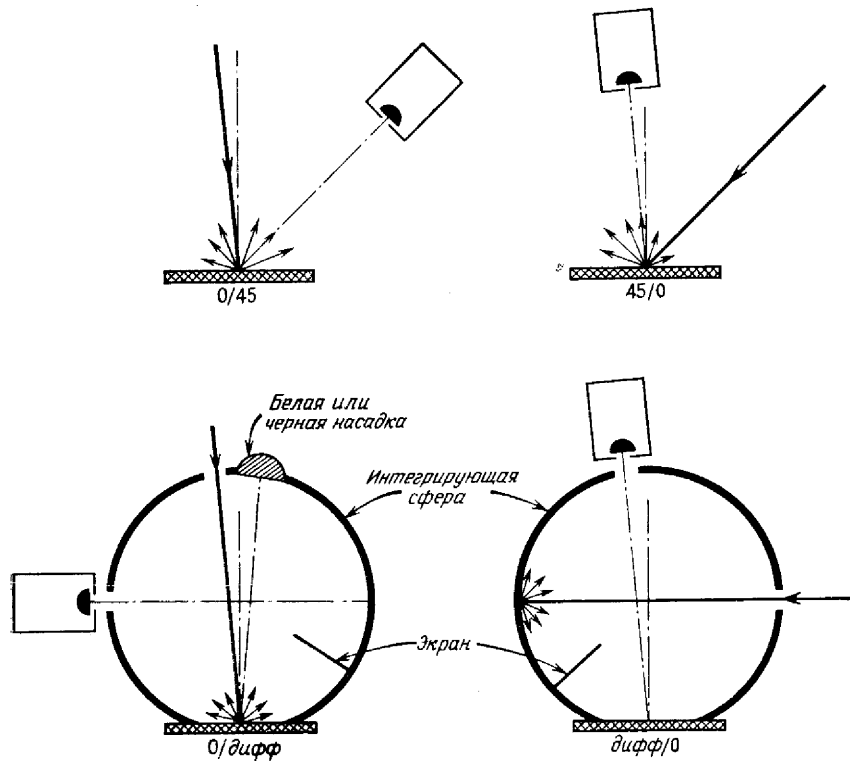


Рис. 2.11. Принципиальная схема, иллюстрирующая четыре геометрии освещения и наблюдения, стандартизованные МКО для измерения апертурного коэффициента отражения.

или наблюдаемой частью стенки сферы. Эта перегородка уменьшает возможность попадания на образец или стенку прямого отраженного света. Прямой отраженный поток мог бы до некоторой степени нарушить условие диффузности освещения или наблюдения.

Вспомним ранее обсуждавшееся определение апертурного коэффициента отражения (рис. 2.2) и его экстремальных случаев — пространственно ориентированной составляющей коэффициента отражения и коэффициента отражения (для всей полу-сферы). Вышеприведенные условия освещения и наблюдения

соответствуют измерению следующих величин. При геометрии 0/45 пучок света падает нормально к поверхности, а апертурный коэффициент отражения (или его направленная составляющая) $\beta_{0/45}$ измеряется под углом 45° к поверхности; при геометрии 45/0 пучок света падает под углом 45° к поверхности, а апертурный коэффициент отражения (или его направленная составляющая) $\beta_{45/0}$ измеряется в вертикальном направлении.

При дифф/0 пучок света падает нормально, а апертурный коэффициент диффузного отражения измеряется так, чтобы зеркально отраженная составляющая не регистрировалась; при 0/дифф пучок света диффузно освещает поверхность, а измерения апертурного коэффициента отражения (или его вертикальной составляющей) производятся по нормали к поверхности. Для измерения пространственно ориентированных составляющих коэффициента отражения требуется, чтобы телесный угол измерительного устройства был очень мал.

Детальное обсуждение технических аспектов измерений апертурного коэффициента отражения для различных видов материала, включая полупрозрачные, не входит в цели этой книги. Некоторые проблемы не имеют пока удовлетворительного решения. Однако Комитет МКО по фотометрическим характеристикам материалов готовит доклад, посвященный детальному обсуждению этого вопроса. Обсуждение предварительного проекта доклада уже было опубликовано [239]. Оно рекомендуется читателям, интересующимся данной проблемой.

СТАНДАРТНЫЙ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МКО 1931 г.

При сравнении промышленного изделия с цветовым стандартом каждому из группы наблюдателей может показаться, что количество вариантов описаний цветовых различий почти равно числу самих наблюдателей. Примерно один человек из 20 будет иметь аномальное зрение, и если изделие и стандарт образуют метамерную пару, его оценка при сравнении может совершенно отличаться от оценок наблюдателей с нормальным зрением. Другие расхождения в оценках появляются из-за различной степени пигментации глазных сред у различных людей, различного понимания задачи установки цветового равенства, различия цветовых наименований, в связи с неодинаковой подготовкой и тренированностью наблюдателей. В этой связи необходима проверка однозначности методов контроля цвета изготовителем и потребителем. Во многих случаях нашла целесообразным оговорить в контракте метод цветового контроля. Одним из таких методов является использование стандартного наблюдателя для интерпретации с его помощью спектрофотометрических данных.

Таблица 2.6

Стандартный колориметрической наблюдатель МКО 1931 г.

Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета			Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$		$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0.0014	0.0000	0.0065	580	0.9163	0.8700	0.0017
385	0.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	0.8163	0.0014
390	0.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	0.7570	0.0011
395	0.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	0.6949	0.0010
400	0.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	0.6310	0.0008
405	0.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	0.5668	0.0006
410	0.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	0.5030	0.0003
415	0.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	0.4412	0.0002
420	0.1344	0.0040	0.6456	620	0.8544	0.3810	0.0002
425	0.2148	0.0073	1.0391	625	0.7514	0.3210	0.0001
430	0.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	0.2650	0.0000
435	0.3285	0.0168	1.6230	635	0.5419	0.2170	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	640	0.4479	0.1750	0.0000
445	0.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	0.1382	0.0000
450	0.3362	0.0380	1.7721	650	0.2835	0.1070	0.0000
455	0.3187	0.0480	1.7441	655	0.2187	0.0816	0.0000
460	0.2908	0.0600	1.6692	660	0.1649	0.0610	0.0000
465	0.2511	0.0739	1.5281	665	0.1212	0.0446	0.0000
470	0.1954	0.0910	1.2876	670	0.0874	0.0320	0.0000
475	0.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	0.0232	0.0000
480	0.0956	0.1390	0.8130	680	0.0468	0.0170	0.0000
485	0.0580	0.1693	0.6162	685	0.0329	0.0119	0.0000

МКО рекомендует брать за основу колориметрической характеристики цветовых стимулов удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, приведенные в табл. 2.6, во всех случаях, когда желательна корреляция с визуальным цветовым сравнением полей с видимым угловым размером от 1 до 4°.

Удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, показанные на рис. 2.12, определяют стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. Для каждой длины волны λ ординаты трех функций $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ указывают соответственно количества основных цветов X, Y и Z, которые для стандартного наблюдателя характеризуют цвет спектрального стимула единичной мощности.

Удельные координаты $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, называемые также функциями сложения стандартного колориметрического наблю-

Продолжение табл. 2.6

Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета			Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$		$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
490	0.0320	0.2080	0.4652	690	0.0227	0.0082	0.0000
495	0.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	0.0057	0.0000
500	0.0049	0.3230	0.2720	700	0.0114	0.0041	0.0000
505	0.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	0.0029	0.0000
510	0.0093	0.5030	0.1582	710	0.0058	0.0021	0.0000
515	0.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	0.0015	0.0000
520	0.0633	0.7100	0.0782	720	0.0029	0.0010	0.0000
525	0.1096	0.7932	0.0573	725	0.0020	0.0007	0.0000
530	0.1655	0.8620	0.0422	730	0.0014	0.0005	0.0000
535	0.2257	0.9149	0.0298	735	0.0010	0.0004	0.0000
540	0.2904	0.9540	0.0203	740	0.0007	0.0002	0.0000
545	0.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	0.0002	0.0000
550	0.4334	0.9950	0.0087	750	0.0003	0.0001	0.0000
555	0.5121	1.0000	0.0057	755	0.0002	0.0001	0.0000
560	0.5945	0.9950	0.0039	760	0.0002	0.0001	0.0000
565	0.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	0.0000	0.0000
570	0.7621	0.9520	0.0021	770	0.0001	0.0000	0.0000
575	0.8425	0.9154	0.0018	775	0.0001	0.0000	0.0000
580	0.9163	0.8700	0.0017	780	0.0000	0.0000	0.0000
Сумма					21.3714	21.3711	21.3715

дателя МКО 1931 г., вычислены на основе измерений с полем зрения в 2°, проведенных Гилдом [205] для 7 наблюдателей, объединенных с подобными измерениями Райта [702] для 10 наблюдателей и дополненных измерениями Райта для 35 наблюдателей с целью более надежного определения влияния пигментации глазных сред.

Экспериментальный метод, использованный Гилдом и Райтом, является в принципе одним из методов, обсуждавшихся в разделе «Уравнивание по цвету», в частности в параграфе «Функции сложения цветов». Анализ экспериментальных данных Гилда и Райта первоначально был проведен относительно монохроматических основных стимулов с длинами волн 700,0, 546,1 и 435,8 нм соответственно для R (красного), G (зеленого) и B (синего) цветов (рис. 1.18). Полученные таким образом функции сложения $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ были затем использованы для расчета посредством линейного преобразования функций сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

Как уже было показано, в отличие от функций $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, экспериментально полученных Гилдом и Райтом (рис. 1.18), новые функции $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ не имеют отрицательных значений по всему спектру. Эта особенность была заложена в уравнения линейной трансформации для преобразования функций

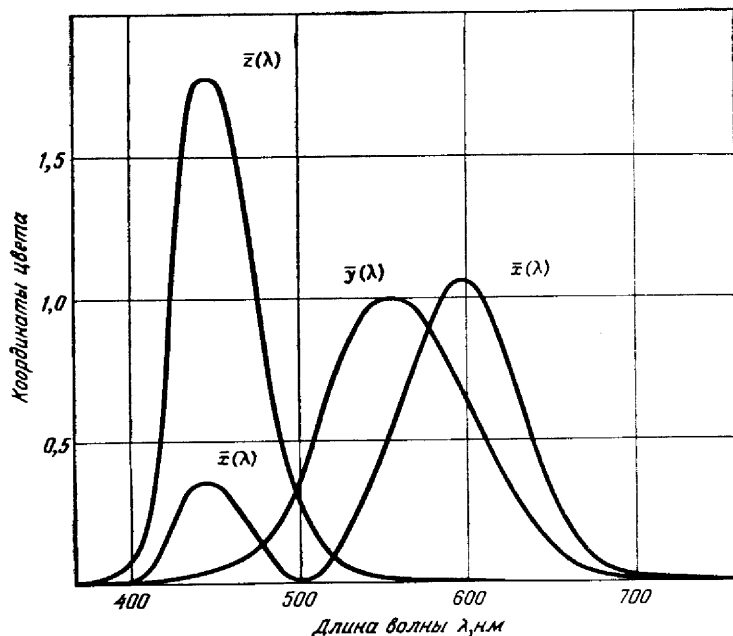


Рис. 2.12. Удельные координаты цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ монохроматических стимулов постоянной мощности.

Эти три функции представляют собой функции сложения стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. Кривые нанесены по данным табл. 2.6.

$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ в функции $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ с целью упрощения колориметрических расчетов, использующих функции сложения [313].

Другой важной особенностью функций $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ является то обстоятельство, что функция $\bar{y}(\lambda)$ идентична стандартной функции относительной световой эффективности $V(\lambda)$ колбочкового зрения нормального наблюдателя (рис. 1.2). Функция $V(\lambda)$ определяет стандартного фотометрического наблюдателя МКО 1924 г., и, следовательно, стандартная колориметрическая система МКО 1931 г. включает в себя основной стандарт фотометрии. Фактически эта особенность была заложена в экспери-

ментальную аппаратуру, использованную Гилдом и Райтом. Оба исследователя, по существу, ограничились измерением спектральных координат цветности вместо удельных координат. Объединив измеренные значения спектральных координат цветности с уже известной функцией $V(\lambda)$, они смогли рассчитать удельные координаты $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$. Для знакомства с этим методом интересующийся читатель может обратиться к [736].

Координаты цветности $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ спектральных стимулов рассчитываются обычным способом по значениям ординат кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$:

$$\begin{aligned} x(\lambda) &= \frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}, \\ y(\lambda) &= \frac{\bar{y}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}, \\ z(\lambda) &= \frac{\bar{z}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

откуда

$$x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda) = 1.$$

В табл. 2.7 приведены значения $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, рассчитанные на основе этих уравнений с использованием величин $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ из табл. 2.6.

Цветовой график x, y МКО 1931 г. Цветовой график x, y МКО 1931 г. приведен на рис. 2.13. Связь этого графика с трехмерным цветовым пространством МКО 1931 г., базирующимся на основных цветах X, Y и Z , обсуждалась в предыдущей главе (рис. 1.21).

Цветовой график представляет собой единичную плоскость ($X + Y + Z = 1$) трехмерного цветового пространства. Векторы основных цветов пересекают единичную плоскость в вершинах цветового треугольника. Эти вершины имеют следующие координаты:

$$(X): x = 1, \quad y = 0,$$

$$(Y): x = 0, \quad y = 1,$$

$$(Z): x = 0, \quad y = 0.$$

Спектральные цвета, также представляемые в виде векторов, пересекают единичную плоскость по линии спектральных цветностей. Координаты цветности точек этой линии для всех стимулов с длиной волны λ от 380 до 780 нм приведены в табл. 2.6.

Цветности двухкомпонентных смесей стимулов представлены точками прямой линии цветового графика, соединяющей две

Координаты цветности спектральных излучений в системе МКО 1931 г.

Длина волны λ (нм)	Координаты цветности			Длина волны λ (нм)	Координаты цветности		
	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$		$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0.1741	0.0050	0.8209	580	0.5125	0.4866	0.0009
385	0.1740	0.0050	0.8210	585	0.5448	0.4544	0.0008
390	0.1738	0.0049	0.8213	590	0.5752	0.4242	0.0006
395	0.1736	0.0049	0.8215	595	0.6029	0.3965	0.0006
400	0.1733	0.0048	0.8219	600	0.6270	0.3725	0.0005
405	0.1730	0.0048	0.8222	605	0.6482	0.3514	0.0004
410	0.1726	0.0048	0.8226	610	0.6658	0.3340	0.0002
415	0.1721	0.0048	0.8231	615	0.6801	0.3197	0.0002
420	0.1714	0.0051	0.8235	620	0.6915	0.3083	0.0002
425	0.1703	0.0058	0.8239	625	0.7006	0.2993	0.0001
430	0.1689	0.0069	0.8242	630	0.7079	0.2920	0.0001
435	0.1669	0.0086	0.8245	635	0.7140	0.2859	0.0001
440	0.1644	0.0109	0.8247	640	0.7190	0.2809	0.0001
445	0.1611	0.0138	0.8251	645	0.7230	0.2770	0.0000
450	0.1566	0.0177	0.8257	650	0.7260	0.2740	0.0000
455	0.1510	0.0227	0.8263	655	0.7283	0.2717	0.0000
460	0.1440	0.0297	0.8263	660	0.7300	0.2700	0.0000
465	0.1355	0.0399	0.8246	665	0.7311	0.2689	0.0000
470	0.1241	0.0578	0.8181	670	0.7320	0.2680	0.0000
475	0.1096	0.0868	0.8036	675	0.7327	0.2673	0.0000
480	0.0913	0.1327	0.7760	680	0.7334	0.2666	0.0000
485	0.0687	0.2007	0.7306	685	0.7340	0.2660	0.0000
490	0.0454	0.2950	0.6596	690	0.7344	0.2656	0.0000
495	0.0235	0.4127	0.5638	695	0.7346	0.2654	0.0000
500	0.0082	0.5384	0.4534	700	0.7347	0.2653	0.0000
505	0.0039	0.6548	0.3413	705	0.7347	0.2653	0.0000
510	0.0139	0.7502	0.2359	710	0.7347	0.2653	0.0000
515	0.0389	0.8120	0.1491	715	0.7347	0.2653	0.0000
520	0.0743	0.8338	0.0919	720	0.7347	0.2653	0.0000
525	0.1142	0.8262	0.0596	725	0.7347	0.2653	0.0000
530	0.1547	0.8059	0.0394	730	0.7347	0.2653	0.0000
535	0.1929	0.7816	0.0255	735	0.7347	0.2653	0.0000
540	0.2296	0.7543	0.0161	740	0.7347	0.2653	0.0000
545	0.2658	0.7243	0.0099	745	0.7347	0.2653	0.0000
550	0.3016	0.6923	0.0061	750	0.7347	0.2653	0.0000
555	0.3373	0.6589	0.0038	755	0.7347	0.2653	0.0000
560	0.3731	0.6245	0.0024	760	0.7347	0.2653	0.0000
565	0.4087	0.5896	0.0017	765	0.7347	0.2653	0.0000
570	0.4441	0.5547	0.0012	770	0.7347	0.2653	0.0000
575	0.4788	0.5202	0.0010	775	0.7347	0.2653	0.0000
580	0.5125	0.4866	0.0009	780	0.7347	0.2653	0.0000

точки, представляющие цветности смешиваемых стимулов. Поэтому прямая линия, соединяющая концы линии спектральных цветностей, сама является геометрическим местом цветностей аддитивных комбинаций крайних излучений видимого спектра. Более

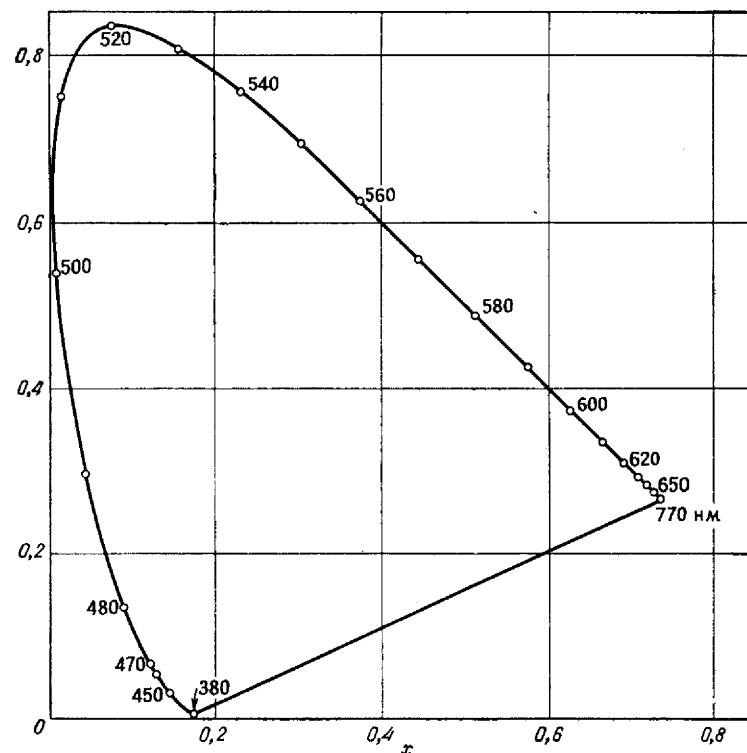
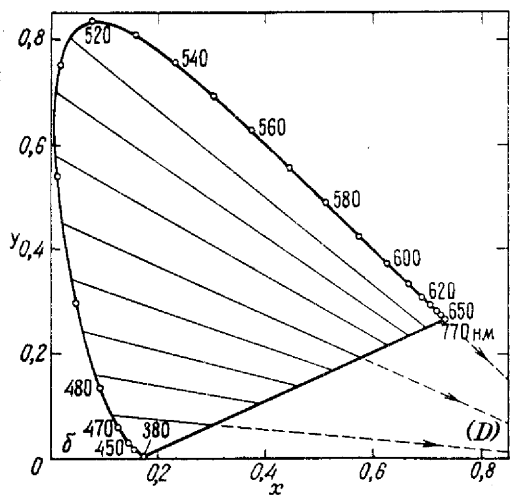
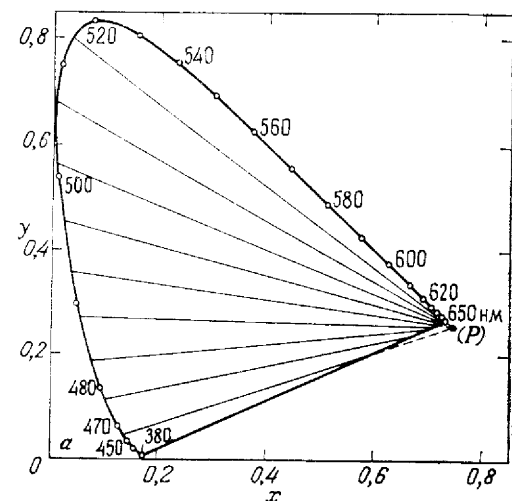


Рис. 2.13. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с линиями цветностей спектральных и пурпурных цветов.

того, участок, ограниченный линией спектральных цветностей и этой прямой линией (линией пурпурных цветов), является геометрическим местом всех цветностей аддитивной комбинации спектральных стимулов. Поскольку все реальные стимулы являются такими комбинациями, этот участок есть геометрическое место всех реальных цветностей. Точки на цветовом графике x, y вне этого участка представляют воображаемые цветности, т. е. цветности, которые нельзя воспроизвести реальными стимулами. Будет показано, что все цветности основных цветов системы МКО представлены именно такими точками, т. е. они являются воображаемыми цветами. Более того, будет показано, что любой

треугольник, включающий линию спектральных цветностей, должен иметь по меньшей мере две вершины вне площади реальных цветностей. Таким образом, видно, почему ни одна группа реальных цветов основных цветов не может дать положительных координат цветов спектральных излучений.

Уже из простого рассмотрения линии спектральной цветности вытекает ряд свойств нормального цветового зрения. Так, длинноволновый конец спектра (700—770 нм) представлен одной точкой



(табл. 2.7), т. е. эта часть спектра имеет постоянную цветность и часто обозначается как длинноволновый конечный интервал. Любая часть этого конечного интервала может быть полностью согласована по цвету с любой другой частью простым уравниванием яркостей обеих частей. Вблизи коротковолнового конца спектра (430—380 нм) такого точного постоянства цветностей нет, есть лишь некоторое приближение к нему.

Отметим также, что линия спектральных цветностей примерно от 540 до 700 нм в значительной степени приближается на цветовом графике к прямой линии. Это означает, что цветность любого спектрального излучения в этом интервале длин волн может быть воспроизведена комбинацией крайних цветностей интервала (540 и 700 нм), взятых в соответствующей пропорции.

Иногда этот диапазон называют «межинтервальным». Он представляет собой диапазон, используемый в аномалоскопе Нагеля для выявления аномалий цветового зрения с помощью уравнения Релея. Остальная часть линии спектральных цветностей (380—540 нм) значительно искривлена. Это означает, что аддитивные комбинации пар спектральных стимулов в этом диапазоне спектра не равны по цветности промежуточным спектральным излучениям, причем расхождение увеличивается с увеличением расстояния между длинами волн. Характер расхождения между цветностями двухкомпонентной смеси и промежуточного спектрального стимула иллюстрируется также на рис. 2.13. Поскольку линия спектраль-

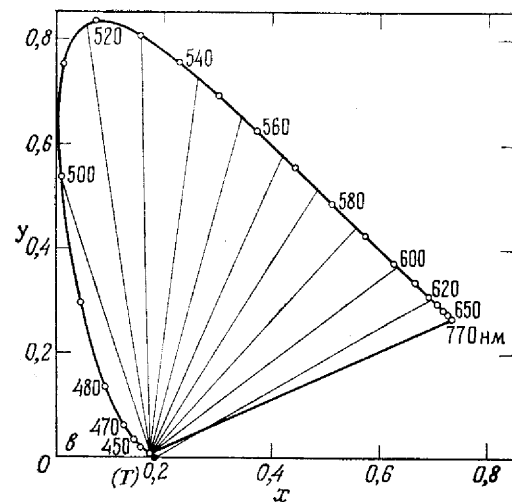


Рис. 2.14. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с линиями цветностей, неразличимых протанопами (а), дейтеранопами (б) и тританопами (в). Точки (P), (D), (T) представляют цветности основных цветов при дихроматическом зрении, играющих важную роль в некоторых теориях цветового зрения.

ных цветностей нигде не вогнута, отклонение цветности смеси от цветностей промежуточных спектральных стимулов должно быть направлено в сторону цветностей, представленных вблизи центра графика смеси. Если наблюдатель адаптирован к ахроматическим цветам (как это обычно и бывает), цветность смеси будет восприниматься менее насыщенной (более нейтральной), чем цветность спектрального излучения того же цветового тона.

Если не ограничивать рассмотрение двухкомпонентных смесей криволинейной частью линии спектральных цветностей, а распространить его также на межинтервальный диапазон и на конечной интервал, то расстояние между длинами волн отдельных компонент можно увеличивать до тех пор, пока смесь не станет сравнимой со стимулом (например, равноэнергетическим), который обычно воспринимается как вовсе не имеющий никакого цветового тона. В таких случаях говорят, что два спектральных стимула являются дополнительными по отношению к стимулу, воспринимаемому ахроматическим. Длины волн двух дополнительных стимулов можно найти из рис. 2.13, если провести прямую линию через точку цветности стимула, воспринимаемого ахроматическим, и прочитать значения длин волн на пересечении этой прямой с линией спектральных цветностей. Следует отметить, что дополнительными цветами к спектральным цветам от 380 до 494 нм (относительно равноэнергетического стимула с координатами $x = y = 0,333$) являются цвета, соответствующие интервалу длин волн 570—700 нм, и наоборот. Дополнительные цвета к спектральным цветам интервала 494—570 нм не могут быть представлены излучением какой-либо одной длины волны, а лишь смесью по крайней мере двух излучений, одно из которых находится в коротковолновой, а другое в длинноволновой частях спектра. Такие цвета, которые не воспроизводятся смесью ахроматического стимула с каким-либо спектральным, иногда называются несектральными, или пурпурными цветами.

Фундаментальный характер цветового графика хорошо проявляется в простоте, с которой на нем могут быть показаны цветности, смешиваемые наблюдателями, которые не различают цвета. На рис. 2.14, а подробно показаны цветности, неразличимые наблюдателями с протанопической формой двухцветного зрения. Все цветности, представленные на каждой из прямых линий рис. 2.14, а, выглядят одинаковыми для протанопа. Рис. 2.14, б и 2.14, в дают аналогичную информацию для дейтеранопической и тританопической форм двухцветного зрения (дихромазии). Все вместе эти три рисунка дополняют ранее проведенное обсуждение дихромазии. Они могут быть использованы для более точного описания цветов, смешиваемых различными типами дихроматов.

Прямые линии на каждом из рис. 2.14, а, 2.14, б и 2.14, в образуют простое семейство. Все линии каждого семейства пере-

секаются в общей точке вне области реальных цветностей. В соответствии с работой [330] эти точки имеют следующие координаты:

$$(P); \quad x_p = 0,747, \quad y_p = 0,253,$$

$$(D); \quad x_d = 1,000, \quad y_d = 0,000,$$

$$(T); \quad x_t = 0,180, \quad y_t = 0,000,$$

Приведенные координаты являются координатами цветности основных цветов при дихроматическом зрении; они играют, как уже было показано, важную роль в развитии некоторых теорий цветового зрения. Точное положение этих точек цветности неизвестно, и поэтому иногда используются, особенно для (D), другие наборы точек. Координаты, предложенные Питтом [529] и использованные при выводе уравнения (1.18), аналогичны вышеприведенным, за исключением (D), для которого Питт дает значения $x_d = 1,081$ и $y_d = -0,081$.

Очевидность пользы от цветового графика x, y МКО 1931 г. будет возрастать по мере перехода к последующим разделам этой книги.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СТАНДАРТНЫЙ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МКО 1964 г.

Колориметрическая система и стандартный колориметрический наблюдатель МКО, рекомендованные в 1931 г. для принятия во всем мире, получили чрезвычайно широкое распространение. Цветовой график (x, y) использовался для интерпретации бесчисленных текущих цветовых измерений во многих отраслях промышленности и оказался весьма полезным в качестве удовлетворительного способа отображения цветностей цветовых стимулов.

Стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1931 г. и система координат были рекомендованы не потому, что они основаны на статистически достоверном усреднении характеристик нормального цветового зрения; имело место лишь усреднение характеристик группы реальных наблюдателей с нормальным цветовым зрением. После многих лет широкого использования системы МКО 1931 г. было упомянуто лишь о нескольких отдельных случаях [295, 333], когда стандартный наблюдатель не мог прогнозировать координат цвета обычных окрашенных предметов, которые были получены визуально реальными наблюдателями. В частности, высказывалось предположение, что в диапазоне длин волн от 380 до 460 нм значения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ слишком малы. Причина такого расхождения заключена в использовании Гилдом и Райтом функции $V(\lambda)$ МКО 1924 г. для расчета данных $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ функций сложения. Рассмотрев эту проблему, Джадд [335] на основе вновь измеренных значений функции световой эффективности в

коротковолновой части спектра пересчитал функции сложения (табл. 5.8 в работе [736]). Затем Комитет по колориметрии МКО решил тщательно изучить проблему цветового сравнения с точки зрения отыскания основы для возможного пересмотра данных стандартного наблюдателя.

Рабочая программа была выполнена во всех деталях, в результате чего принято решение сохранить данные по стандартному

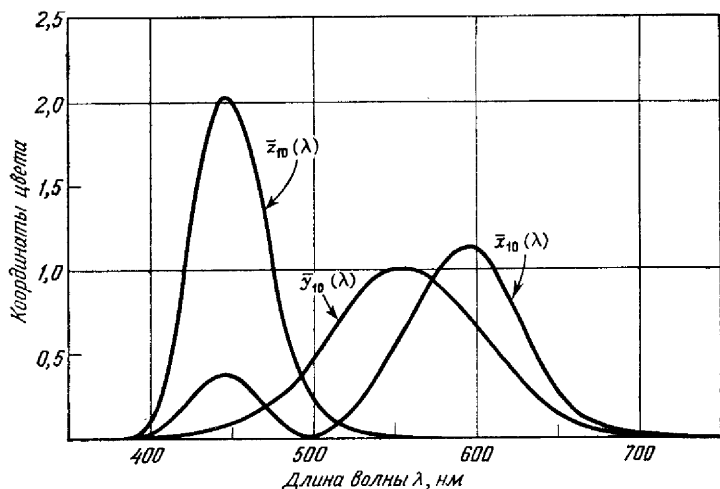


Рис. 2.15. Удельные координаты цвета $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ монохроматических стимулов постоянной мощности.

Эти три функции представляют собой функции сложения дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. Кривые нанесены по данным табл. 2.8.

колориметрическому наблюдателю МКО 1931 г., но дополнить их новыми функциями сложения $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$, рекомендуемыми для использования во всех случаях, когда желательна более точная корреляция с визуальным уравниванием по цвету полей с большими угловыми размерами ($>4^\circ$).

Ординаты функций сложения $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ определяют дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. Они приведены в табл. 2.8 и нанесены на график рис. 2.15. Эти данные были рассчитаны на основе результатов обширных визуальных экспериментов, касающихся цветового уравнивания, которые были выполнены Стайлсом и Бёрчем [633], а также Сперанской [612]. Методика их экспериментов основана, по существу, на тех же принципах, которые были описаны в разделе по цветовому уравниванию. Экспериментальные данные функции сложения были получены для поля зрения в 10° пря-

Дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1964 г.

Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета			Длина волны λ (нм)	Удельные координаты цвета		
	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$		$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.0002	0.0000	0.0007	580	1.0142	0.8689	0.0000
385	0.0007	0.0001	0.0029	585	1.0743	0.8256	
390	0.0024	0.0003	0.0105	590	1.1185	0.7774	
395	0.0072	0.0008	0.0323	595	1.1343	0.7204	
400	0.0191	0.0020	0.0860	600	1.1240	0.6583	
405	0.0434	0.0045	0.1971	605	1.0891	0.5939	
410	0.0847	0.0088	0.3894	610	1.0305	0.5280	
415	0.1406	0.0145	0.6568	615	0.9507	0.4618	
420	0.2045	0.0214	0.9725	620	0.8563	0.3981	
425	0.2647	0.0295	1.2825	625	0.7549	0.3396	
430	0.3147	0.0387	1.5535	630	0.6475	0.2835	
435	0.3577	0.0496	1.7985	635	0.5351	0.2283	
440	0.3837	0.0621	1.9673	640	0.4316	0.1798	
445	0.3867	0.0747	2.0273	645	0.3437	0.1402	
450	0.3707	0.0895	1.9948	650	0.2683	0.1076	
455	0.3430	0.1063	1.9007	655	0.2043	0.0812	
460	0.3023	0.1282	1.7454	660	0.1526	0.0603	
465	0.2541	0.1528	1.5549	665	0.1122	0.0441	
470	0.1956	0.1852	1.3176	670	0.0813	0.0318	
475	0.1323	0.2199	1.0302	675	0.0579	0.0226	
480	0.0805	0.2536	0.7721	680	0.0409	0.0159	
485	0.0411	0.2977	0.5701	685	0.0286	0.0111	
490	0.0162	0.3391	0.4153	690	0.0199	0.0077	
495	0.0051	0.3954	0.3024	695	0.0138	0.0054	
500	0.0038	0.4608	0.2185	700	0.0096	0.0037	
505	0.0154	0.5314	0.1592	705	0.0066	0.0026	
510	0.0375	0.6067	0.1120	710	0.0046	0.0018	
515	0.0714	0.6857	0.0822	715	0.0031	0.0012	
520	0.1177	0.7618	0.0607	720	0.0022	0.0008	
525	0.1730	0.8233	0.0431	725	0.0015	0.0006	
530	0.2365	0.8752	0.0305	730	0.0010	0.0004	
535	0.3042	0.9238	0.0206	735	0.0007	0.0003	
540	0.3768	0.9620	0.0137	740	0.0005	0.0002	
545	0.4516	0.9822	0.0079	745	0.0004	0.0001	
550	0.5298	0.9918	0.0040	750	0.0003	0.0001	
555	0.6161	0.9991	0.0011	755	0.0002	0.0001	
560	0.7052	0.9973	0.0000	760	0.0001	0.0000	
565	0.7938	0.9824		765	0.0001		
570	0.8787	0.9556		770	0.0001		
575	0.9512	0.9152		775	0.0000		
580	1.0142	0.8689		780	0.0000		
					23.3294	23.3324	23.3343

мым методом, в котором в отличие от аналогичных экспериментов Гилда и Райта не использовалась существующая функция относительной световой эффективности, а использовались фактические измерения относительного лучистого потока исследуемого спектрального стимула.

Расчет усредненных функций сложения по данным Стайлса — Бёрча и Сперанской, удобным для практической колориметрии, был выполнен Джаддом [97] и основывался на использовании координатной системы, подобной системе, связанной со стандартным колориметрическим наблюдателем МКО 1931 г.

Прежде чем принять в 1964 г. новые функции сложения, были проведены специально разработанные эксперименты (так называемые полевые испытания для оценки как функций сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ [84, 363, 634], так и функций $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ [505, 634, 700, 725]). Хотя результаты этих полевых испытаний не были целиком удовлетворительными, Комитет по колориметрии МКО решил, что стандартные функции сложения МКО 1931 г. достаточно пригодны для большинства практических колориметрических задач при малых угловых размерах поля зрения ($1-4^\circ$), и не рекомендовал вносить изменения в эти функции. Было решено также, что для больших полей зрения ($>4^\circ$) в большинстве практических случаев применение функций $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ удовлетворительно прогнозирует метамерное цветовое равенство. Эти функции сложения должны рассматриваться в качестве дополнительных к функциям 1931 г.

Полевые испытания, проведенные различными исследователями после принятия дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г., в целом подтверждают рекомендации МКО 1964 г. [345]. Имеется тенденция ко все более широкому использованию нового стандартного наблюдателя в промышленности. Сделать правильный выбор между стандартными наблюдателями МКО 1931 г. и МКО 1964 г. не всегда бывает легко, некоторые вопросы, относящиеся к этой проблеме, будут обсуждаться несколько позже.

Координаты цветности $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$ спектральных стимулов могут быть получены по координатам цвета $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ с помощью уравнений (2.8), аналогичных уравнениям (2.7):

$$\begin{aligned} x_{10}(\lambda) &= \frac{\bar{x}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)}, \\ y_{10}(\lambda) &= \frac{\bar{y}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)}, \\ z_{10}(\lambda) &= \frac{\bar{z}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Координаты цветности спектральных излучений в системе МКО 1964 г. Таблица 2.9

Длина волны $\lambda(\text{нм})$	Координаты цветности			Длина волны $\lambda(\text{нм})$	Координаты цветности		
	$x_{10}(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$z_{10}(\lambda)$		$x_{10}(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$z_{10}(\lambda)$
380	0.1813	0.0197	0.7990	580	0.5386	0.4614	0.0000
385	0.1809	0.0195	0.7996	585	0.5654	0.4346	
390	0.1803	0.0194	0.8003	590	0.5900	0.4100	
395	0.1795	0.0190	0.8015	595	0.6116	0.3884	
400	0.1784	0.0187	0.8029	600	0.6306	0.3694	
405	0.1771	0.0184	0.8045	605	0.6471	0.3529	
410	0.1755	0.0181	0.8064	610	0.6612	0.3388	
415	0.1732	0.0178	0.8090	615	0.6731	0.3269	
420	0.1706	0.0179	0.8115	620	0.6827	0.3173	
425	0.1679	0.0187	0.8134	625	0.6898	0.3102	
430	0.1650	0.0203	0.8147	630	0.6955	0.3045	
435	0.1622	0.0225	0.8153	635	0.7010	0.2990	
440	0.1590	0.0257	0.8153	640	0.7059	0.2941	
445	0.1554	0.0300	0.8146	645	0.7103	0.2898	
450	0.1510	0.0364	0.8126	650	0.7137	0.2863	
455	0.1459	0.0452	0.8088	655	0.7156	0.2844	
460	0.1389	0.0589	0.8022	660	0.7168	0.2832	
465	0.1295	0.0779	0.7926	665	0.7179	0.2821	
470	0.1152	0.1090	0.7758	670	0.7187	0.2813	
475	0.0957	0.1591	0.7452	675	0.7193	0.2807	
480	0.0728	0.2292	0.6980	680	0.7198	0.2802	
485	0.0452	0.3275	0.6273	685	0.7200	0.2800	
490	0.0210	0.4401	0.5389	690	0.7202	0.2798	
495	0.0073	0.5625	0.4302	695	0.7203	0.2797	
500	0.0056	0.6745	0.3199	700	0.7204	0.2796	
505	0.0219	0.7526	0.2256	705	0.7203	0.2797	
510	0.0495	0.8023	0.1482	710	0.7202	0.2798	
515	0.0850	0.8170	0.0980	715	0.7201	0.2799	
520	0.1252	0.8102	0.0646	720	0.7199	0.2801	
525	0.1664	0.7922	0.0414	725	0.7197	0.2803	
530	0.2071	0.7663	0.0267	730	0.7195	0.2806	
535	0.2436	0.7399	0.0165	735	0.7192	0.2808	
540	0.2786	0.7113	0.0101	740	0.7189	0.2811	
545	0.3132	0.6813	0.0055	745	0.7186	0.2814	
550	0.3473	0.6501	0.0026	750	0.7183	0.2817	
555	0.3812	0.6182	0.0007	755	0.7180	0.2820	
560	0.4142	0.5858	0.0000	760	0.7176	0.2824	
565	0.4469	0.5531		765	0.7172	0.2828	
570	0.4790	0.5210		770	0.7169	0.2831	
575	0.5096	0.4904		775	0.7165	0.2835	
580	0.5386	0.4614		780	0.7161	0.2839	

откуда $x_{10}(\lambda) + y_{10}(\lambda) + z_{10}(\lambda) = 1$. В табл. 2.9 приведены значения $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$, рассчитанные на основе этих уравнений с использованием значений $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ из табл. 2.8.

Цветовой график x_{10} , y_{10} МКО 1964 г. Цветовой график x_{10} , y_{10} МКО 1964 г. показан на рис. 2.16. Он получается в трехмерном

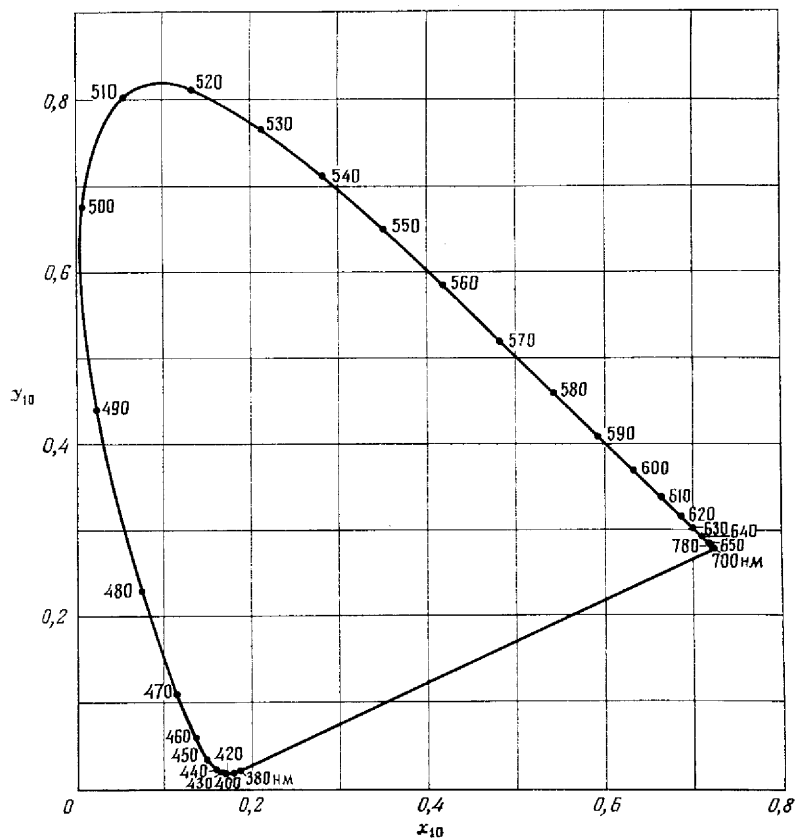


Рис. 2.16. Цветовой график x_{10} , y_{10} МКО 1964 г. с линиями цветности спектральных и пурпурных цветов.

цветовом пространстве с основными цветами X_{10} , Y_{10} , Z_{10} точно так же, как цветовой график x , y МКО 1931 г., обсуждавшийся ранее (рис. 2.13). Свойства графика x_{10} , y_{10} МКО 1964 г. аналогичны свойствам графика 1931 г., за исключением того обстоя-

тельства, что аддитивные смеси стимулов относятся теперь к наблюдению при больших полях зрения, т. е. полях с размерами $>2^\circ$.

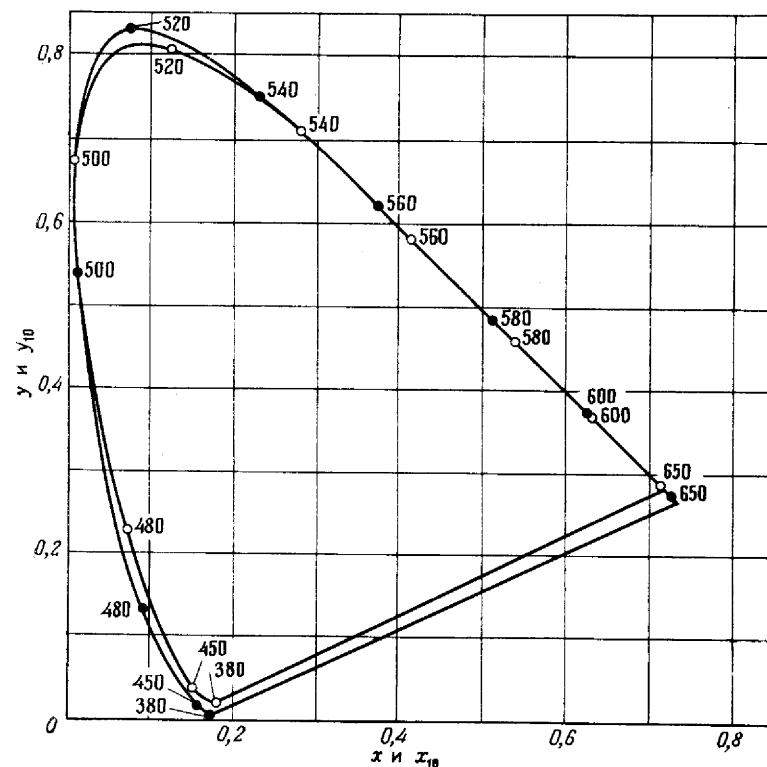


Рис. 2.17. Сравнение цветных графиков МКО 1964 г. (○) и 1931 г. (●). Сходство графиков объясняется тем обстоятельством, что оба трехмерных цветовых пространства МКО построены на основе аналогичных принципов.

Формы графиков 1931 и 1964 гг. очень похожи, но не идентичны, как это можно видеть на рис. 2.17.

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ЦВЕТА И ЦВЕТНОСТИ

Теперь мы подошли к такому этапу, когда можно использовать ранее обсуждавшиеся основные стандарты и общепринятый метод определения координат цвета цветового стимула.

Пусть речь идет о цвете насамосветящегося объекта. Ранее было установлено, что основными свойствами объекта, ответственными за его цвет, являются спектральные коэффициенты пропускания $\tau(\lambda)$ для прозрачных объектов и отражения $\beta(\lambda)$ для не-

прозрачных. Измерения спектральных коэффициентов пропускания и отражения проводятся на спектрофотометрах (рис. 2.3).

Пусть выбран соответствующий спектрофотометр и проведены измерения коэффициентов $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ исследуемых объектов. Измерения спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta(\lambda)$ выполняются, естественно, при одном из стандартизованных МКО условий освещения и наблюдения (рис. 2.11) и использовании соответствующим образом калиброванного рабочего стандарта коэффициента отражения.

Пусть также решено, что исследуемые объекты должны наблюдаться, например, при среднем дневном свете, и поэтому целесообразно использовать стандартное излучение D_{65} с относительным спектральным распределением энергии $S(\lambda)$, представляющим средний уровень дневного света (рис. 2.6, табл. 2.4).

Без учета постоянного коэффициента функция $S(\lambda) \Delta\lambda$ определяет спектральный лучистый поток, падающий на единицу поверхности объекта внутри малого интервала длин волн $\Delta\lambda$, содержащего λ . Спектральный лучистый поток, достигающий глаза наблюдателя, определяется для пропускающих свет предметов

$$\varphi(\lambda) \Delta\lambda = \tau(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \quad (2.9)$$

а для непрозрачных предметов

$$\varphi(\lambda) \Delta\lambda = \beta(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda. \quad (2.10)$$

Относительное спектральное распределение энергии $\varphi(\lambda) \Delta\lambda$ определяет цвет несамосветящегося предмета. Для него требуется определить координаты цвета в системе МКО.

Теперь вспомним, что координаты цвета каждого спектрального стимула с длиной волны λ в *равноэнергетическом спектре* задаются либо функциями $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, либо $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ в зависимости от углового размера стимула относительно глаза наблюдателя. Эти две группы функций сложения определяют соответственно стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. (рис. 2.12, табл. 2.6) и 1964 г. (рис. 2.15, табл. 2.8).

Спектральные компоненты $\varphi(\lambda) \Delta\lambda$ исследуемых объектов, как правило, не будут образовывать равноэнергетического спектра; они будут образовывать спектр, компоненты которого существенно изменяются с изменением длины волны. Однако, для того чтобы получить удельные координаты цвета спектральных компонентов, нужно просто взять произведения

$$\varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda, \quad \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda, \quad \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda,$$

или

$$\varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) \Delta\lambda, \quad \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda, \quad \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) \Delta\lambda.$$

для всех длин волн λ . Первая группа произведений дает координаты цвета монохроматических излучений относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г., а вторая группа — относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г.

Координаты цвета полного спектра $\varphi(\lambda) \Delta\lambda$ данного объекта получатся при сложении соответствующих координат для всех длин волн. Возможность простого сложения обусловлена применимостью законов Грассмана к аддитивной смеси цветовых стимулов (1.6).

Естественно возникает вопрос, насколько малыми должны быть интервалы $\Delta\lambda$ для получения точного результата. Они должны быть настолько малы, чтобы их дальнейшее уменьшение не изменяло результатов расчета. Если интервалы $\Delta\lambda$ становятся бесконечно малыми $\Delta\lambda = d\lambda$, требуемые суммы заменяются определенными интегралами. Поэтому координаты цвета X , Y , Z в системе МКО 1931 г. и X_{10} , Y_{10} , Z_{10} в системе МКО 1964 г. цветового стимула $\varphi(\lambda) d\lambda$ определяются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.11)$$

и

$$\begin{aligned} X_{10} &= k_{10} \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) d\lambda, \\ Y_{10} &= k_{10} \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda, \\ Z_{10} &= k_{10} \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где k и k_{10} — нормирующие коэффициенты, значения которых для несамосветящихся объектов удобно принять следующими:

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad \text{и} \quad k_{10} = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda}. \quad (2.13)$$

Путем введения нормирующего коэффициента k (или k_{10}) координаты цвета несамосветящихся объектов выражаются в масштабе, в котором координата цвета $Y = 100$ (или $Y_{10} = 100$), если объект является идеальным отражающим рассеивателем, т. е. когда объект является стандартом коэффициента отражения МКО с $\beta(\lambda)$, равным единице во всех длинах волн, или когда объект является идеальным пропускающим нерассеивающим фильтром с $\tau(\lambda)$, равным единице во всех длинах волн. Это следует непосредственно из уравнений (2.9)—(2.13), если принять $\beta(\lambda) = 1$.

Координаты цвета самосветящегося объекта также рассчитываются по уравнениям (2.11) или (2.12). Единственная разница заключается в том, что для самосветящегося объекта

$$\varphi(\lambda) d\lambda = S(\lambda) d\lambda. \quad (2.14)$$

Естественно, что в этом случае относительное спектральное распределение энергии $S(\lambda)$, определяющее цветовой стимул, как правило, будет возникать от нестандартного источника, например люминесцентной лампы. Для измерения $S(\lambda)$ применяется спектро-радиометр (рис. 2.1).

Из уравнения (2.14) следует, что координата цвета Y (или Y_{10}) любого самосветящегося объекта будет равна 100, как и в случае, когда несамосветящийся объект является идеальным отражающим рассеивателем или идеальным пропускающим нерассеивающим фильтром. Как было показано, это обеспечивается введением в уравнения (2.11) или (2.12) нормирующего коэффициента k (или k_{10}), определяемого уравнением (2.13).

При нормировании координат цвета с помощью коэффициента k (или k_{10}) игнорируется яркость данного цветового стимула. Яркость — важная фотометрическая величина, устанавливающая связь светлоты стимула со светлотой *первичного светового эталона*, основного эталона в фотометрии (см. Приложение, табл. А). Для расчета яркости L цветового стимула требуется, чтобы $S(\lambda)$ была измерена в единицах спектральной плотности энергетической яркости $L_{e\lambda}$, т. е. лучистого потока в ваттах на единицу площади на единицу телесного угла в единичном интервале длин волн ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). Получается

$$L = K_m \int_{\lambda} L_{e\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

с постоянным коэффициентом, равным максимальной световой эффективности излучения,

$$K_m \approx 680 \text{ лм/Вт.}$$

L измеряется в люменах на единицу площади на единицу телесного угла ($\text{лм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$) или в канделах на единицу площади ($\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$).

Если вновь обратиться к несамосветящимся предметам, можно видеть, что координата цвета Y , полученная по (2.11), также иногда представляет фотометрическую величину. Если спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta(\lambda)$ измерен при геометрии 0/45, его можно называть *спектральным коэффициентом яркости* (см. Стандартные условия освещения и наблюдения МКО, рис. 2.11). Интегральная величина Y в этом случае называется просто *коэффициентом яркости*. В известном смысле коэффициент яркости — это яркость объекта, измеренная через яркость идеаль-

ного отражающего рассеивателя, освещенного и наблюдаемого так же, как и объект. Если геометрия измерений (0/дифф) приводит к определению *спектрального коэффициента отражения* $\rho(\lambda)$ объекта, соответствующая координата Y называется *полной яркостью* отраженного от объекта излучения.

Здесь важно отметить, что расчет яркости, коэффициента яркости или полной яркости требует использования функции $\bar{y}(\lambda)$. Как уже упоминалось, функция $\bar{y}(\lambda)$ идентична стандартной функции световой эффективности МКО 1924 г. $V(\lambda)$, определяющей стандартного фотометрического наблюдателя при колбочковом зрении (рис. 1.2). Не существует фотометрического стандартного наблюдателя для больших полей зрения, поэтому функция $\bar{y}_{10}(\lambda)$ не имеет смысла относительно таких стандартных фотометрических величин, как яркость.

Для вычисления интегралов в уравнениях (2.11)—(2.13) и (2.15), определяющих координаты цвета и яркость цветового стимула, редко прибегают, или вообще не прибегают, к точному интегрированию. Вместо интегрирования используется приближенный метод суммирования, известный как *метод взвешенных ординат*.

Метод взвешенных ординат. При использовании этого метода спектр разбивается на конечное число одинаковых интервалов длин волн $\Delta\lambda$, а координаты цвета определяются путем вычисления следующих сумм. В колориметрической системе МКО 1931 г.

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z &= k \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}.$$

в системе МКО 1964 г.

$$\begin{aligned} X_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z_{10} &= k_{10} \sum_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (2.17)$$

где

$$k_{10} = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda}$$

Метод расчета координат цвета называется *методом взвешенных ординат*, поскольку каждая ордината кривой

$$\varphi(\lambda) \Delta\lambda = \beta(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda$$

или

$$\varphi(\lambda) \Delta\lambda = \tau(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda,$$

отложенная при заданном значении длины волны λ , взвешена ординатами функций сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ или $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ для этой длины волны.

Спектр $\varphi(\lambda)$ некоторых цветовых стимулов настолько сильно меняется по длинам волн, что величина интервала длин волн $\Delta\lambda$ должна быть принята равной 1 нм. Обычно использование значений $\Delta\lambda = 5$ нм или даже $\Delta\lambda = 10$ нм обеспечивает достаточную точность, и один из этих сравнительно больших интервалов используется для практических расчетов координат цвета.

Таблицы ординат функций сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$, определяющих соответственно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. и дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г., для интервала 1 нм в диапазоне спектра 360—830 нм опубликованы МКО [101]; их можно также найти в табл. 3.3 и 3.4 в книге «Наука о цвете» [736]. Сокращенные таблицы для $\Delta\lambda = 5$ нм в диапазоне 380—780 нм приведены в этой книге (табл. 2.6 и 2.8). Эти таблицы можно еще более сократить для $\Delta\lambda = 10$ нм, если значения считать через строчку.

После того как рассчитаны координаты цвета цветового стимула, по ним легко можно вычислить координаты цветности. В соответствии с уравнением (1.7) имеем

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z},$$

или

$$x_{10} = \frac{X_{10}}{X_{10}+Y_{10}+Z_{10}}, \quad y_{10} = \frac{Y_{10}}{X_{10}+Y_{10}+Z_{10}}. \quad (2.18)$$

ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

Пример 1. В табл. 2.10 показаны элементы расчета координат цвета X_{10} , Y_{10} , Z_{10} несамосветящегося объекта $\varphi(\lambda) \Delta\lambda = \beta(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda$. Объект представляет собой воображаемую пласт-

массу (рис. 2.4), которая при дневном свете выглядит рыжеватокоричневой. Спектральный апертурный коэффициент отражения образца $\beta(\lambda)$ был измерен на спектрофотометре; его значения в диапазоне длин волн 380—780 через 10 нм приведены во втором столбце табл. 2.10.

В третьем столбце табл. 2.10 дано также распределение $S(\lambda)$ стандартного излучения D_{65} МКО, взятое из табл. 2.1.

В четвертом, пятом и шестом столбцах табл. 2.10 приведены функции сложения $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$, характеризующие дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. Эти данные взяты из табл. 2.8.

Результаты первой стадии расчета, касающиеся произведений $\beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda)$, $\beta(\lambda) S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda)$, $\beta(\lambda) S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda)$ и $S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda)$, для каждой длины волны λ приведены в столбцах 7—10 табл. 2.10.

На второй стадии подсчитываются суммы (Σ_{λ}) произведений в каждом из столбцов 7—10, которые затем подставляются в уравнения для расчета k_{10} , X_{10} , Y_{10} , Z_{10} (нижняя часть табл. 2.10). Эти уравнения идентичны (2.17), за исключением того, что в них опущена величина $\Delta\lambda$, которая, как это можно легко проверить, не влияет на величину координат X_{10} , Y_{10} , Z_{10} .

Подсчитанные координаты цвета могут быть затем использованы для расчета координат цветности x_{10} , y_{10} данного стимула. Формулы и результаты такого расчета показаны в нижней части табл. 2.10.

Расчет координат цвета объектов с заданными спектральными характеристиками при освещении одним из стандартных излучений МКО может быть упрощен, если использовать специальные таблицы, приведенные в Приложении (табл. Б). В этих таблицах ординаты функции сложения МКО 1931 и 1964 гг. уже умножены на значения относительного спектрального распределения энергии для стандартных излучений А, В, С, D_{55} , D_{65} , D_{75} . Заданная функция $\beta(\lambda)$ может быть затем непосредственно умножена на значения $S(\lambda) \bar{x}(\lambda)$ и т. д. по соответствующей табл. Б.

Пример 2. В табл. 2.11 показаны элементы расчета координат цвета X , Y , Z самосветящегося объекта $\varphi(\lambda) \Delta\lambda = S(\lambda) \Delta\lambda$ — люминесцентной лампы. Относительное спектральное распределение энергии $S(\lambda) \Delta\lambda$, измеренное на спектрорадиометре, приведено во втором столбце табл. 2.11.

Спектральное распределение энергии $S(\lambda)$ показывает наличие, помимо сплошного спектра излучения люминофора лампы, эмиссионных линий ртути в длинах волн порядка 405, 436, 546 и 578 нм. Поток излучения, обусловленный эмиссионной линией и приведенный к интервалу $\Delta\lambda = 10$ нм, должен быть добавлен

Пример расчета координат цвета и цветности несамосветящегося объекта (образец пластмассы при освещении дневным светом)

Длина волны λ (нм)	Образец $\beta(\lambda)$	Стандартное излучение D_{55} $S(\lambda)$	Дополнительный стандартный наблюдатель МКО 1964 г. (угловые координаты цвета)			Произведения					
			$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\beta(\lambda)S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.102	50.0	0.0002	0.0000	0.0007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
390	0.245	54.6	0.0024	0.0003	0.0105	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
400	0.348	82.8	0.0191	0.0020	0.0860	0.6	0.1	2.5	0.1	2.5	0.2
410	0.419	91.5	0.0847	0.0088	0.3894	3.2	0.3	14.9	0.3	14.9	0.8
420	0.460	93.4	0.2045	0.0214	0.9725	8.8	0.9	41.8	0.9	41.8	2.0
430	0.477	86.7	0.3147	0.0387	1.5535	13.0	1.6	64.2	1.6	64.2	3.4
440	0.475	104.9	0.3837	0.0621	1.9673	19.1	3.1	98.0	3.1	98.0	6.5
450	0.470	117.0	0.3707	0.0895	1.9948	20.4	4.9	109.7	4.9	109.7	10.5
460	0.462	117.8	0.3023	0.1282	1.7454	16.5	7.0	95.0	7.0	95.0	15.1
470	0.455	114.9	0.1956	0.1852	0.3176	10.2	9.7	68.9	9.7	68.9	21.3
480	0.454	115.9	0.0805	0.2536	0.7721	4.2	13.3	40.6	13.3	40.6	29.4
490	0.459	108.8	0.0162	0.3391	0.4153	0.8	16.9	20.7	16.9	20.7	36.9
500	0.478	109.4	0.0038	0.4608	0.2185	0.2	24.1	11.4	24.1	11.4	50.4
510	0.517	107.8	0.0375	0.6067	0.1120	2.1	33.8	6.2	33.8	6.2	65.4
520	0.564	104.8	0.1177	0.7618	0.0607	7.0	45.0	3.6	45.0	3.6	79.8
530	0.616	107.7	0.2365	0.8752	0.0305	15.7	58.1	2.0	58.1	2.0	94.3
540	0.663	104.4	0.3768	0.9620	0.0137	26.1	66.6	0.9	66.6	0.9	100.4
550	0.692	104.0	0.5298	0.9918	0.0040	38.1	71.4	0.3	71.4	0.3	103.1
560	0.691	100.0	0.7052	0.9973	0.0000	48.7	68.9	0.0	68.9	0.0	99.7
570	0.680	96.3	0.8787	0.9556	0.0000	57.5	62.6	0.0	62.6	0.0	92.0
580	0.693	95.8	1.0142	0.8689	0.0000	67.3	57.7	0.0	57.7	0.0	83.2
590	0.741	88.7	1.1185	0.7774	0.0000	73.5	51.1	0.0	51.1	0.0	69.0
600	0.790	90.0	1.1240	0.6583	0.0000	79.9	46.8	0.0	46.8	0.0	59.2
610	0.826	89.6	1.0305	0.5280	0.0000	76.3	39.1	0.0	39.1	0.0	47.3
620	0.845	87.7	0.8563	0.3981	0.0000	63.5	29.5	0.0	29.5	0.0	34.9
630	0.852	83.3	0.6475	0.2835	0.0000	46.0	20.1	0.0	20.1	0.0	23.6
640	0.853	83.7	0.4316	0.1798	0.0000	30.2	12.6	0.0	12.6	0.0	15.0
650	0.853	80.0	0.2683	0.1076	0.0000	18.3	7.3	0.0	7.3	0.0	8.6
660	0.853	82.2	0.1526	0.0603	0.0000	10.7	4.2	0.0	4.2	0.0	5.0
670	0.853	82.3	0.0813	0.0318	0.0000	5.7	2.2	0.0	2.2	0.0	2.6
680	0.853	78.3	0.0409	0.0159	0.0000	2.7	1.1	0.0	1.1	0.0	1.2
690	0.853	69.7	0.0199	0.0077	0.0000	1.2	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
700	0.852	71.6	0.0096	0.0037	0.0000	0.6	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3
710	0.851	74.3	0.0046	0.0018	0.0000	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
720	0.849	61.6	0.0022	0.0008	0.0000	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
730	0.828	69.9	0.0010	0.0004	0.0000	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
740	0.790	75.1	0.0005	0.0002	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
750	0.750'	63.6	0.0003	0.0001	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
760	0.712	46.4	0.0001	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
770	0.680	66.8	0.0001	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
780	0.625	63.4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

$$\sum_{\lambda} \rightarrow 758.6 \quad 760.8 \quad 580.8 \quad 1161.7$$

Нормирующий коэффициент

$$K_{10} = 100 / \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) = 0,861$$

Координаты цветности x_{10} , y_{10} в системе МКО 1964 г.

$$X_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) x_{10}(\lambda) = 65,3$$

$$x_{10} = X_{10} / (X_{10} + Y_{10} + Z_{10}) = 0,3612$$

Координаты цвета

$$Y_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) y_{10}(\lambda) = 65,5$$

$$y_{10} = Y_{10} / (X_{10} + Y_{10} + Z_{10}) = 0,3623$$

в системе МКО 1964 г.

$$Z_{10} = k_{10} \sum_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) z_{10}(\lambda) = 50,0$$

Пример расчета координат цвета и цветности самосветящегося объекта (люминесцентная лампа)

Длина волны λ (нм)	Люминесцентная лампа $S(\lambda)$	Стандартный наблюдатель МКО 1931 г. (усредненные координаты цвета) $\bar{x}(\lambda)$	Процентная				
			$Y(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	
380	23.0	0.0014	0.0000	0.0065	0.0	0.0	0.1
390	27.5	0.0042	0.0001	0.0201	0.1	0.0	0.6
400	33.4	0.0143	0.0004	0.0679	0.5	0.0	2.3
410	43.6	0.0435	0.0012	0.2074	1.9	0.1	9.0
420	55.0	0.1344	0.0040	0.6456	7.4	0.2	35.5
430	67.7	0.2839	0.0116	1.3856	19.2	0.8	9.4
440	81.0	0.3483	0.0230	1.7471	28.2	1.9	141.5
450	94.2	0.3362	0.0380	1.7721	31.7	3.6	166.9
460	104.6	0.2908	0.0600	1.6692	30.4	6.3	174.6
470	111.1	0.1954	0.0910	1.2876	21.7	10.1	143.1
480	114.3	0.0956	0.1390	0.8130	10.9	15.9	92.9
490	115.5	0.0320	0.2080	0.4652	3.7	24.0	53.7
500	114.2	0.0049	0.3230	0.2720	0.6	36.9	31.1
510	111.4	0.0093	0.5030	0.1582	1.0	56.0	17.6
520	107.6	0.0633	0.7100	0.0782	6.8	76.4	8.4
530	103.6	0.1655	0.8620	0.0422	17.1	89.3	4.4
540	101.0	0.2904	0.9540	0.0203	29.3	96.4	2.1
550	99.8	0.4334	0.9950	0.0087	43.3	99.3	0.9
560	100.0	0.5945	0.9950	0.0039	59.5	99.5	0.4
570	101.1	0.7621	0.9520	0.0021	77.0	96.2	0.2
580	102.7	0.9163	0.8700	0.0017	94.1	89.3	0.2
590	102.7	1.0263	0.7570	0.0011	105.4	77.7	0.1
600	101.2	1.0622	0.6310	0.0008	107.5	63.9	0.1
610	99.5	1.0026	0.5030	0.0003	99.8	50.0	0.0
620	98.9	0.8544	0.3810	0.0002	84.5	37.7	0.0
630	97.4	0.6424	0.2650	0.0000	62.6	25.8	0.0
640	92.7	0.4479	0.1750	0.0000	41.5	16.2	0.0
650	96.5	0.2835	0.1070	0.0000	27.4	10.3	0.0
660	96.0	0.1649	0.0610	0.0000	15.8	5.9	0.0
670	63.6	0.0874	0.0320	0.0000	5.6	2.0	0.0
680	47.2	0.0468	0.0170	0.0000	2.2	0.8	0.0
690	38.1	0.0227	0.0082	0.0000	0.9	0.3	0.0
700	31.4	0.0114	0.0041	0.0000	0.4	0.1	0.0
710	25.3	0.0058	0.0021	0.0000	0.1	0.1	0.0
720	20.5	0.0029	0.0010	0.0000	0.1	0.0	0.0
730	16.7	0.0014	0.0005	0.0000	0.0	0.0	0.0
740	13.5	0.0007	0.0002	0.0000	0.0	0.0	0.0
750	11.0	0.0003	0.0001	0.0000	0.0	0.0	0.0
760	9.0	0.0002	0.0001	0.0000	0.0	0.0	0.0
770	7.3	0.0001	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0
780	6.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0
405 ^a	77.7	0.0225	0.0006	0.1067	1.7	0.0	8.3
436 ^a	182.4	0.3332	0.0178	1.6497	60.8	3.2	300.9
546 ^a	100.8	0.3755	0.9844	0.0122	37.9	99.2	1.2
578 ^a	29.1	0.8849	0.8910	0.0017	25.8	25.9	0.0
			$\Sigma \lambda$	1337.2	1221.3	1205.5	

Нормирующий коэффициент

$$k = 100 / \sum S(\lambda)\bar{y}(\lambda) = 0,0819$$

Координаты цветности в системе МКО 1931 г.

$$x = \bar{X}/(\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}) = 0,3553$$

$$y = \bar{Y}/(\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}) = 0,3245$$

Координаты цвета

$$X = k \sum S_i(\lambda) \bar{x}(\lambda) = 109,5$$

$$Y = k \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) = 100,0$$

$$Z = k \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) = 98,7$$

в системе МКО 1931 г.

к потоку сплошного излучения в соответствующей длине волны. Добавочный поток излучения, создаваемый каждой из четырех линий ртути данной рассматриваемой люминесцентной лампы, приведен в нижней части второго столбца.

Наблюдатель, воспринимающий цветовой стимул, создаваемый люминесцентной лампой, представлен стандартным колориметрическим наблюдателем МКО 1931 г., который определяется функциями сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Ординаты этих функций приведены в третьем, четвертом и пятом столбцах табл. 2.11. Эти данные взяты из табл. 2.6. Значения для длин волн эмиссионных линий ртути получены методом интерполяции.

В шестом, седьмом и восьмом столбцах табл. 2.11 приведены результаты первой стадии расчета, касающиеся произведений $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ для каждой длины волны λ .

На второй стадии подсчитываются суммы ($\Sigma \lambda$) произведений каждого столбца, которые затем вводятся в уравнения для k , X , Y , Z , что показано в нижней части табл. 2.11.

Значения координат цвета используются для расчета координат цветности x , y данного самосветящегося цветового стимула.

Метод избранных ординат. Этот метод является альтернативным методу взвешенных ординат при расчете координат цвета. При методе избранных ординат спектр также разбивается на конечное число интервалов длин волн. Однако эти интервалы в данном случае меняются по ширине. Ширина $\Delta\lambda$ каждого спектрального интервала зависит от спектрального распределения энергии излучения $S(\lambda)$ и функций сложения наблюдателя. В частности, $\Delta\lambda$ выбирается так, чтобы произведение $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$ в срединной длине волны λ каждого интервала $\Delta\lambda$ было постоянным по всему спектру. Другая группа интервалов $\Delta\lambda$ выбирается так, чтобы обеспечить постоянство значений произведения $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$, третья группа — для значений произведения $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$.

Координаты цвета X , Y , Z самосветящегося объекта $\beta(\lambda)$ $S(\lambda)$ получаются простым суммированием значений спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta(\lambda)$, соответствующих срединным длинам волн λ каждого интервала. Полученные таким образом три суммы умножаются на коэффициенты, пропорциональные постоянным значениям $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$, $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$, $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$ соответственно. Абсолютные значения этих коэффициентов принимаются такими, чтобы коэффициент при сумме Y равнялся числу 100, деленному на число интервалов.

В табл. 2.12 приведены три группы по 30 выбранных ординат (срединные значения длин волн в нанометрах) для расчета координат цвета X , Y , Z в системе МКО 1931 г. объектов, освещаемых стандартным излучением А. Если взять вторую, пятую, восьмую

Таблица 2.12

Избранные ординаты для расчета координат цвета самосветящегося объекта в системе МКО 1931 г. относительно стандартного излучения А

Номера ординат	Излучение А		
	Длины волн для расчета координат цвета, нм		
	X	Y	Z
1	444,0	487,8	416,4
2 ¹⁾	516,9	507,7	424,9
3	544,0	517,3	429,4
4	554,2	524,1	432,9
5 ¹⁾	561,4	529,8	436,0
6	567,1	534,8	438,7
7	572,0	539,4	441,3
8 ¹⁾	576,3	543,7	443,7
9	580,2	547,8	446,0
10	583,9	551,7	448,3
11 ¹⁾	587,2	555,4	450,5
12	590,5	559,1	452,6
13	593,5	562,7	454,7
14 ¹⁾	596,5	566,3	456,8
15	599,4	569,8	458,8
16	602,3	573,3	460,8
17 ¹⁾	605,2	576,9	462,9
18	608,0	580,5	464,9
19	610,9	584,1	467,0
20 ¹⁾	613,8	587,9	469,2
21	616,9	591,8	471,6
22	620,0	595,9	474,1
23 ¹⁾	623,3	600,1	476,8
24	626,9	604,7	479,9
25	630,8	609,7	483,4
26 ¹⁾	635,3	615,2	487,5
27	640,5	621,5	492,7
28	646,9	629,2	499,3
29 ¹⁾	655,9	639,7	508,4
30	673,5	659,0	526,7
Нормирующие коэффициенты:			
для 30 ординат	3,661	3,333	1,185
для 10 ординат	10,984	10,000	3,555

¹⁾ Эти ординаты используются для сокращенного варианта расчета.

Примечание. Нормирующие коэффициенты подобраны таким образом, чтобы координата Y совершенного отражающего рефлексивателя или идеального пропускающего фильтра равнялась 100 000.

и т. д. ординату (на табл. 2.12 они отмечены единичками), можно получить разбиение на 10 интервалов. Значения соответствующих множителей приведены в нижней части таблицы.

Выборка значений кривой спектрального апертурного коэффициента отражения $\beta(\lambda)$ [или пропускания $\tau(\lambda)$] данного объекта для расчета каждой координаты цвета производится в различных длинах волн спектра. Чаще значения берутся в тех местах, где величины $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ максимальны, реже — у концов спектра.

Как метод избранных ординат, так и метод взвешенных ординат является лишь приближенным методом расчета координат цвета. Согласно исследованиям, посвященным оценке точности таких расчетов (например, [130]), метод взвешенных ординат дает удовлетворительную для большинства практических задач точность при $\Delta\lambda = 5$ нм. При $\Delta\lambda = 10$ нм во многих практических ситуациях точность также удовлетворительна, за исключением тех случаев, когда спектральные коэффициенты отражения $\beta(\lambda)$, или пропускания $\tau(\lambda)$, или спектральное распределение энергии $S(\lambda)$ резко меняются по спектру. Метод избранных ординат дает худшую точность по сравнению с методом взвешенных ординат, если не используется большое число ординат (100 или более). В цифровых вычислительных устройствах, часто связанных с устройством считывания спектрофотометров, почти всегда используется метод взвешенных ординат. Фактически в современной колориметрии метод избранных ординат больше не применяется.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНДАРТНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ МКО 1931 И 1964 ГГ.

Как было установлено ранее, МКО рекомендует, чтобы в тех случаях, когда желательна корреляция с визуальным уравниванием по цвету полей с угловыми размерами $1-4^\circ$, колориметрические характеристики цветового стимула, например координаты цвета, базировались на стандартном колориметрическом наблюдателе МКО 1931 г., определяемом функциями сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

МКО рекомендует использовать функции сложения $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ дополнительного стандартного наблюдателя 1964 г. тогда, когда желательна корреляция с визуальным уравниванием полей с размерами $>4^\circ$.

На рис. 2.18 представлены несколько полей зрения с различными угловыми размерами. Каждое поле поделено пополам: верхняя половина образует цветовой стимул № 1, нижняя — стимул № 2. Типичными малыми полями, к которым применим стандартный наблюдатель 1931 г., являются поля в $1, 2$ и 4° .

Напомним, что функции $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ получены на основе цветового равенства при поле в 2° . Типичным большим полем, к которому применим дополнительный стандартный наблюдатель 1964 г., является поле в 10° . В самом деле, функции $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ получены на основе цветового равенства при поле в 10° .

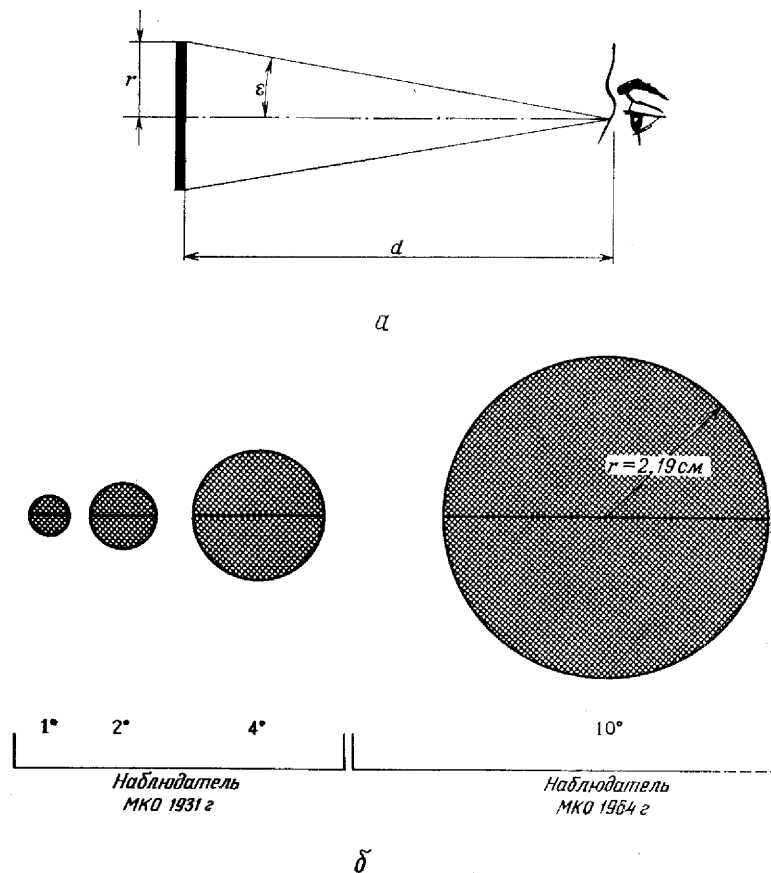


Рис. 2.18. Двухчастные поля зрения различных угловых размеров. Указанные на рисунке угловые размеры соответствуют дистанции наблюдения 25 см. Расчет углового размера поясняется верхним рисунком. а — угловой размер $= 2\varepsilon = 2 \operatorname{arctg}(r/d)$ (пример: если $d = 25$ см и $2\varepsilon = 10^\circ$, то $r = 2,19$ см); б — расстояние наблюдения 25 см по нормали к данной странице.

Поля, показанные на рис. 2.18, действительно очень малы с точки зрения практического уравнивания по цвету. В большинстве реальных случаев большие образцы (тканей или накресок), раз-

мером примерно 14×20 см, рассматриваются на расстоянии вытянутой руки перед окном или в специальной кабине, оборудованной искусственным источником дневного света. В таких случаях размеры поля составляют $\sim 10^\circ$ или более. Основная причина использования по возможности больших полей зрения заключается в увеличении точности уравнивания по цвету. На рис. 2.19

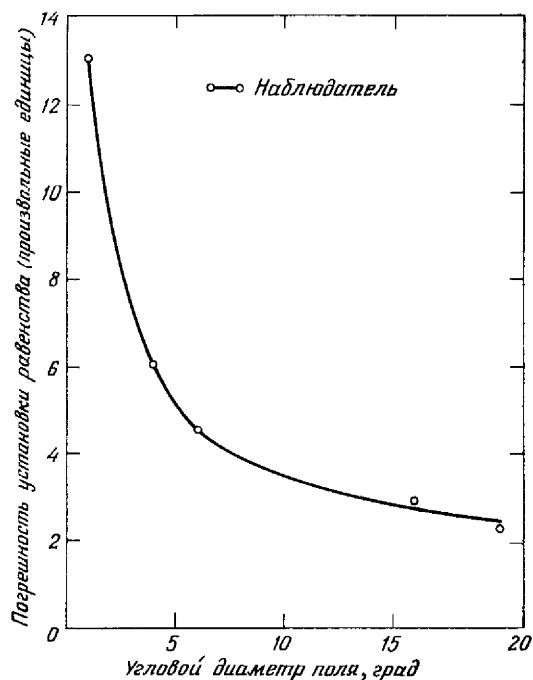


Рис. 2.19. Точность установки цветного равенства при различных угловых размерах поля зрения [313].

показано, как резко меняется точность установки цветного равенства при увеличении угловых размеров поля [312]. При увеличении углового размера поля от 2 до 10° эта точность может возрасти в 2,5 раза и более. Дальнейшее увеличение поля уже не позволяет значительно увеличить точность.

Важным фактором при сравнении метамерных стимулов обычно является угловой размер поля. Предположим, что имеются два образца с различными кривыми коэффициента отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda)$, которые при освещении стандартным излучением D_{65} [средний дневной свет, $S(\lambda)$] и наблюдении стандартным наблюдателем МКО 1931 г. $[\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)]$ идентичны по цвету, т. е. $X^{(1)} = X^{(2)}, Y^{(1)} = Y^{(2)}, Z^{(1)} = Z^{(2)}$. Два стимула $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda)$

и $\beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda)$ называются метамерными, потому что для стандартного наблюдателя МКО 1931 г. они одноцветны, в то время как их спектральные составы различны. Сразу же возникает вопрос, будут ли такие два стимула сравнимы по цвету для дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г.? В общем случае ответ

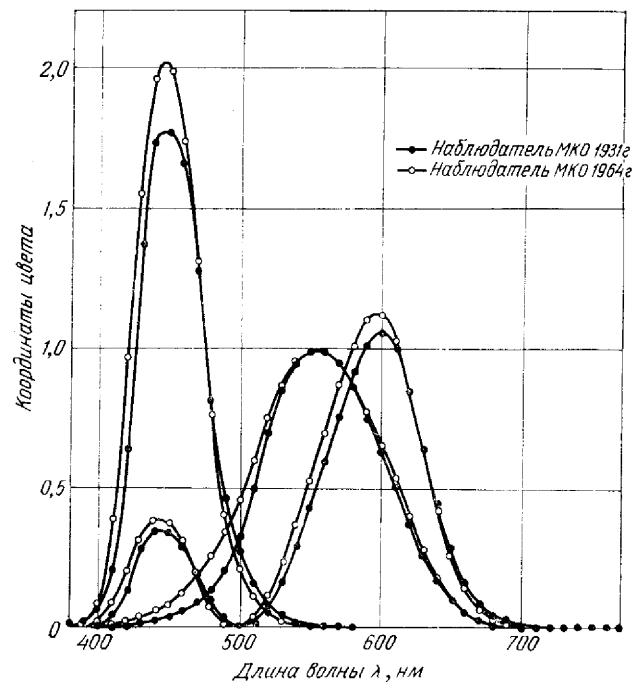


Рис. 2.20. Сопоставление функций сложения стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. с функциями сложения дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г.

Различия обусловлены разными угловыми размерами поля зрения, для которого определены оба наблюдателя: 2° для наблюдателя 1931 г. и 10° для наблюдателя 1964 г.

естественно будет отрицательным. Величина различия по цвету для наблюдателя МКО 1964 г. будет зависеть от величины и характера различий по спектру между двумя данными стимулами $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda)$. Иногда различия будут весьма заметными. Это может показаться неожиданным, поскольку различия между двумя группами функций сложения, определяющих стандартных наблюдателей МКО, не кажутся такими уж значительными (рис. 2.20). Тем не менее различия эти важны, и именно ими объясняются наблюдаемые на практике нарушения цветного равенства при переходе от поля зрения в 2° к полю зрения в 10° [42, 641].

Точно так же, если цветовое равенство установлено при поле в 10° , уменьшение поля до 2° может вызвать появление цветового различия между стимулами. Однако иногда отклонение от равенства, наблюдаемое в поле 2° будет проявляться менее четко в связи с уменьшением цветоразличительной чувствительности глаза для малых полей зрения (рис. 2.19).

Приведем численный пример, иллюстрирующий влияние углового размера поля на уравнивание по цвету стимулов с различными спектральными составами.

Предположим, что имеются четыре образца, кривые спектрального апертурного коэффициента отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$, $\beta^{(2)}(\lambda)$, $\beta^{(3)}(\lambda)$,

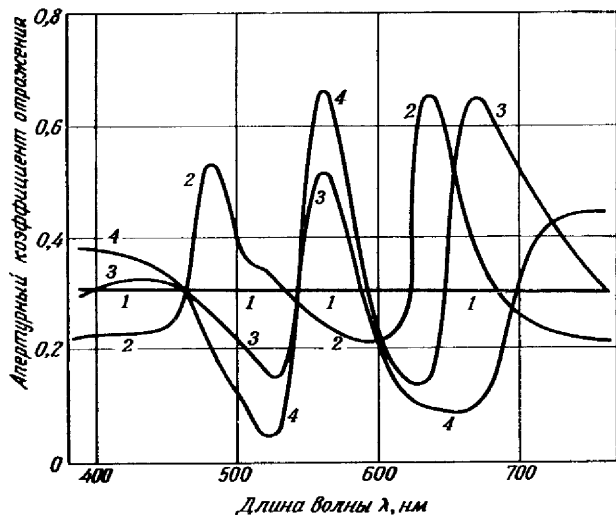


Рис. 2.21. Кривые спектрального апертурного коэффициента отражения четырех гипотетических образцов, которые при освещении стандартным излучением D_{65} образуют цветовые стимулы с одинаковыми координатами цвета относительно стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г.

$\beta^{(4)}(\lambda)$ которых представлены на рис. 2.21. При освещении этих образцов стандартным излучением МКО D_{65} и расчете координат цвета относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. имеем

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= X^{(2)} = X^{(3)} = X^{(4)}, \\ Y^{(1)} &= Y^{(2)} = Y^{(3)} = Y^{(4)}, \\ Z^{(1)} &= Z^{(2)} = Z^{(3)} = Z^{(4)}. \end{aligned}$$

Это означает, что для среднего наблюдателя с нормальным цветовым зрением, который наблюдает все четыре образца попарно при

дневном свете в разделенном пополам поле зрения в 2° , они будут равны по цвету.

При переходе от поля с угловым размером в 2° к полю в 10° нужно перейти от стандартного наблюдателя МКО 1931 г. к дополнительному наблюдателю МКО 1964 г. Сами стимулы $\beta^{(1)}(\lambda)$, $\beta^{(2)}(\lambda)$, $\beta^{(3)}(\lambda)$ и т. д. остаются, естественно, прежними, а расчет

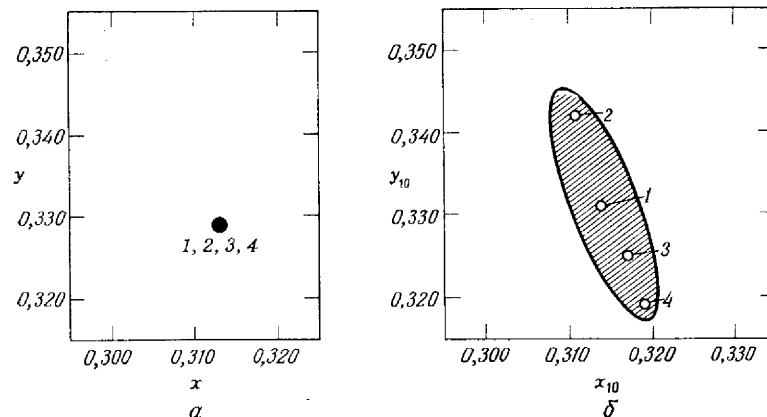


Рис. 2.22.

а) Часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с общей точкой цветности четырех несамосветящихся стимулов, одинаковых по цвету при наблюдении в поле 2° . Образцы, создающие эти стимулы, имеют спектральные характеристики, показанные на рис. 2.21. Источник освещения — стандартное излучение D_{65} МКО. б) Часть цветового графика x_{10}, y_{10} МКО 1964 г. с точками цветности (1—4) тех же четырех стимулов при наблюдении в поле 10° . Заштрихованный эллипс определяет область цветностей, в которую с вероятностью 95% попадают цветности всех несамосветящихся стимулов "метамерных стимулам 1—4.

координат цвета каждого стимула относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. оказывается другим, т. е.

$$\begin{aligned} X_{10}^{(1)} &\neq X_{10}^{(2)} \neq X_{10}^{(3)} \neq X_{10}^{(4)}, \\ Y_{10}^{(1)} &\neq Y_{10}^{(2)} \neq Y_{10}^{(3)} \neq Y_{10}^{(4)}, \\ Z_{10}^{(1)} &\neq Z_{10}^{(2)} \neq Z_{10}^{(3)} \neq Z_{10}^{(4)}. \end{aligned}$$

Это означает, что для среднего наблюдателя с нормальным цветовым зрением, который рассматривает все четыре образца попарно при дневном свете в разделенном пополам поле зрения в 10° , они различаются по цвету. Наибольшая разница в цвете — между 2 и 4 стимулами; наименьшая — между 3 и 4; различия между другими стимулами занимают промежуточное положение. Величину различий можно определить по рис. 2.22, на котором нанесены координаты цветности всех четырех стимулов. В то время как они имеют одинаковую цветность относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. (поле наблюдения 2°), цветности тех же стиму-

лов различаются при наблюдении в поле 10° (дополнительный стандартный наблюдатель МКО 1964 г.). Метамерные равенства, относящиеся к полю в 2° , нарушаются при поле в 10° .

Можно вычертить много других кривых спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$, соответствующих несамосвещающимся стимулам, метамерным при освещении стандартным излучением D_{65} относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г., и затем рассчитать их цветность относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. Точки, соответствующие их цветностям, распределяются вокруг точки со средней цветностью $x_{10} = 0,314$ и $y_{10} = 0,331$ и заполняют площадь, ограниченную эллипсом (рис. 2.22). Размер и ориентация этого эллипса может быть использована в качестве меры различия между наблюдателями с 2 и 10° полями зрения [634, 635, 718, 736].

Практическая ценность функций сложения для большого поля и соответственно целесообразность использования дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. неоспорима, тем не менее при уравнивании по цвету больших полей могут возникнуть некоторые специфические проблемы. Если сравниваются два стимула с подобными цветами, но различными спектральными составами, может возникнуть трудность при выполнении точного визуального цветового сравнения. Она обусловлена свойствами желтого пятна сетчатки, обсуждавшимися ранее в связи с рис. 1.5. Может оказаться, что два стимула уравниваются вблизи точки фиксации, но различаются по цвету в других местах. Или если два стимула согласуются по цвету, в центре поля цветовое равенство нарушается. Пятно в поле зрения, которое движется, когда сдвигается точка фиксации, часто называют *пятном Максвелла*, так как Максвеллу принадлежит честь первому описать это явление. Существование пятна Максвелла явилось важной причиной того, что в 1931 г. для колориметрических измерений было принято именно поле зрения в 2° и соответственно стандартный наблюдатель МКО 1931 г., базирующийся на таком поле. Тем не менее во многих случаях пятно Максвелла почти, или совсем, отсутствует из-за малой степени метамеризма двух стимулов; в других случаях можно иногда игнорировать сильное пятно Максвелла и получить общее цветовое равенство.

На первый взгляд, можно подумать, что обсуждаемое ранее различие между уравниванием по цвету при малых (2°) и больших (10°) полях зрения связано исключительно со свойствами пигмента желтого пятна сетчатки [195]; детальные исследования показали, что это справедливо лишь частично. Стайлс и Бёрч [632] сравнивали двух- и десятиградусные функции сложения, полученные для ряда наблюдателей, и нашли, что различия между двумя группами данных не могут быть полностью объяснены при допущении идентичности (или линейной связи) спектральной чувстви-

тельности рецепторных систем с различной оптической плотностью однородных слоев пигмента. Более вероятно, что, помимо пигментации желтого пятна, имеют место локальные вариации спектральной чувствительности колбочек, что вместе с *интрузией* (обесцвечиванием) палочек (главным образом в длинноволновом конце спектра) обуславливает наблюдаемые различия.

Возможная интрузия палочек представляет собой другую специфическую проблему в уравнивании по цвету больших полей. Когда МКО в 1964 г. принимала стандартного наблюдателя для большого поля, было четко показано, что функции сложения для большого поля, определяемые дополнительным стандартным наблюдателем, предназначены для применения при сравнениях, когда яркость и относительное спектральное распределение энергии сравниваемых стимулов таковы, что нельзя ожидать участия палочковых рецепторов зрительного механизма. Это условие является важным, поскольку интрузия палочек может нарушить прогноз стандартного наблюдателя [401].

Рекомендация МКО нуждается в ведении особых ограничений в пределах использования дополнительного стандартного наблюдателя. Установить такие ограничения, охватывающие все множество возможных на практике уровней яркости и относительных спектральных распределений, весьма трудно. Стайлс и Вышецки [637] предложили цифровой метод, которым можно пользоваться для определения, может ли ожидаться интрузия палочек при уравнивании по цвету данной пары стимулов в большом поле зрения. Однако если ожидается значительное участие палочек, упомянутый метод не позволяет точно определить характер и степень искажения цветового равенства. Были сделаны некоторые попытки с целью показать, как этот эффект может быть оценен в отдельных частных случаях цветового равенства, но до сих пор так и не появилось надежного и простого практического метода такой оценки.

Численные примеры, приведенные Стайлсом и Вышецки [637], определяют некоторые общие пути к оценке вероятности интрузии палочек. Цветовые стимулы, состоящие из смесей двух или трех спектральных линий или достаточно узких спектральных полос, с наибольшей вероятностью способствуют интрузии палочек. Различия в спектральных составах между метамерными стимулами такого рода экстремальны, и реакция (скотопическая) палочкового механизма на один из стимулов может быть совершенно отлична от аналогичной реакции на другой стимул, нарушая тем самым баланс реакций (фотопических) колбочковых механизмов. Особенно простой пример показан на рис. 2.23, а. В этом случае палочковый механизм в значительной степени участвует в процессе уравнивания по цвету двух стимулов с широко меняющимся диапазоном их яркостей. Только когда яркость обоих стимулов повышается

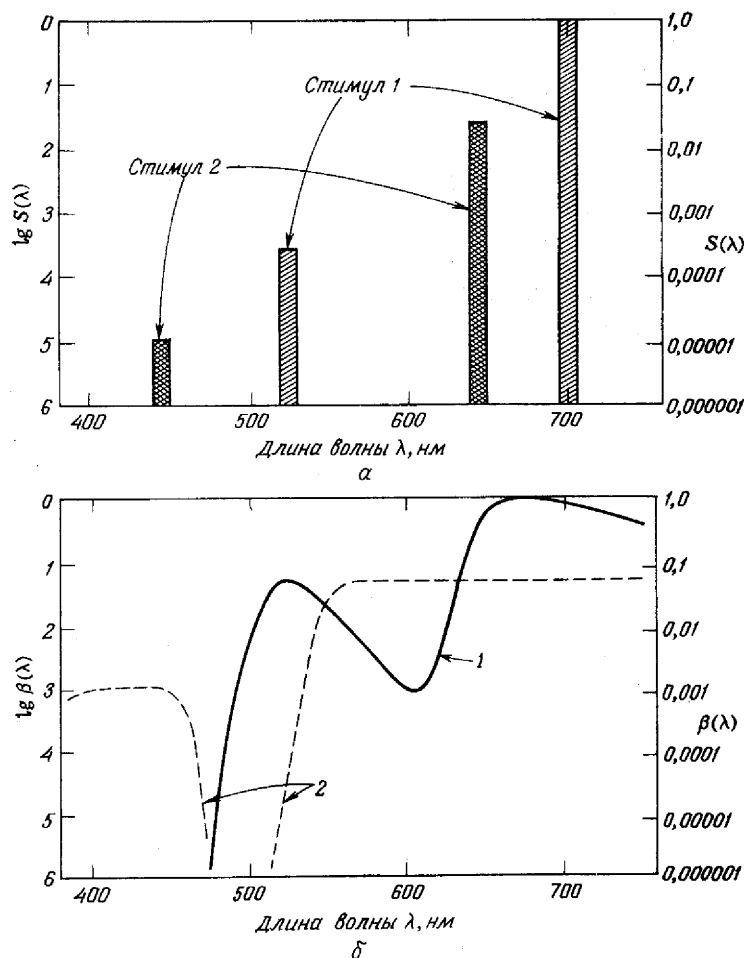


Рис. 2.23.

а — Логарифмированные значения относительного спектрального распределения энергии $S(\lambda)$ двух цветовых стимулов, одноцветных относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. при условии подавления реакций палочкового механизма. В действительности интрузия палочек будет иметь место до тех пор, пока стимулы не достигнут уровня яркости, при котором происходит насыщение палочек и они становятся неспособными к обнаружению различия между обоими стимулами. В приведенном случае стимулы должны достигнуть уровня яркости примерно в $30\,000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ (что соответствует $\sim 60\,000$ фотопических троландов), прежде чем можно будет пренебречь реакцией палочек. б — Логарифмированные значения спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta(\lambda)$ двух (гипотетических) образцов, которые при освещении стандартным излучением D_{65} одноцветны относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. при условии, что реакция палочкового механизма подавлена. Это условие будет соблюдаться при уровне яркости стимулов свыше $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, что соответствует ~ 1000 фотопических троландов [637].

до $\sim 30\,000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, палочковый механизм достигает уровня насыщения и становится неспособным к обнаружению скотопического различия между двумя стимулами. Уровень в $30\,000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ обеспечивает на сетчатке освещенность $\sim 60\,000$ фотопических троландов, что фактически превышает уровень безопасного для глаза наблюдения стимула.

Если ограничить обсуждение метамерными несамосветящимися стимулами с малыми и умеренными различиями между спектрами, то, как показали Стайлс и Вышецки [637], уровни яркости в $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ и выше могут быть достаточными, чтобы гарантировать незначительную интрузию палочек. Уровень в $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ обеспечивает освещенность на сетчатке ~ 1000 фотопических троландов.

В нижней части рис. 2.23 приведен пример такого случая. Были вычерчены две кривые спектральных апертурных коэффициентов отражения, представляющие два образца, которые при освещении стандартным излучением МКО D_{65} создают цветовые стимулы, метамерные относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО. Как уже говорилось выше, палочковый механизм не участвует в зрительном восприятии при условии, что стимулы имеют уровень яркости выше $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Чтобы достигнуть этого уровня, освещенность на двух данных образцах, которые имеют коэффициент яркости $Y \approx 2,6$, должна быть $\sim 15\,000 \text{ лк}$ ($\text{лм} \cdot \text{м}^{-2}$) [или 1400 фут-кандел ($\text{лм} \cdot \text{фут}^{-2}$)]. Это относительно высокий уровень освещенности; такой высокий уровень можно встретить лишь в некоторых специальных контрольных помещениях [287]. Однако метамерная пара, подобранная для примера, имеет степень метамеризма, которая может быть необычайно высокой и редко встречающейся на практике. Можно также отметить, что коэффициент яркости Y образцов довольно мал, и поэтому нужно повышать освещенность, чтобы достигнуть уровня яркости, требуемого для насыщения палочек.

Во многих практических случаях при наблюдении несамосветящихся стимулов имеется также ахроматический фон, яркость которого может быть равной или больше яркости стимула. У глаза, перемещающегося между исследуемым образцом и фоном, уровень адаптации палочек выше, чем у глаза, постоянно фиксированного на образце, из-за времени, которое требуется палочкам на переадаптацию. В результате вероятность интрузии палочек имеет тенденцию к уменьшению при использовании яркого фона. Этот смягчающий фактор, естественно, не действует, когда (в некоторых визуальных колориметрах) уравниваемое поле имеет темный фон, или фон с примерно такой же скотопической яркостью, как и само поле.

Во всех случаях, когда ожидается, что интрузия палочек станет важным фактором в уравнивании по цвету больших полей, необ-

ходимо предпринимать специальные меры для уменьшения этого эффекта.

Предположим, что по тем или иным причинам невозможно повысить яркость стимула до уровня, достаточного для сведения интрузии палочек к минимуму. В этом случае остается возможность изменения относительных спектральных составов стимулов таким образом, чтобы различия между их спектрами уменьшились или изменились так, чтобы уменьшился разбаланс между реакциями палочек на оба стимула. Такие изменения возможны без необходимости в изменении цвета стимулов (координат цвета). В идеальном случае, конечно, можно попытаться сделать стимулы идентичными по спектральному составу. Если это достигается, то все проблемы уравнивания по цвету отпадают. Не имеет значения, какие используются: наблюдатель, освещение, уровень яркости и т. д. — оба стимула всегда будут уравнены. Фактически в этом тривиальном случае нет необходимости в какой бы то ни было колориметрии.

Трезона [661] исследовала проблему участия палочек в уравнивании по цвету больших полей в визуальных колориметрах, использующих смеси спектральных стимулов, очень сходных с типом, показанным в верхней половине рис. 2.23. При использовании четырех основных цветов вместо трех ею были получены четыре функции сложения (а не три, как обычно), на основе которых могут быть рассчитаны четыре координаты цвета любого заданного цветового стимула. Два стимула с различным спектральным распределением энергии, но с одинаковыми четырехцветными координатами, будут равны по цвету на любом уровне яркости. Как реакции колбочкового, так и реакции палочкового механизмов идеально сбалансированы для обоих стимулов независимо от различия в их спектральном составе и яркости.

Метод Трезоны, весьма удобный при рассмотрении стимулов с максимальной степенью метамеризма, встречающейся в специальных визуальных колориметрах, вряд ли может быть использован в производственной практике, где степень метамеризма почти всегда мала или умеренна. Прежде чем применить метод Трезоны в практическом уравнивании несамосветящихся стимулов, можно сперва путем расчета оценить вероятность интрузии палочек. Такая оценка может быть выполнена с помощью обсуждавшегося выше метода Стайлса и Вышецкого [637].

Если не учитывать случаи со значительной степенью метамеризма между стимулами и низкими уровнями яркости, можно с уверенностью полагать, что применение дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. в производственной практике дает значительные гарантии адекватного прогнозирования метамерных равенств при больших полях зрения. Применению больших полей должно быть отдано предпочтение в связи с увеличением точности

уравнивания по цвету при визуальном сравнении. Необходимость использования малых полей возникает, естественно, в тех случаях, когда наблюдаемые образцы имеют малые угловые размеры (от 1° до 4°). В таких случаях уместно пользоваться стандартным наблюдателем МКО 1931 г. Для соответствующих колориметрических расчетов образцов с угловым размером $<1^\circ$ стандартизованных функций сложения не существует.

ЦВЕТОВАЯ И КОРРЕЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В табл. 2.13 приведены координаты цветности (x , y) цветовых стимулов в системе МКО 1931 г., создаваемых идеальными (полными или планковскими) излучателями, поддерживаемыми при различных температурах (К) по абсолютной температурной шкале. Спектральное распределение лучистого потока было рассчитано по формуле Планка (см. Обсуждение стандартного излучения А МКО) и распространено на случай более высоких температур излучений, которые могут быть реально достигнуты.

Цветности этих полных излучателей представляют интерес, поскольку они очень похожи на цветности излучений ламп накаливания и, как это будет показано ниже, приближаются также к цветностям различных фаз дневного света. На рис. 2.24 показан график с точками цветностей излучателей Планка при различных температурах (К). Кривая, проходящая через эти точки, обычно называется *линией черного тела*. Люминесцентные лампы, лампы искусственного дневного света для контроля цвета (рис. 2.7—2.10) и электронно-лучевые трубки для телевизионных приемников часто градуируются по цвету относительно линии черного тела. Например, если излучение лампы искусственного дневного света имеет цветность, совпадающую с цветностью полного излучателя с температурой $T = 6000$ К, то говорят, что эта лампа имеет *цветовую температуру 6000 К*.

Если цветность лампы искусственного дневного света не совпадает ни с одной точкой линии черного тела, выбирается ближайшая точка линии и по ней определяется *коррелированная цветовая температура* данной лампы [321]. Ближайшей считается та точка линии, которая визуальное воспринимается самой близкой по цветности к лампе дневного света. Чтобы определить координаты ближайшей точки, необходим цветовой график, более равноконтрастный, чем график x , y . Такой график существует; он называется равноконтрастным цветовым графиком МКО 1960 г. и будет описан в одном из следующих разделов.

На равноконтрастном цветовом графике проводятся прямые линии, пересекающие линию черного тела под прямым углом. Все цветности, лежащие на любой такой прямой, имеют общую ближайшую точку с линией черного тела — точку ее пересечения

Таблица 2.13

Координаты цветности в системе МКО 1931 г. излучателя Планка при различных температурах T (К).
(Радиационная постоянная $c_2 = 1,4388 \times 10^{-2}$ м·К)

Температура T (К)	Координаты цветности		Температура T (К)	Координаты цветности	
	x	y		x	y
1000	0.6528	0.3444	4000	0.3805	0.3768
1200	0.6251	0.3674	4100	0.3761	0.3740
1400	0.5985	0.3858	4200	0.3720	0.3714
1500	0.5857	0.3931	4300	0.3681	0.3687
1600	0.5732	0.3993	4400	0.3644	0.3661
1700	0.5611	0.4043	4500	0.3608	0.3636
1800	0.5493	0.4082	4600	0.3574	0.3611
1900	0.5378	0.4112	4700	0.3541	0.3586
2000	0.5267	0.4133	4800	0.3510	0.3562
2100	0.5160	0.4146	4900	0.3480	0.3539
2200	0.5056	0.4152	5000	0.3451	0.3516
2300	0.4957	0.4152	5200	0.3397	0.3472
2400	0.4862	0.4147	5400	0.3348	0.3431
2500	0.4770	0.4137	5600	0.3302	0.3391
2600	0.4682	0.4123	5800	0.3260	0.3354
2700	0.4599	0.4106	6000	0.3221	0.3318
2800	0.4519	0.4086	6500	0.3135	0.3237
2900	0.4442	0.4065	7000	0.3064	0.3166
3000	0.4369	0.4041	7500	0.3004	0.3103
3100	0.4300	0.4016	8000	0.2952	0.3048
3200	0.4234	0.3990	8500	0.2908	0.3000
3300	0.4171	0.3963	9000	0.2869	0.2956
3400	0.4110	0.3935	10000	0.2807	0.2884
3500	0.4053	0.3907	15000	0.2637	0.2674
3600	0.3999	0.3879	30000	0.2501	0.2489
3700	0.3947	0.3851			
3800	0.3897	0.3823	2045	0.5218	0.4140
3900	0.3850	0.3795	2856	0.4475	0.4074

с прямой. Температура соответствует точке пересечения и представляет собой коррелированную цветовую температуру всех тех стимулов, цветности которых лежат на прямой. Сама прямая иногда называется *изотемпературной линией*.

Изотемпературные линии, найденные в равноконтрастном графике МКО 1960 г., могут быть трансформированы в изотемпературные линии на цветовом графике x, y МКО 1931 г.; семейство

таких линий показано на рис. 2.25. Из-за неравноконтрастности цветового графика x, y изотемпературные линии пересекают линию черного тела не под прямым углом; тем не менее достаточно близкое расположение соседних линий позволяет использовать этот график для определения коррелированных цветовых температур обыч-

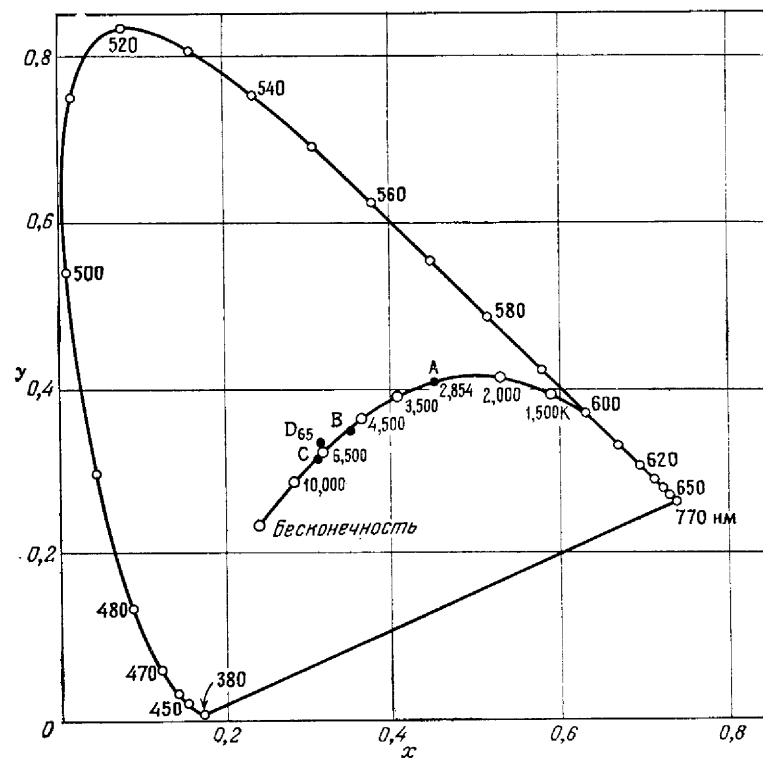


Рис. 2.24. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с линией черного тела и цветностями стандартных излучений МКО.

ных источников света, для которых подсчитаны их координаты цветности x, y .

В табл. 2.14 приведены значения координат цветности x, y в системе МКО 1931 г. и коррелированных цветовых температур цветовых стимулов, создаваемых стандартными излучениями А, В, С, D₆₅, D₆₅, D₇₅, относительное спектральное распределение энергии которых дано в табл. 2.1 и 2.4. На рис. 2.24 показаны цветности этих излучений и их связь с линией черного тела. Значения коррелированных цветовых температур определялись из

Таблица 2.14

Координаты цветности и коррелированная цветовая температура стандартных излучений МКО

Стандартные излучения МКО	Координаты цветности в системе МКО				Коррелированная цветовая температура T_c (К)
	1931 г.		1964 г.		
	x	y	x_{10}	y_{10}	
A	0,4476	0,4074	0,4512	0,4059	2856
B	0,3484	0,3516	0,3498	0,3527	4874
C	0,3101	0,3162	0,3104	0,3191	6774
D ₅₅	0,3324	0,3475	0,3344	0,3487	5503
D ₆₅	0,3127	0,3290	0,3138	0,3310	6504
D ₇₅	0,2990	0,3150	0,2996	0,3173	7504

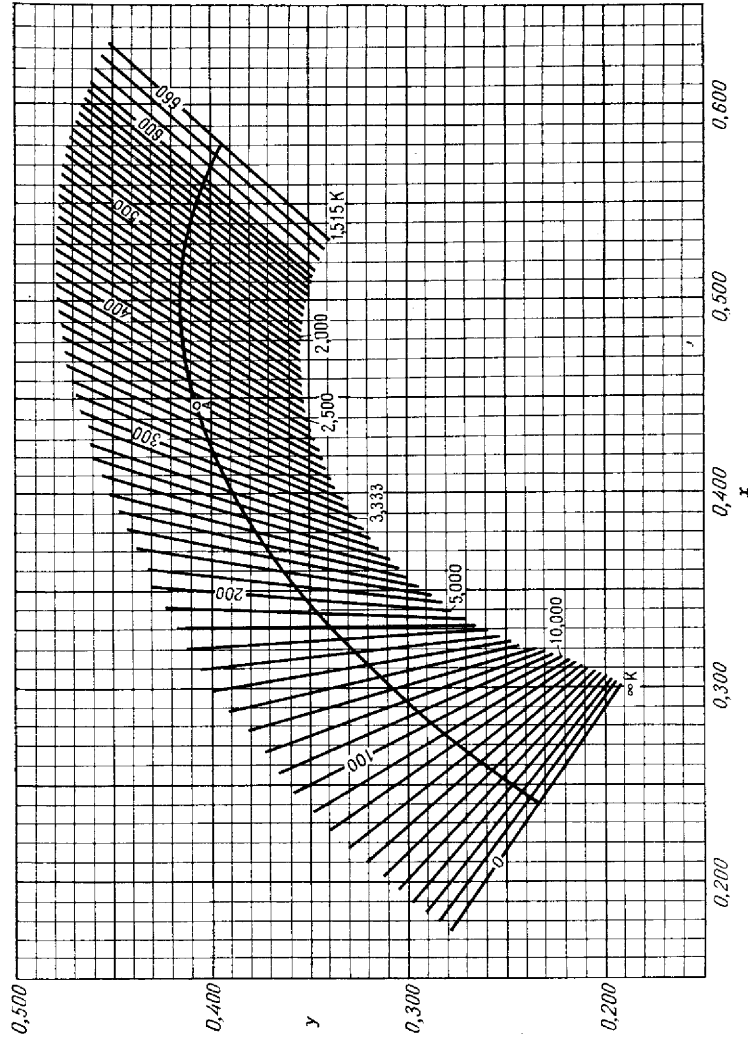


Рис. 2.25. Часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с линией черного тела и семейством изотемпературных линий. Этот график может быть использован для определения коррелированной цветовой температуры цветных стимулов, создаваемых источниками света.

графика рис. 2.25. Стандартное излучение А МКО по определению является полным излучателем, и поэтому его цветность лежит непосредственно на линии черного тела.

По данным табл. 2.3 можно построить *линию дневного света* с использованием для ее построения координат цветности x_D, y_D , которые по определению МКО соответствуют фазам дневного света. Эта линия показана на рис. 2.26 вместе с линией черного тела. Линия дневного света смещена вверх относительно линии черного тела. С помощью этого рисунка можно графически определить значения коррелированных цветовых температур различных фаз дневного света. Однако нужно помнить, что для стандартных излучений D МКО, которые представлены на линии дневного света, были ранее выведены уравнения (2.2)–(2.4), связывающие координаты цветности x_D, y_D с коррелированной цветовой температурой T_c .

Иногда более удобно использовать и обратную величину коррелированной цветовой температуры, обозначаемой термином *миред*, т. е. обратный микроградус μrd , введенным для обозначения величины $10^6/T_c$.

Использование обратной величины коррелированной цветовой температуры дает два преимущества над применением собственно величины цветовой температуры [538]. Во-первых, равным интервалам обратной коррелированной цветовой температуры соответствуют почти равные интервалы цветностей; один миред соответствует примерно едва заметной разнице по цветности в интервале 0–1000 μrd . Во-вторых, идеальный фильтр желтого или голубого цвета, который требуется для изменения обратной коррелированной цветовой температуры на величину $\Delta 10^6/T$ в какой-либо одной части шкалы температур, меняет почти на такую же

величину обратную температуру в любом другом участке шкалы; это свойство обеспечивает удобный метод для определения способности изменения цветовой температуры реальных фильтров [171, 736].

Термин миред не согласуется с современной терминологией, поскольку абсолютная температура больше не выражается в градусах. Вместо этого используется единица кельвин (К), которая эквивалентна ранее применявшемуся градусу Кельвина. Поэтому

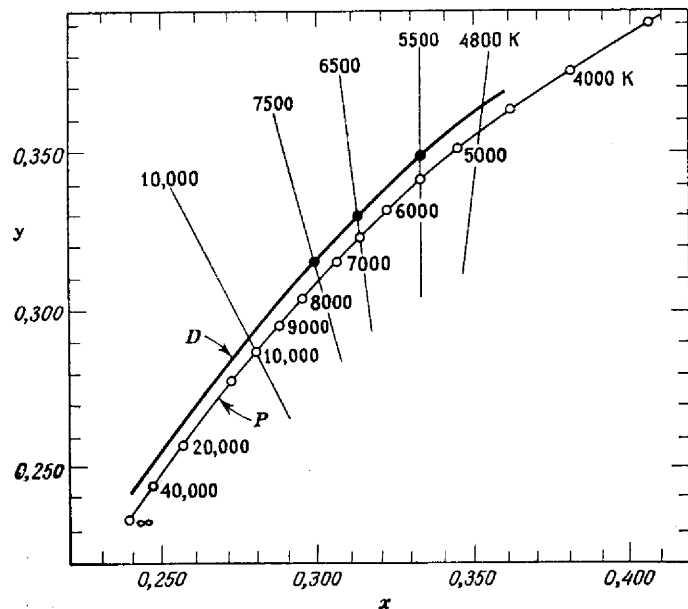


Рис. 2.26. Часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с линиями дневного света (D) и черного тела (P), а также несколькими изотемпературными линиями.

для большего соответствия современной терминологии следовало бы изменить обратный микроградус на обратный микрокельвин. Возможно еще лучше пользоваться термином обратный мегакельвин, соответствующий величине $1/T$, где T выражено в мегакельвинах ($1 \text{ МК} = 10^6 \text{ К}$). Например, температура 3000 К равна $0,003 \text{ МК}$, а обратная величина $1/0,003 = 333,3 \text{ гМК}$, т. е. получилась такая же величина, как и в μgd . Ни один из этих новых терминов, предложенных в частном порядке Грумом, еще не получил международного признания, однако Комитет по колориметрии МКО занимается их рассмотрением.

Поскольку коррелированная цветовая температура определяет только цветность излучения, существует множество спектральных

распределений энергии, соответствующих одной и той же температуре; любая пара из них образует метамерную пару. Коррелированная цветовая температура излучения является поэтому неполной и ненадежной его характеристикой с точки зрения передачи цветов объектов (в том числе и при фотографировании), освещенных данным излучением. Например, люминесцентные лампы типа Warm-White ($\approx 3500 \text{ К}$) и Photoflood ($\approx 3400 \text{ К}$) имеют почти одинаковые значения коррелированной цветовой температуры, однако нельзя сказать, что они одинаково передают цвета освещаемых объектов.

Чтобы сделать коррелированную цветовую температуру более приемлемой основой для сравнения двух излучений, необходимо сначала показать подобие их спектральных составов. Так, лампы накаливания в практически бесцветных колбах можно успешно сравнить при помощи коррелированной цветовой температуры без всяких оговорок; аналогично с таким же успехом можно сравнивать две люминесцентные лампы при условии, что у них сходны люминофоры и добавки ртути спектра. Однако сравнение с помощью коррелированной цветовой температуры лампы накаливания и люминесцентной лампы редко бывает успешным с точки зрения передачи цвета освещаемых ими объектов; цветовая температура определяет лишь место самого излучения в желто-синем диапазоне цветов. Правильная оценка цветопередающих свойств источников света является значительно более трудной задачей и будет обсуждаться позже в одном из следующих разделов.

ДОМИНИРУЮЩАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ И ЧИСТОТА ЦВЕТА

Доминирующая длина волны цветового стимула определяет, какая часть спектра должна быть смешана с некоторым ахроматическим (или нейтральным) стандартом для получения цветового равенства с данным стимулом. Ахроматический стандарт обычно задается стандартным излучением (таким, как излучения A и D_{65}), которое может рассматриваться в качестве ахроматического стимула, т. е. цветового стимула, не имеющего при нормальном восприятии цветовой тона. Если исследуется неизвестный отражающий или пропускающий свет объект, то в качестве ахроматического стандарта принимается излучение, освещающее этот объект. Даже излучение A (представляющее излучение лампы накаливания) может в этих условиях рассматриваться как ахроматическое — настолько велика способность зрения к адаптации на общую цветность окружающей среды. Поэтому неселективные по спектру предметы выглядят серыми как при дневном свете, так и при свете лампы накаливания; это удобное свойство целесообразно принимать во внимание при определении доминирующей длины волны.

Чистота цвета данного стимула определяет степень приближения этого цвета к цвету той части спектра, которая обозначается доминирующей длиной волны рассматриваемого стимула.

Те, кто знаком с цветами спектральных излучений, могут легко представить себе, что означают, например, доминирующая

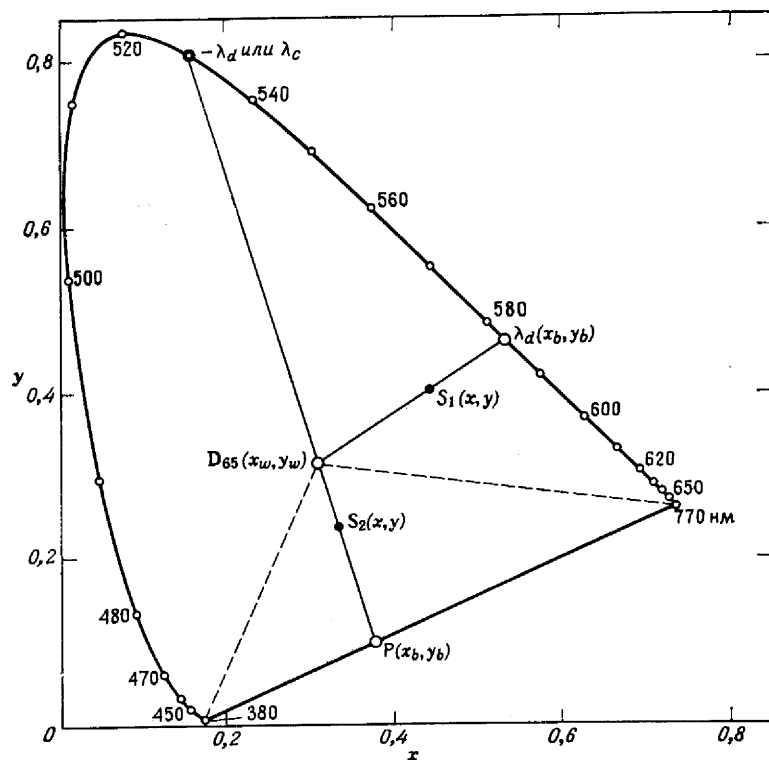


Рис. 2.27. Графический способ определения на цветовом графике x, y МКО 1931 г. доминирующей длины волны λ_d и чистоты цвета p_e стимула с цветностью S_1 , а также дополнительной длины волны $-\lambda_d$ (или λ_c и чистоты цвета p_e стимула с цветностью S_2 относительно излучения D_{65} .

длина волны 600 нм и чистота цвета 50%. Им известно, что спектральный стимул с длиной волны $\lambda = 600$ нм обычно выглядит оранжевым по цвету; поэтому они представляют себе один из цветов с оранжевым цветовым тоном, имеющим почти вдвое меньшую насыщенность по сравнению с чисто оранжевым. На самом деле такой стимул выглядит более розоватым, однако этот факт не исключает возможности такого, иногда полезного, наглядного представления, хотя и является в известной мере помехой ему. Обычно

говорят, что стимулы с одинаковой доминирующей длиной волны воспринимаются как стимулы с почти (но не точно) одинаковым цветовым тоном.

В 30-х годах довольно распространенным было превращение координат цветности x, y в значения доминирующей длины волны и чистоты цвета, поскольку термин доминирующей длины волны обычно более понятен, чем термин координаты цветности. В настоящее время так поступают редко.

Определение доминирующей длины волны и чистоты цвета для заданного стимула с цветностью $S_1(x, y)$ иллюстрируется на рис. 2.27. В качестве ахроматического стандарта с координатами цветности x_w, y_w принято излучение D_{65} . Метод заключается в проведении прямой линии через точку, соответствующую ахроматическому стандарту D_{65} , и точку S_1 , соответствующую рассматриваемому стимулу, в продолжении этой линии до пересечения с линией спектральных цветностей. На пересечении считывается искомое значение λ_d доминирующей длины волны данного цветового стимула. Для стимула S_1 это пересечение достигается в точке $\lambda_d = 583$ нм.

Для цветовых стимулов с цветностями, например $S_2(x, y)$, попадающими в треугольник цветового графика с вершинами в точках D_{65} , 380 и 770 нм, т. е. в область пурпурных или несектральных стимулов, определяется дополнительная длина волны, поскольку для таких стимулов не существует доминирующей длины волны.

Дополнительная длина волны находится на пересечении прямой линии, проходящей через S_2 и D_{65} , с линией спектральных цветностей. Чтобы отличить дополнительную длину волны от доминирующей, первой приписывается отрицательное значение или после нее ставится буква c . Так, в приведенном на рис. 2.27 примере получаем для S_2 следующее значение дополнительной длины волны: $\lambda_d = -530$ нм или $\lambda_c = 530$ нм.

Условная чистота p_e цвета S_1 и S_2 для данного стимула рассчитывается по формуле

$$p_e = \frac{x - x_w}{x_b - x_w} = \frac{y - y_w}{y_b - y_w} \quad (2.19)$$

Для определения p_e может быть использовано любое из двух выражений, дающее при расчете наименьшую ошибку.

В уравнении (2.19) координаты цветности x, y представляют собой координаты цветности стимула (S_1 или S_2); x_w, y_w — координаты цветности ахроматического стандарта D_{65} и x_b, y_b — координаты цветности граничного стимула, т. е. спектрального стимула λ_d в случае S_1 или чистого пурпурного стимула P в случае S_2 .

Для двух примеров, приведенных на рис. 2.27, получаются значения p_e порядка 60% для S_1 и порядка 35% для S_2 .

Определение доминирующей длины волны (или дополнительной длины волны) и условной чистоты цвета в дополнительной стандартной колориметрической системе МКО 1964 г. осуществляется тем же методом. В этом случае используются координаты цветности стимула x_{10} , y_{10} и цветовой график x_{10} , y_{10} МКО 1964 г. (рис. 2.16).

МЕТАМЕРИЗМ

Уже несколько раз со всей очевидностью придавалось и еще неоднократно будет придаваться во многих разделах этой книги большое значение для колориметрии понятия метамеризма. Поэтому представляется желательным более подробно обсудить это явление.

Метамерные цветовые стимулы были определены как стимулы с одинаковыми координатами цвета относительно определенного наблюдателя, но с различными спектральными составами. Таким образом, для пары метамерных цветовых стимулов выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda} \varphi^{(1)}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} \varphi^{(2)}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ \int_{\lambda} \varphi^{(1)}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} \varphi^{(2)}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ \int_{\lambda} \varphi^{(1)}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} \varphi^{(2)}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2.20)$$

где $\varphi^{(1)}(\lambda)$ и $\varphi^{(2)}(\lambda)$ — спектральные распределения энергии двух стимулов, а $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ — хорошо знакомые функции сложения стандартного наблюдателя МКО 1931 г.

Цветовые стимулы могут быть созданы различными излучениями:

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)}(\lambda) &= S^{(1)}(\lambda), \\ \varphi^{(2)}(\lambda) &= S^{(2)}(\lambda), \end{aligned} \quad (2.21)$$

или различными объектами $\beta^{(1)}(\lambda)$, $\beta^{(2)}(\lambda)$, освещенными одним и тем же излучением $S(\lambda)$:

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)}(\lambda) &= \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda), \\ \varphi^{(2)}(\lambda) &= \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda), \end{aligned} \quad (2.22)$$

или различными объектами и различными излучениями:

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)}(\lambda) &= \beta^{(1)}(\lambda) S_1^{(1)}(\lambda), \\ \varphi^{(2)}(\lambda) &= \beta^{(2)}(\lambda) S_2^{(2)}(\lambda). \end{aligned} \quad (2.23)$$

В первом случае (2.21) рассматриваются самосветящиеся стимулы; в (2.22) и (2.23) — несамосветящиеся. С точки зрения практической колориметрии наибольшее значение имеют метамерные несамосветящиеся стимулы, особенно те, которые описываются (2.22); на них будет сделан основной упор в дальнейших рассуждениях.

Различия между спектрами метамерных несамосветящихся стимулов типа (2.22) вытекают лишь из различий между функциями спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda)$ двух объектов, так как оба освещаются одним и тем же излучением $S(\lambda)$.

В общем случае кривые спектральных апертурных коэффициентов отражения двух метамерных несамосветящихся стимулов должны иметь те же значения, по крайней мере на трех различных длинах волны в пределах видимого спектра [636]. Исключения из этого правила редки.

Цветовые стимулы обычно бывают метамерными лишь относительно какого-либо одного определенного наблюдателя, например стандартного наблюдателя МКО 1931 г. При замене наблюдателя функции сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ сменяются другой группой функций, и нельзя ожидать, что условия цветового равенства, задаваемые уравнениями (2.20), будут по-прежнему справедливы. Обычно цветовое равенство для второго наблюдателя не сохраняется, и оба стимула будут для него разноцветными. Важный пример такого рода был приведен в предыдущем разделе (рис. 2.22). Там рассматривались четыре цветовых несамосветящихся стимула, которые были метамерными относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. При переходе к дополнительному стандартному наблюдателю МКО 1964 г., соответствующему переходу при полях зрения от 2 до 10°, было отмечено, что ни один из четырех несамосветящихся стимулов не сохранил своего цвета и все они перестали быть метамерными.

Подобные нарушения цветовых равенств могут иметь место и при замене излучения $S(\lambda)$, освещающего несамосветящиеся объекты. При переходе от $S(\lambda)$ к $S'(\lambda)$ нельзя ожидать, что останутся справедливыми условия цветового равенства, задаваемые уравнениями (2.20). Обычно замена источника приводит к нарушению равенства.

В качестве примера можно снова привести четыре объекта, кривые спектрального апертурного коэффициента отражения которых показаны на рис. 2.21. Эти объекты при освещении стандартным излучением D_{65} создают несамосветящиеся стимулы, метамерные относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. Если заменить D_{65} на стандартное излучение A и пересчитать координаты цвета относительно того же наблюдателя, то между стимулами выявятся значительные различия по цвету. Эти различия отра-

зятся на новых координатах цветности, рассчитанных по координатам цвета. Результат показан на рис. 2.28. Переход от излучения D_{65} к A приводит к такому разбросу точек цветностей, который скорее всего будет заметен для глаза.

Можно рассчитать множество других кривых спектральных апертурных коэффициентов отражения $\beta^i(\lambda)$, которые в сочетании со стандартным излучением D_{65} создают несамосветящиеся стимулы, метамерные по отношению к стандартному наблюдателю

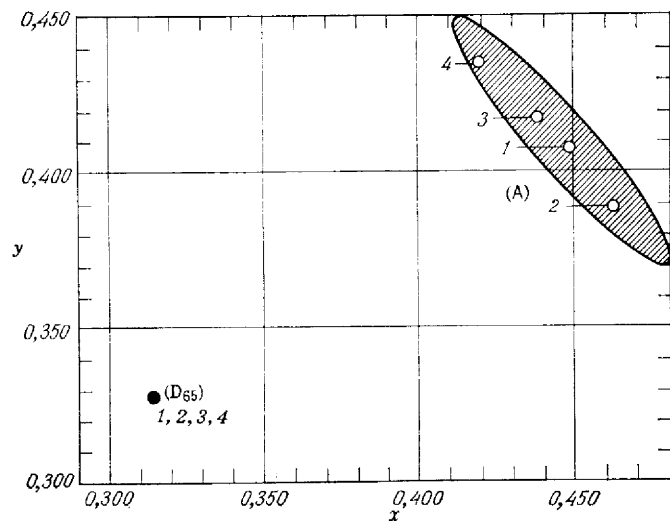


Рис. 2.28. Часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с цветностями (1—4) четырех несамосветящихся образцов при освещении их излучениями D_{65} и A . При освещении образцов излучением D_{65} получают метамерные стимулы; при освещении A получают разноцветные стимулы. Заштрихованный эллипс определяет область, в которую с вероятностью 95% попадают все стимулы, метамерные стимулам 1—4.

МКО 1931. Если теперь рассчитать их цветности при замене D_{65} на A , то окажется, что все точки цветности равномерно распределяются вокруг точки средней цветности $x = 0,448$ и $y = 0,408$, соответствующей цветности самого излучения A , и заполняют площадь, ограниченную эллипсом (рис. 2.28). Размер, форма и ориентация этого эллипса на цветовом графике характеризуют излучение A [634, 635, 720, 736] и могут быть использованы для количественной оценки целесообразности применения излучения A вместо D_{65} (дневной свет). Большие размеры эллипса совершенно очевидно доказывают, что излучение A (лампа накаливания) является плохой заменой для излучения D_{65} (дневной свет). В данном случае лишь подтверждаются и без того известные факты, насколько они касаются излучения A , однако метод может быть при-

менен и к другим излучениям, для которых эти факты не могут быть очевидными.

Диапазон цветностей, ограниченный эллипсом на рис. 2.28, не является абсолютным пределом, внутрь которого могут попасть точки цветности метамерных несамосветящихся стимулов при переходе от излучения D_{65} к A . Это лишь статистическая оценка предела, которая верна для 95% всех рассматриваемых несамосветящихся стимулов, принадлежащих одному и тому же классу (метамерных) стимулов. Абсолютный предел, естественно, шире 95%-ного предела и не имеет идеально эллиптической формы. Численный метод определения абсолютного предела приведен Алленом [12]. Абсолютный предел имеет большое значение для теории метамерных несамосветящихся стимулов, однако рассмотрение этой проблемы выходит за рамки настоящей книги.

Как было показано, метамеризм несамосветящихся стимулов обычно связан с определенным излучением и определенным наблюдателем. Если меняется излучение или наблюдатель (или оба сразу), первоначальное метамерное равенство может нарушиться. Это обстоятельство наводит на мысль, что существует простой способ подтверждения метамеризма. Чтобы определить, имеют ли два образца, которые одноцветны при заданном освещении, различные кривые спектрального апертурного коэффициента отражения, или они идентичны по спектру, нужно просто посмотреть на эти образцы при другом излучении, спектральное распределение энергии которого отлично от первоначального. Если будет найдено, что при другом освещении оба образца перестают быть одноцветными, можно сделать заключение о различии их спектральных характеристик. Однако если при другом освещении они остаются по-прежнему одноцветными, никакого вывода сделать нельзя. Хотя в большинстве практических случаев можно с уверенностью говорить об идентичности спектральных характеристик образцов, все же существует вероятность, что это не так. На рис. 2.29 показаны кривые спектральных апертурных коэффициентов отражения двух гипотетических образцов, которые будут одноцветными относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. как при освещении средним дневным светом, так и при освещении лампой накаливания.

Можно было бы рассчитать спектральные характеристики образцов, обеспечивающих метамерность соответствующих несамосветящихся стимулов при освещении более чем двумя типами излучения. Сохранение метамеризма становится все более трудным при увеличении числа различных излучений, однако теоретически это возможно. Число точек пересечения спектральных характеристик двух таких образцов стремилось бы расти с ростом числа различных излучений, при освещении каждым из которых образцы должны оставаться одноцветными [636]. В предельном случае,

конечно, оба образца должны иметь идентичные спектральные характеристики, если они должны оставаться одноцветными при освещении любым излучением из множества всех возможных излучений.

В ряде случаев гипотетические метамерные несамосветящиеся стимулы могут быть использованы для осмысления некоторых

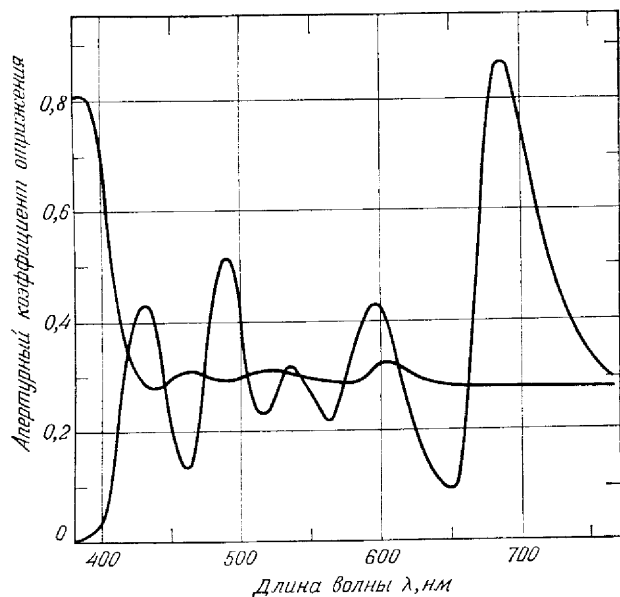


Рис. 2.29. Кривые спектрального апертурного коэффициента отражения двух гипотетических образцов, которые одноцветны относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. как при освещении средним дневным светом, так и при освещении лампой накаливания.

аспектов концепции метамеризма. Приведенные в качестве примера стимулы были гипотетическими, поскольку они были рассчитаны с помощью специальных численных методов, а не выбраны из числа реальных объектов с желаемым спектральным распределением коэффициента отражения. Детальное описание этих численных методов выходит за рамки этой книги, однако интересующийся читатель может отыскать их в литературе [245, 543, 549, 648, 717, 723, 736].

Степень метамеризма. Различия в спектральных составах двух метамерных стимулов обычно используются в качестве приближенной оценки степени метамеризма. Например, если спектральные характеристики двух метамерных несамосветящихся стимулов

значительно отличаются друг от друга, мы склонны называть такую пару сильно метамерной. Можно считать, что любая пара кривых на рис. 2.21 представляет пару сильно метамерных несамосветящихся стимулов. Аналогично, если кривые спектральных апертурных коэффициентов отражения двух одноцветных стимулов различаются незначительно, их можно назвать умеренно метамерными. Однако такой качественный способ определения степени метамеризма нельзя считать полностью удовлетворительным; как будет вскоре показано, он может привести к ошибочным выводам. Тем не менее при правильном применении понятие степени метамеризма может оказаться полезным средством в практической колориметрии.

Пары стимулов с сильной степенью метамеризма, вероятно, могут вызвать затруднения в следующих случаях:

а. Различные наблюдатели или фотоэлектрические трехцветные колориметры могут значительно расходиться в оценке наличия равенства стимулов по цвету.

б. Если два стимула наблюдаются при большом поле зрения, появление пятна Максвелла может привести к ощущению неравномерности стимулов по цвету.

в. Если образцы одноцветны при естественном дневном освещении, они, вероятно, будут значительно отличаться друг от друга при освещении источником искусственного дневного света, таким, как люминесцентная лампа.

С другой стороны, если пара стимулов обладает низкой степенью метамеризма, от них можно не ждать особых неприятностей. Различные наблюдатели или фотоэлектрические трехцветные колориметры будут более точно согласовываться между собой; пятна Максвелла можно не увидеть; изменение освещения не может быть очень критичным.

Можно получить количественную оценку степени метамеризма, если взять квадратный корень из суммы квадратов разностей между спектральными распределениями энергии $\varphi^{(1)}(\lambda)$ и $\varphi^{(2)}(\lambda)$ двух заданных метамерных стимулов, т. е. степень метамеризма D может быть выражена в виде

$$D = \left\{ \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} [\varphi^{(1)}(\lambda) - \varphi^{(2)}(\lambda)]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2.24)$$

Это выражение позволяет получить однозначную оценку различия между $\varphi^{(1)}(\lambda)$ и $\varphi^{(2)}(\lambda)$; можно считать, что эта оценка согласуется с обсуждавшейся ранее качественной оценкой степени метамеризма. Однако сразу же видно, что все длины волн видимого спектра (от 380 до 780 нм) имеют равные веса. Это придает излишний вес концам спектра, которые, как известно, менее значимы при оценке цвета. Одна взвешивающая функция, например $\bar{y}(\lambda)$, могла бы

Таблица 2.15

Относительное спектральное распределение энергии $S(\lambda)$ излучений, рекомендуемых МКО для расчета частного индекса метамеризма при замене излучения.

Излучение А идентично стандартному излучению А МКО; F_1, F_2, F_3 представляют излучения люминесцентных ламп. Энергия основных линий спектра ртути, полученная после вычитания сплошного спектра, разнесена на интервал 10 нм [102]

λ (нм)	A $S(\lambda)$	F1 $S(\lambda)$	F2 $S(\lambda)$	F3 $S(\lambda)$
380	9.8	5.4	10.7	23.0
90	12.1	5.6	12.0	27.5
400	14.7	5.8	13.9	33.4
10	17.7	6.1	16.8	43.6
20	21.0	7.4	20.8	55.0
30	24.7	10.6	28.0	67.7
40	28.7	17.2	37.9	81.0
450	33.1	26.5	48.8	94.2
60	37.8	33.6	58.5	104.6
70	42.9	38.3	64.4	111.1
80	48.2	39.7	66.5	114.3
90	53.9	39.8	67.0	115.5
500	59.9	40.7	66.6	114.2
10	66.1	43.6	67.7	111.4
20	72.5	49.9	69.9	107.6
30	79.1	57.4	73.2	103.6
40	85.9	67.8	78.7	101.0
550	92.9	82.3	88.4	99.8
60	100.0	100.0	100.0	100.0
70	107.2	113.2	110.4	101.1
80	114.4	125.7	116.0	102.7
90	121.7	112.9	115.3	102.7

до некоторой степени устранить эту трудность; использование трех взвешивающих функций, как, например, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ или каких-нибудь подобных им, дало бы еще лучший результат. Такую возможность исследовали Нимерофф и Юроу [509], которые предложили свой показатель степени метамеризма с использованием трех взвешивающих функций, однако практическая ценность такого показателя довольно ограничена. С практической точки зрения более приемлемый показатель степени метамеризма может быть получен на основе следующего принципа.

Продолжение табл. 2-15

λ (нм)	A $S(\lambda)$	F1 $S(\lambda)$	F2 $S(\lambda)$	F3 $S(\lambda)$
600	129.0	103.2	111.2	101.2
10	136.3	93.3	104.6	99.5
20	143.6	109.8	104.0	98.9
30	150.8	145.7	104.9	97.4
40	158.0	143.6	103.6	92.7
650	165.0	272.2	116.9	96.5
60	172.0	296.5	147.7	96.0
70	178.8	86.9	62.3	63.6
80	185.4	35.6	40.5	47.2
90	191.9	21.2	30.2	38.1
700	198.3	12.4	23.6	31.4
10	204.4	8.0	18.0	25.3
20	210.4	5.2	14.0	20.5
30	216.1	3.5	10.8	16.7
40	221.7	2.0	9.3	13.5
750	227.0	1.0	6.6	11.0
60	232.1	0.2	5.2	9.0
70	237.0	0.0	4.0	7.3
80	241.7	0.0	3.1	6.0
404.7 ^a		27.2	42.3	77.7
435.8		84.0	112.1	182.4
546.1		77.7	77.7	100.8
577.8		23.7	23.0	29.1

Степень метамеризма (M) двух несамосветящихся стимулов $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda)$, которые одноцветны для данного наблюдателя $[\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)]$, измеряется в единицах цветового различия ΔE , возникающего между двумя соответствующими несамосветящимися стимулами $\beta^{(1)}(\lambda) S^1(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda) S'(\lambda)$, получающихся из первоначальных стимулов при переходе от излучения $S(\lambda)$ к излучению $S'(\lambda)$.

Этот принцип использован МКО [102], рекомендовавшей следующий метод.

Для двух образцов, координаты цвета которых идентичны ($X_1 = X_2, Y_1 = Y_2, Z_1 = Z_2$) относительно исходного излучения и исходного наблюдателя, индекс метамеризма M_t устанавливается равным индексу цветового различия ΔE , рассчитанному для тестового излучения t .

Таблица 2.16

Спектральные апертурные коэффициенты отражения трех образцов, образующих при освещении стандартным излучением D_{65} метамерные стимулы относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. Данные использованы в численном примере расчета индекса метамеризма МКО

λ (нм)	$\beta^{(0)}(\lambda)$	$\beta^{(1)}(\lambda)$	$\beta^{(2)}(\lambda)$
380	10.50	15.92	11.74
90	12.00	14.85	13.44
400	13.61	9.80	15.48
10	14.27	5.90	16.14
20	14.28	5.42	16.05
30	14.09	6.82	15.60
40	13.94	9.32	15.13
450	13.86	12.39	14.64
60	13.74	15.54	13.90
70	13.68	19.07	13.03
80	13.67	22.00	11.92
90	13.60	23.01	10.37
500	13.56	21.86	8.78
10	13.77	19.26	7.84
20	14.17	15.79	7.84
30	14.67	11.99	8.73
40	16.06	9.85	11.55
550	20.32	13.93	19.18
60	27.78	24.47	31.72

Что касается исходного излучения, предпочтение должно быть отдано стандартному излучению МКО D_{65} .

В качестве тестового излучения следует отдать предпочтение стандартному излучению А, или одному из излучений, определяемых табл. 2.15. Излучения типа F (табл. 2.15) относятся к типичным излучениям люминесцентных ламп, имеющих достаточно высокие значения общих индексов цветопередачи МКО и коррелированных цветовых температур ~ 3000 К для F_1 , 4000 К для F_2 и 6500 К для F_3 . Выбор наиболее целесообразного тестового излучения зависит от конкретного использования, и в некоторых случаях более подходящим может оказаться излучение, отличающееся от любого из трех F-излучений, приведенных в табл. 2.15. В иных случаях может быть полезным определение индекса метамеризма относительно нескольких тестовых излучений. В этом

Продолжение табл. 2.16

λ (нм)	$\beta^{(0)}(\lambda)$	$\beta^{(1)}(\lambda)$	$\beta^{(2)}(\lambda)$
70	37.47	38.27	46.97
80	48.48	52.58	62.26
90	57.35	61.00	70.98
600	62.59	63.87	70.20
10	65.68	65.64	63.10
20	67.17	66.90	55.93
30	68.18	68.27	51.09
40	68.76	69.27	48.46
650	69.31	70.28	47.63
60	69.80	71.20	47.24
70	70.40	72.39	47.41
80	71.11	73.37	47.59
90	71.86	74.01	47.81
700	72.61	75.06	47.82
10	73.14	76.15	47.54
20	73.69	77.43	47.41
30	74.45	79.07	47.71
40	74.62	80.09	47.13
750	74.82	81.40	46.52
60	75.20	83.13	46.37
404.7	13.92	7.97	15.79
435.8	14.00	8.27	15.33
546.1	18.66	12.34	16.20
577.8	46.06	49.43	58.90

случае для каждого тестового излучения используется свой подстрочный индекс к M , например M_A или M_{F_1} .

В качестве исходного наблюдателя принимается либо стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1931 г., либо дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1964 г. в зависимости от размера поля зрения; в данном случае необходимо оговорить, какой из наблюдателей был принят в качестве исходного.

Индекс цветового различия ΔE рассчитывается по координатам цвета X_{1t}, Y_{1t}, Z_{1t} несамосветящегося стимула 1 и X_{2t}, Y_{2t}, Z_{2t} несамосветящегося стимула 2 относительно тестового излучения t . Для расчета ΔE во всех случаях, когда это возможно, должна использоваться рекомендованная в настоящее время формула для оценки цветовых различий МКО 1964 г. Если используется другая формула, это должно быть оговорено.

Метод, рекомендованный МКО, может быть продемонстрирован на следующих примерах. В табл. 2.16 и на рис. 2.30 приведены спектральные апертурные коэффициенты отражения $\beta^{(0)}(\lambda)$, $\beta^{(1)}(\lambda)$, $\beta^{(2)}(\lambda)$ трех образцов, которые при освещении стандартным излучением D_{65} создают метамерные несамосветящиеся стимулы

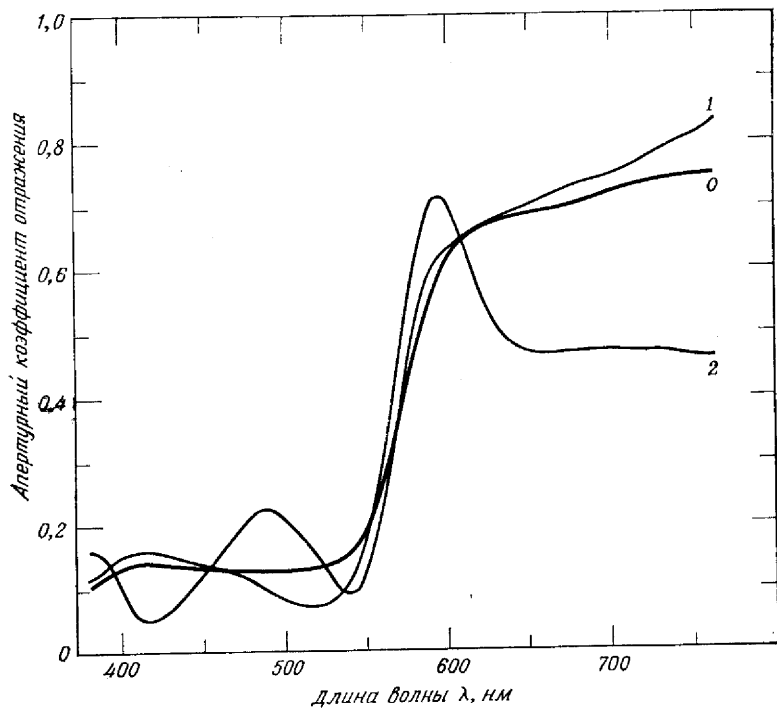


Рис. 2.30. Кривые спектрального апертурного коэффициента отражения трех образцов, образующих при освещении стандартным излучением D_{65} метамерные стимулы относительно стандартного наблюдателя 1931 г.

Кривые нанесены по данным табл. 2.16.

$\beta^{(0)}S(\lambda)$, $\beta^{(1)}S(\lambda)$, $\beta^{(2)}S(\lambda)$ относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. Следовательно, координаты цвета трех стимулов идентичны

$$X_0 = X_1 = X_2, \quad Y_0 = Y_1 = Y_2, \quad Z_0 = Z_1 = Z_2.$$

Из этого вытекает, что цветовое различие ΔE между любой из трех пар стимулов $(0, 1)$, $(0, 2)$, $(1, 2)$ равно нулю.

При переходе от излучения D_{65} к A , F_1 , F_2 и F_3 (табл. 2.15) получатся другие несамосветящиеся стимулы, относящиеся к трем

образцам, приведенным в табл. 2.16, с неодинаковыми координатами цвета, а цветовые различия между парами не равны нулю. В табл. 2.17 приведены результаты расчетов координат цветности x , y и коэффициента яркости Y . Цветовые различия ΔE были рассчитаны с помощью формулы МКО 1964 г., которая будет детально обсуждаться в одном из последующих разделов этой книги. В табл. 2.17 приводятся различия лишь для пар $(0, 1)$ и $(0, 2)$.

Таблица 2.17

Координаты цветности x , y и коэффициенты яркости Y трех образцов $(0, 1, 2)$ относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. при освещении излучениями D_{65} , A , F_1 , F_2 , F_3 . Приведены также величины цветовых различий ΔE между образцами $0, 1$ и $0, 2$ при освещении каждым из пяти излучений

Образец		D_{65}	A	F_1	F_2	F_3
0	x_0	0.4691	0.5680	0.5577	0.5184	0.4691
	y_0	0.3643	0.3847	0.3876	0.3870	0.367
	Y_0	33.00	40.25	39.72	36.85	33.08
1	x_1	0.4691	0.5683	0.5629	0.5231	0.4741
	y_1	0.3643	0.3810	0.3847	0.3856	0.3699
	Y_1	33.00	40.23	39.36	36.55	32.76
2	x	0.4691	0.5592	0.5454	0.5135	0.4685
	y	0.3643	0.3941	0.3989	0.3926	0.3675
	Y	33.00	40.36	40.33	37.88	33.28
	$\Delta E_{0,1}$	0.0	2.5	4.7	3.3	1.9
	$\Delta E_{0,2}$	0.0	10.9	13.4	5.0	0.2

В соответствии с описанным выше методом МКО определения индекса метамеризма M_t из табл. 2.17 можно заключить, что пары образцов $(0, 1)$ и $(0, 2)$ имеют следующие значения индексов:

	Пара $(0, 1)$	Пара $(0, 2)$
M_A	2,5	10,9
M_{F_1}	4,7	13,4
M_{F_2}	3,3	5,0
M_{F_3}	0,2	1,9

Эти примеры показывают, что индекс метамеризма может сильно меняться в зависимости от выбора для его оценки тестовых

вого излучения. Для обеих пар максимальные значения индекса получаются при тестовом излучении F_1 (люминесцентная лампа 3000 К), минимальные — при F_3 (люминесцентная лампа 6500 К). Если за исходное принято излучение D_{65} , аналогичный результат будет получаться в большинстве практических случаев.

Можно отметить также, что у пары (0, 2) индекс всегда больше, чем у пары (0, 1). Этот результат трудно предположить при простом рассмотрении рис. 2.30, так как нельзя непосредственно оценить важность различий между образцами 0 и 1, а также 0 и 2.

Если считать образец 0 исходным, а образцы 1 и 2 — его копиями, предназначенными для воспроизведения исходного цвета при освещении излучением D_{65} , расчеты показывают, что образец 1 является более удачной копией, так как у него ниже степень метамеризма с исходным образцом 0 относительно лампы накаливания или различных люминесцентных ламп. Однако даже у образца 1 степень метамеризма относительно люминесцентных ламп с низкой цветовой температурой довольно значительна. Если значения индекса метамеризма превышают 2 или 3, нарушение равенства между оригиналом и копией может стать неприемлемым при этих освещенностях.

Вопрос о том, какое количество различных тестовых излучений t достаточно для адекватной оценки степени метамеризма изучался Брокесом [66, 67]. Для многих практических задач число тестовых излучений может быть ограничено двумя: одно излучение А, а другое — тепло-белая люминесцентная лампа deluxe, например F_1 .

МКО называет свой индекс метамеризма M_t частным индексом метамеризма при замене излучения. Индекс имеет специфику в том смысле, что степень метамеризма оценивается с точки зрения использования ограниченного числа специфических излучений. Возможны и другие частные индексы [728]. В настоящее время Комитет по колориметрии МКО разрабатывает частный индекс метамеризма при замене наблюдателя.

Такой индекс может быть полезным в двух важных случаях. Большинство метамерных несамосветящихся стимулов метамерны как относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г., так и относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. Если используется стандартный наблюдатель МКО 1931 г., стимулы одноцветны при полях зрения от 2 до 4°. Если же имеют дело с дополнительным стандартным наблюдателем МКО 1964 г., то стимулы одноцветны при наблюдении полей зрения с размерами 10° или более. В общем случае стимулы, одноцветные при малых полях, не обязательно останутся одноцветными при больших полях зрения, и наоборот (рис. 2.22). Величина отклонения от равенства будет зависеть от различий по спектру между двумя стимулами. В этой связи и предлагается оценивать различия между спектрами

двух стимулов при замене наблюдателя степенью метамеризма между ними. В частности, если два стимула метамерны относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г., т. е. одноцветны при полях зрения от 2 до 4°, степень метамеризма между ними может быть определена разницей в цвете, наблюдаемой при переходе к полю зрения 10° или более. При расчете координат цвета обоих стимулов с последующим расчетом цветового различия стандартный наблюдатель МКО 1931 г. заменяется дополнительным стандартным наблюдателем МКО 1964 г.

Численный расчет частного индекса метамеризма при замене наблюдателя проводится по следующей схеме.

Пусть имеются два несамосветящихся стимула $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda)$, что

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda} \beta^{(1)} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) &= \sum_{\lambda} \beta^{(2)} S(\lambda) \bar{x}(\lambda), \\ \sum_{\lambda} \beta^{(1)} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) &= \sum_{\lambda} \beta^{(2)} S(\lambda) \bar{y}(\lambda), \\ \sum_{\lambda} \beta^{(1)} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) &= \sum_{\lambda} \beta^{(2)} S(\lambda) \bar{z}(\lambda). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Естественно, $\beta^{(1)}(\lambda) \neq \beta^{(2)}(\lambda)$. Излучение $S(\lambda)$ является одним из стандартных излучений МКО, например D_{65} , а $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ являются функциями сложения, определяющими стандартного наблюдателя МКО 1931 г. С помощью уравнений (2.25) можно установить, что координаты цвета обоих несамосветящихся стимулов в системе МКО 1931 г. идентичны, т. е.

$$X^{(1)} = X^{(2)}, \quad Y^{(1)} = Y^{(2)}, \quad Z^{(1)} = Z^{(2)}.$$

При переходе к дополнительному стандартному наблюдателю МКО 1964 г. новые координаты цвета обоих заданных стимулов можно получить с помощью уравнений

$$\begin{aligned} X_{10}^{(1)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda), & X_{10}^{(2)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda), \\ Y_{10}^{(1)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda), & Y_{10}^{(2)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda), \\ Z_{10}^{(1)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda), & Z_{10}^{(2)} &= k_{10} \sum_{\lambda} \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda), \end{aligned} \quad (2.26)$$

где k_{10} — нормирующий коэффициент, используемый при расчете координат цвета:

$$k_{10} = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda)}. \quad (2.27)$$

В общем случае новые координаты цвета обоих стимулов не идентичны

$$X_{10}^{(1)} \neq X_{10}^{(2)}, \quad Y_{10}^{(1)} \neq Y_{10}^{(2)}, \quad Z_{10}^{(1)} \neq Z_{10}^{(2)}$$

и цветовое различие ΔE может быть рассчитано по этим координатам, например, с помощью формул МКО 1964 г., обсуждаемых в одном из последующих разделов этой книги. Величина ΔE может быть принята в качестве непосредственной оценки степени метамеризма двух рассматриваемых несамосветящихся стимулов.

Можно отметить, что метод определения этого индекса метамеризма очень похож на метод определения частного индекса при замене излучения. В одном случае в уравнениях (2.25) заменяется $S(\lambda)$, а в другом — функции сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$; в остальном — расчеты одинаковы.

Переход от малого поля зрения к большому при наблюдении несамосветящихся стимулов, возможно, и имеет некоторое практическое значение, однако еще большее значение может иметь случай, когда степень метамеризма оценивается при переходе от одного из двух стандартных наблюдателей МКО к реальному.

Известно, что дополнительный стандартный наблюдатель МКО 1964 г. устанавливает лишь предполагаемую оценку средним наблюдателем с нормальным цветовым зрением пары метамерных несамосветящихся стимулов при наблюдении их в поле зрения 10° или более. Такой прогноз ничего не говорит о возможных различиях во мнениях между отдельными наблюдателями, рассматриваемыми одни и те же стимулы. Фактически оценка каждого наблюдателя из данной группы может до некоторой степени расходиться с прогнозом стандартного наблюдателя, и только усреднение оценок всей группы может дать совпадение с этим прогнозом. На практике интерес представляет именно реальный наблюдатель, в связи с чем необходимо знать, насколько могут расходиться оценки отдельных наблюдателей как между собой, так, в частности, и с расчетной оценкой стандартного наблюдателя.

Если функции сложения каждого наблюдателя известны, с их помощью можно рассчитать соответствующие координаты цвета двух стимулов, после чего можно сравнить между собой новые координаты цвета с координатами, полученными относительно различных наблюдателей, в том числе и стандартных. Затем новые координаты цвета можно использовать для расчета цветовых различий, а они в свою очередь могут дать оценку степени метамеризма между двумя стимулами при переходе к новому наблюдателю.

Этот метод можно применить к дополнительному стандартному наблюдателю МКО 1964 г., поскольку были опубликованы результаты определения функций сложения отдельных наблюдателей,

которые приняли участие в получении данных стандартного наблюдателя [736]. Однако численные расчеты при этом довольно трудоемки, и поэтому колориметристы-практики не уделяют этой проблеме должного внимания [66].

Аллен [12] предложил метод замены множества совокупностей функций сложения отдельных наблюдателей одной совокупностью функций, отличающихся от функций сложения стандартного наблюдателя на стандартное, среднеквадратичное отклонение, рассчитанное для ряда совокупностей функций сложения отдельных наблюдателей. Эта особая группа функций определяет нового наблюдателя, которого Аллен назвал *наблюдателем со стандартным отклонением*.

Для этого нового наблюдателя может быть установлен частный индекс метамеризма, определение которого возможно с помощью описанного ранее метода (2.25)—(2.27). Дополнительный стандартный наблюдатель МКО 1964 г. должен быть заменен наблюдателем со стандартным отклонением. Новые координаты цвета, по-видимому, отличаются от первоначальных на величину, соответствующую стандартному отклонению между функциями сложения отдельных наблюдателей и стандартного наблюдателя. Вновь для оценки степени метамеризма можно рассчитать цветовые различия.

Метод Аллена чрезвычайно интересен и заслуживает дальнейших теоретических исследований и практической проверки.

Метамерное различие. Для того чтобы воспроизвести цвет данного образца, изготовитель может действовать в одном из двух основных направлений. Во-первых, он может попытаться определить фактические красители и их относительные пропорции, использованные для получения цвета исходного образца. В случае успеха можно использовать оригинальную рецептуру красителей и получить дубликат с хорошими возможностями достигнуть идеального равенства в связи с идентичностью спектральных характеристик дубликата и оригинала. Однако слишком часто первая попытка оказывается до некоторой степени неудачной, и между копией и оригиналом сохраняется цветовое различие. Кривая спектральных апертурных коэффициентов отражения дубликата отличается по всему спектру от кривой исходного образца, хотя по форме они обычно почти одинаковы. Это простое различие между спектрами выявляется в виде различия по светлоте, в то время как цветовой тон и насыщенность цвета обоих образцов остаются примерно одинаковыми. На рис. 2.31 показан пример пары образцов (1 и 2) с простым различием между их спектральными характеристиками.

Часто бывает нецелесообразно, да и невозможно воспроизвести цвет исходного образца с помощью тех же самых красителей.

В этом случае следует попытаться получить метамерное равенство с помощью имеющихся в наличии красителей, или красителей, которые, возможно, более стойки к воздействию химических веществ или продолжительному облучению солнечным светом. Как и прежде, первые несколько попыток обычно не приводят к желаемому метамерному равенству, однако вместо этого получается лишь приближенное цветовое равенство. Спектральная характеристика дубликата в этом случае имеет форму, близкую

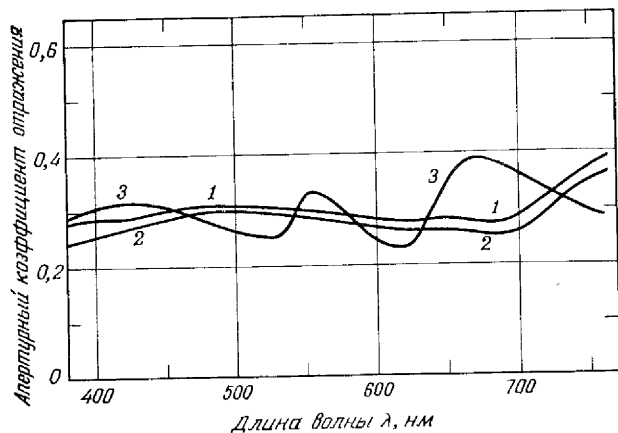


Рис. 2.31. Примеры кривых спектрального апертурного коэффициента отражения образцов с простым (1 и 2) и сложным или метамерным (1 и 3) различием по спектру.

к форме кривой при метамерном равенстве, поскольку спектральные кривые копии и оригинала пересекаются по крайней мере в трех точках, но отличаются друг от друга по всему видимому спектру [636]. Различия по спектру между дубликатом и исходным образцом носят сложный характер, поскольку первоначальная задача заключалась в получении метамерной пары, о таких образцах говорят, что они обнаруживают *метамерное различие*. Когда оба образца наблюдаются при заданном освещении, цветовое различие между ними обычно складывается из различий по светлоте, цветовому тону и насыщенности, причем появление любого из них равновероятно. На рис. 2.31 показан пример пары образцов (1 и 3) со сложным различием между их спектральными характеристиками.

В большинстве практических случаев точное метамерное равенство встречается редко, если встречается вообще. В некоторых случаях остаточное цветовое различие между двумя образцами может быть настолько мало, что им можно пренебречь. В других случаях, особенно когда должны выполняться последующие

колориметрические расчеты, необходимо учитывать остаточное различие. Важный аспект этой проблемы заключается в определении МКО индекса метамеризма при замене излучения.

Метод МКО, обсуждавшийся выше, устанавливает, что если два образца, индекс метамеризма которых необходимо оценить, не будут точно одноцветны при исходном излучении, нарушение равенства должно быть учтено соответствующим образом. Например, там, где возможно, должна быть произведена коррекция рецептуры красителей для получения точного равенства, в противном случае следует применить аддитивную или мультипликативную коррекцию. Метод МКО не дает детальной расшифровки способа применения аддитивной или мультипликативной коррекции; эти способы, разработанные Брокесом [66, 67], заключаются, по существу, в следующем.

а. *Аддитивная коррекция*. Пусть, как уже говорилось, координаты цвета двух образцов при освещении исходным излучением не идентичны, и имеют место ненулевые различия $\Delta X = X_1 - X_2$, $\Delta Y = Y_1 - Y_2$, $\Delta Z = Z_1 - Z_2$. Начальная стадия расчета частного индекса метамеризма при замене излучения такая же, как если бы ΔX , ΔY , ΔZ равнялись нулю, т. е. рассчитываем новые координаты цвета двух образцов относительно тестового излучения, игнорируя метамерное различие между двумя образцами. Однако, прежде чем рассчитать цветовое различие ΔE по новым координатам цвета X'_1, Y'_1, Z'_1 (образец 1) и X'_2, Y'_2, Z'_2 (образец 2), производится следующая аддитивная коррекция координат цвета образца 2:

$$X''_2 = X'_2 + \Delta X, \quad Y''_2 = Y'_2 + \Delta Y, \quad Z''_2 = Z'_2 + \Delta Z.$$

Скорректированные координаты цвета X''_2, Y''_2, Z''_2 вместе с координатами X'_1, Y'_1, Z'_1 используются затем для расчета величины ΔE , которая в свою очередь используется в качестве оценки степени метамеризма двух данных образцов при исходном освещении.

б. *Мультипликативная коррекция*. Ход расчета аналогичен методу, приведенному выше, за исключением того, что вместо разностей исходных координат цвета определяются их отношения, т. е. рассчитываются величины

$$f_X = \frac{X_1}{X_2}, \quad f_Y = \frac{Y_1}{Y_2}, \quad f_Z = \frac{Z_1}{Z_2},$$

которые затем используются для коррекции координат цвета X'_2, Y'_2, Z'_2 образца 2. Скорректированные координаты цвета

$$X''_2 = f_X X'_2, \quad Y''_2 = f_Y Y'_2, \quad Z''_2 = f_Z Z'_2$$

вместе с координатами X'_1, Y'_1, Z'_1 образца 1 используются для расчета ΔE .

Брокес [67] показал, что в некоторых практических случаях мультипликативная коррекция дает более удовлетворительные результаты, чем аддитивная.

КОЛОРИМЕТРЫ

ВИЗУАЛЬНЫЕ КОЛОРИМЕТРЫ

Визуальный колориметр — это прибор, в котором неизвестное излучение (цветовой стимул) заполняет одну часть поля зрения, а другая прилегающая часть (поле сравнения) может заполняться одним за другим известными стимулами. Оператор, наблюдающий оба эти поля, регулирует стимул в поле сравнения до тех пор, пока он не станет одноцветным с неизвестным стимулом. Известные показания регулировок принимаются в качестве характеристики цвета исследуемого стимула.

В первой главе этой книги (рис. 4.12) при обсуждении принципов уравнивания по цвету уже описывался простой визуальный колориметр. Ниже будут более детально рассмотрены типичные конструкции визуальных колориметров.

Визуальные колориметры могут классифицироваться в зависимости от способа получения известных стимулов в поле сравнения. Первый способ заключается в смешении в различных пропорциях трех постоянных по цветности стимулов; второй — в смешении двух стимулов: одного с постоянной цветностью, а другого — с переменной; при третьем способе имеется лишь один стимул, цветность которого регулируется путем введения трех цветных фильтров с переменной толщиной. Поскольку цвет является трехмерной величиной, в любом визуальном колориметре должно быть три независимых регулировки стимула поля сравнения.

Если поле сравнения заполняется одновременно или в быстрой последовательности тремя стимулами с различными постоянными цветностями, причем их количества (яркости) меняются независимо друг от друга, колориметр называется *трехцветным*.

Если поле сравнения заполняется одновременно двухкомпонентной смесью, состоящей из стимулов ахроматического (или нейтрального) цвета и спектрального с варьируемой длиной волны, причем имеются независимые регулировки их количеств (яркостей), колориметр дает возможность непосредственно измерять доминирующую длину волны и чистоту цвета (рис. 2.27). Длина волны спектрального стимула при цветовом равенстве полей колориметра называется *доминирующей длиной волны измеряемого стимула*. Чистота цвета определяется отношением количеств (яркостей) двух компонент смеси в поле сравнения.

Назначение визуальных колориметров состоит в непосредственном получении простым способом трехмерной характери-

ки цветового стимула. Эти характеристики, по крайней мере потенциально, могут быть преобразованы в координаты цвета X , Y , Z цветового стимула в колориметрической системе МКО.

Трехцветные колориметры. Координаты цвета X , Y , Z можно получить, непосредственно сравнивая неизвестное излучение с оптической смесью трех основных стимулов в фотометрическом поле зрения. Трехцветный колориметр представляет собой совокупность оптических и механических узлов, предназначенных для заполнения тестового поля исследуемым излучением, а поля сравнения — смесью трех рабочих основных цветов. Поскольку в стандартной колориметрической координатной системе МКО основные цвета являются нереальными, они не могут быть применены в качестве рабочих основных цветов в колориметрах. Следовательно, в трехцветных колориметрах нельзя непосредственно получить координаты X , Y , Z , однако их значения можно рассчитать по показаниям R , G , B колориметра с помощью уравнения (4.11). Это уравнение преобразования устанавливает простую связь между основными цветами колориметра **RGB** и основными цветами X , Y , Z в колориметрической системе МКО.

Значения коэффициентов трансформации (X_r , Y_r , Z_r ; X_g , Y_g , Z_g ; X_b , Y_b , Z_b) определяются при градуировке трехцветного колориметра. Если эти коэффициенты нельзя определить непосредственно путем расчета по данным спектрофотометрических измерений, необходимую информацию можно получить, измеряя на колориметре четыре стимула с известными цветностями, при условии, что ни один из них не равен по цвету смеси любых двух других стимулов.

При выборе рабочих основных цветов для трехцветного колориметра, естественно, стремятся к воспроизведению как можно большего числа цветов. Было показано, что невозможно получить все цвета путем аддитивного смешения трех стимулов с фиксированными цветностями, однако достижение по возможности наибольшего цветового охвата является существенным преимуществом любого колориметра. Если выбрать две цветности у краев спектра, а третью — у средней (зеленой) его части (520 нм), то можно получить цветовой охват, близкий к максимальному (рис. 2.32). Можно отметить, что при таком выборе основных цветов в цветовой охват не попадают чистые желтые и чистые сине-зеленые цвета.

Недостатком основных цветов, выбранных для обеспечения максимального цветового охвата, является то обстоятельство, что два основных цвета (красный и синий) у концов спектра обязательно должны иметь низкую светлоту, и для того чтобы получить поле преимущественно высокой яркости, требуется сравнительно большая энергия излучения источника света в колориметре. По

этой причине основные цвета, выбранные Гилдом [205] и Райтом [701], результаты экспериментов которых легли в основу данных стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г., не обеспечивают максимального цветового охвата, а представляют

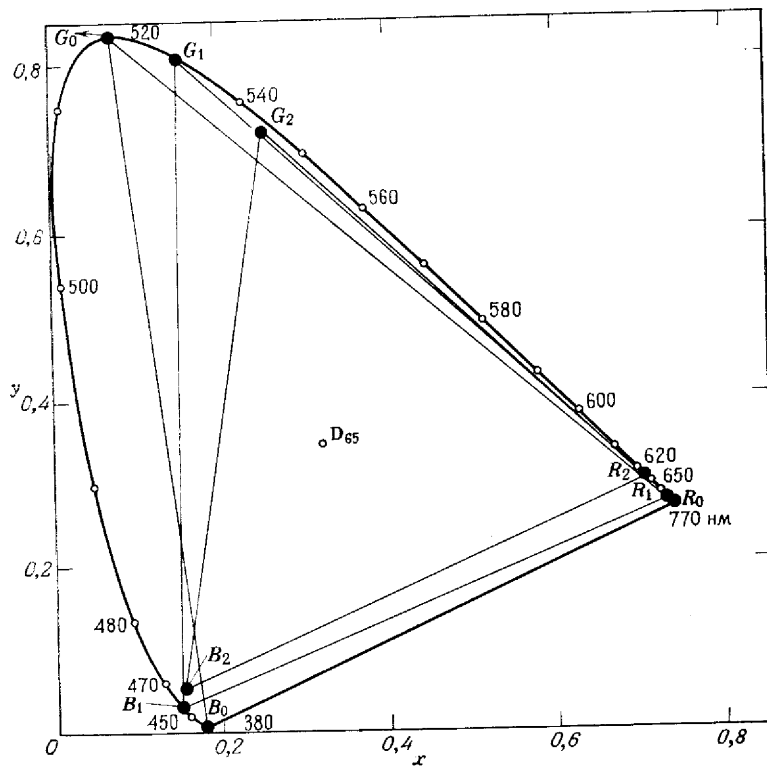


Рис. 2.32. Выбор реальных основных цветов для трехцветных колориметров. R_0, G_0, B_0 — реальные цвета с практически максимальным цветовым охватом; R_1, G_1, B_1 — основные цвета Райта; R_2, G_2, B_2 — основные цвета Гилда.

компромисс между высокой яркостью основных стимулов и максимальным охватом. На рис. 2.32 показаны треугольники, соответствующие основным цветам, выбранным Райтом (460, 530 и 650 нм), и основным цветам, полученным Гилдом с помощью источника света и цветных светофильтров. Необходимо отметить, что обе совокупности основных цветов составляют треугольники, охватывающие значительно меньшую область реальных цветностей, чем это возможно при ином выборе. Отдали также предпочтение охвату чистых желтых цветов по сравнению с чистыми сине-зелеными, поскольку последние менее важны для практического использования.

Попытки применения трехцветных колориметров в промышленности были весьма затруднительными. Ограниченный цветовой охват привел к исключению многих, практически важных, цветов. Это заставило разработать колориметр, в котором обеспечена возможность добавления любого из основных цветов не только в поле сравнения, но и в тестовое поле. В таких случаях не все координаты цвета в системе рабочих основных цветов положительны, например G и B могут быть положительными числами, а R — отрицательным, определяя тем самым, что измеряемый сине-зеленый цвет должен быть для получения равенства со смесью зеленого и синего рабочих основных цветов разбавлен некоторой частью красного основного рабочего цвета.

Решающим неудобством является не высокая стоимость колориметров или трудность получения результатов в стандартной колориметрической системе, а их малая чувствительность. Кажется парадоксальным, что колориметр, в котором равенство устанавливается глазом, может быть менее чувствительным, чем невооруженный глаз. Разница в данном случае составляет $\sim 500\%$ или в 5 раз. Основным методом контроля цвета промышленных изделий является бинокулярное наблюдение большого поля на светлом фоне. В визуальном трехцветном колориметре наблюдение слабо освещенного поля небольшого размера на темном фоне производится обычно одним глазом через небольшое отверстие. Малый угловой размер поля зрения является серьезной помехой; как уже было показано (рис. 2.19), неточность установки равенства по цветности резко увеличивается с уменьшением углового размера поля. Даже при наличии трехцветного колориметра с широким цветовым охватом и большим полем зрения, например размером $10-15^\circ$, все равно было бы трудно получить точное цветовое равенство при контроле промышленного изделия (например, пластикового покрытия электровыключателей) из-за появления четко различимого пятна Максвелла, вызванного значительным метамеризмом полей колориметра. В смеси поля сравнения преобладает энергия в длинноволновой, средней и коротковолновой частях спектра (красной, зеленой, синей) по сравнению с промежуточными длинами волн (желтые и сине-зеленые цвета). Для излучения, отраженного от промышленных изделий, такое распределение энергии не характерно. Поэтому увеличение размера поля свыше 2° нежелательно. Неточность уравнивания по цветности составляет 0,005 по x и y , в то время как при прямом сравнении двух пластинок почти идентичного цвета легко обнаруживается разница в 0,001 по x и y . Поэтому общий случай заключается в установке при измерениях на трехцветном колориметре идентичности цвета двух сравниваемых изделий, в то время как даже случайное прямое сравнение обоих этих изделий невооруженным глазом (особенно когда различия по спектру носят простой

характер (рис. 2.31) показывало бы, что их цвет неодинаков. По этим причинам визуальные трехцветные колориметры с широким цветовым охватом в промышленности не применяются.

Другим следствием метамерного характера цветового равенства в трехцветном колориметре является тот факт, что различные наблюдатели с нормальным цветовым зрением устанавливают это равенство по-разному, за исключением случайных совпадений. Чтобы уменьшить этот эффект, обычно для каждого наблюдателя прибор градуируется индивидуально так, чтобы координаты цвета определенного стандартного стимула (например, стандартных излучений D_{65} или A) совпадали с координатами цвета относительно стандартного наблюдателя. Даже при такой коррекции, когда обеспечено достаточное приближение к стандартным значениям X , Y , Z , все равно необходимо усреднение отсчетов 5 или 10 наблюдателей или использование цветового стандарта, близкого по спектральному составу к измеряемому образцу.

Трехцветные колориметры с широким цветовым охватом редко применяются для контроля цвета в промышленности, так как они дают недостаточную информацию об измеряемом образце. Однако вследствие той легкости, с которой может быть воспроизведена относительно богатая гамма цветов, трехцветные колориметры являются весьма полезными устройствами для визуальных исследований. Созданы многие виды трехцветных колориметров, описанные в литературе (например, [736]). В большинстве приборов основные цвета создаются излучением источника света в сочетании с цветными стеклянными или желатиновыми фильтрами. Заметное исключение представляют колориметры Райта [701] и Стайлса [630]. На рис. 2.33 показана принципиальная схема колориметра Стайлса, обычно называемого трихроматором NRL (Национальная физическая лаборатория Великобритании). Он был использован Стайлсом при определении функций сложения для большого поля более чем у 50 наблюдателей. Как уже упоминалось ранее, эти экспериментальные данные составили большую часть данных, использованных для получения функции сложения дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. Модификации трихроматора NRL используются в Национальном исследовательском центре в Канаде и в Электротехнических лабораториях Японии при различных исследованиях цветового зрения.

В колориметре Дональдсона [135] вместо обычных трех основных цветов используется шесть. С помощью трех дополнительных основных цветов Дональдсон устранил главные недостатки, присутствующие в трехцветном колориметре с широким цветовым охватом. Шесть основных цветов этого прибора имеют спектральные распределения, охватывающие весь видимый спектр с некоторым перекрытием. Эти цвета создаются излучением лампы накалива-

ния в сочетании с каждым из шести цветных фильтров. Вторая группа таких же фильтров, расположенная на диске с семью отверстиями, установлена за окуляром так, что каждый фильтр может

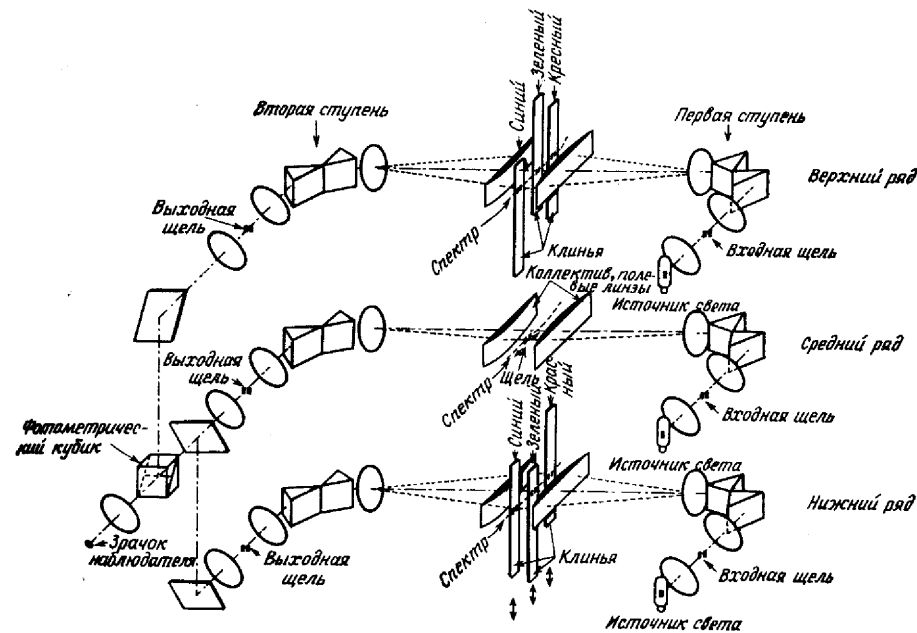


Рис. 2.33. Принципиальная схема колориметра Стайлса (трихроматор NRL). Три двойных монохроматора (с вычитанием дисперсий) установлены вертикально, один под другим. Перемещающаяся вдоль спектра узкая средняя щель монохроматора среднего ряда выделяет исследуемый монохроматический поток, направляемый в фотометрический кубик и заполняющий половину поля зрения. Три фиксированные средние щели монохроматора верхнего ряда выделяют основные цвета, яркость которых регулируется нейтральными клиньями. Основные цвета смешиваются второй ступенью верхнего монохроматора и направляются в фотометрический кубик, где они заполняют другую половину поля зрения. Нижний ряд построен аналогично верхнему, но смесь основных цветов здесь используется для уменьшения насыщенности исследуемого монохроматического излучения. Изображения всех трех выходных щелей монохроматоров проецируются в одну точку (размером $\sim 2 \text{ мм}^2$), совмещенную с центром зрачка наблюдателя (схема наблюдения Максвелла), который видит разделенное пополам поле; форма и размер поля могут меняться при смене фотометрических кубиков [632].

быть введен поочередно в пучок наблюдения (рис. 2.34). Излучение от измеряемого образца заполняет одну половину фотометрического поля, а смесь шести основных стимулов — другую. Наблюдатель смотрит через один из шести фильтров в пучке наблюдения и регулирует яркость соответствующего основного цвета до получения приближенного равенства светлоты обеих половин поля. Эта процедура повторяется и для остальных пяти фильтров. Затем цветные фильтры выводятся из пучка наблюдения, и наблю-

датель рассматривает обе половины поля непосредственно. Поскольку отдельные части спектра обоих излучений уже более или менее уравнены, будет иметь место приближенное цветовое равенство. Более того, спектральные составы обоих излучений

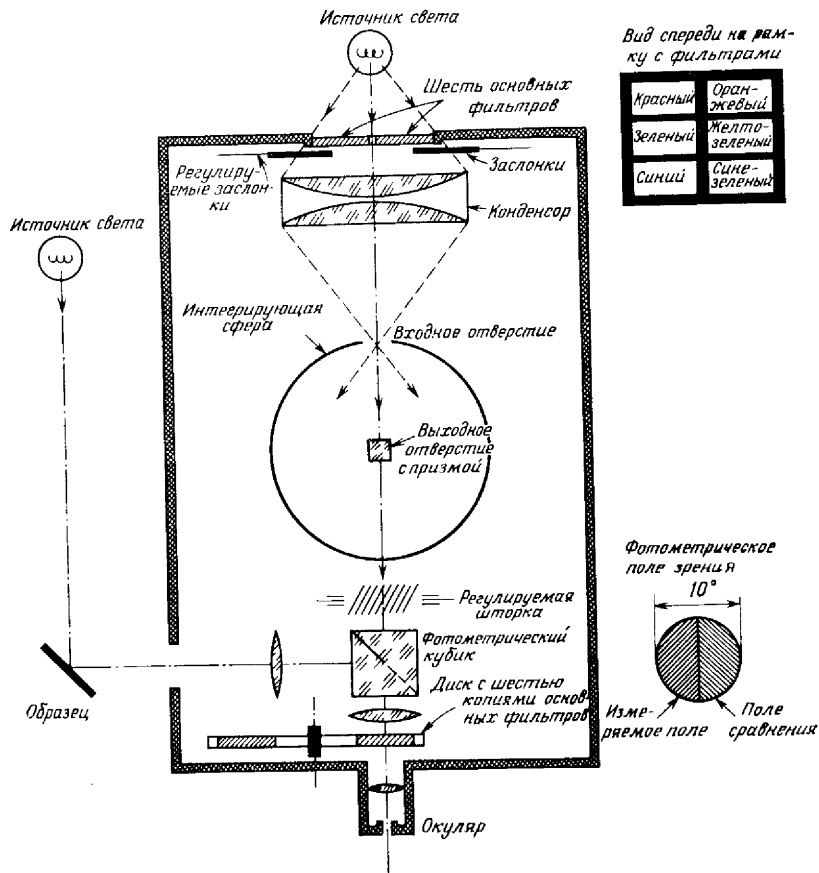


Рис. 2.34. Принципиальная схема шестичетного колориметра Дональдсона с полем зрения 10° и монокулярным наблюдением.

также будут почти идентичны, что позволяет по желанию увеличить поле зрения колориметра: пятно Максвелла, нарушающее точность установки равенства, не появится. Окончательная установка точного цветового равенства достигается соответствующим изменением красного, зеленого и синего основных цветов. Прибор может быть отградуирован относительно координат цвета в стан-

дартной системе МКО [735], т. е. координаты X, Y, Z каждого из шести основных цветов известны. Координаты X, Y, Z измеряемого цвета определяются простым сложением вклада каждого из 6 основных цветов, возможным в соответствии с (1.2) (законы Грассмана). Колориметр Дональдсона совсем не используется при

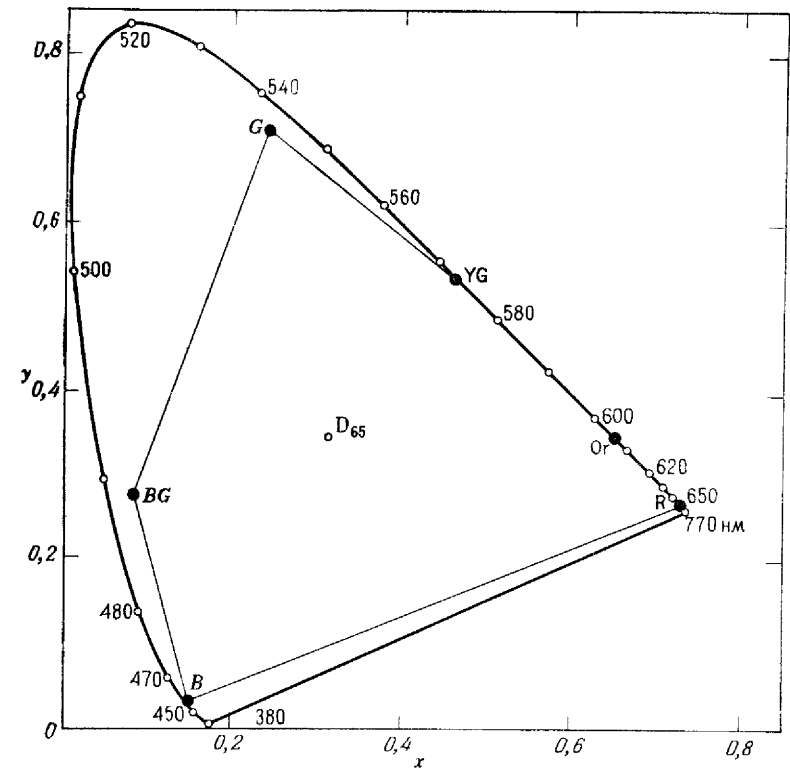


Рис. 2.35. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с цветностями основных цветов колориметра Дональдсона.

контроле цвета промышленных изделий в США, хотя он обладает всеми качествами для успешного применения его в этой области. Его цветовая гамма (рис. 2.35) охватывает, за редким исключением, почти все практически достижимые цвета; прибор позволяет наблюдателю почти оптимально использовать цветоразличительную способность глаза; колориметр может быть применен для измерения цвета отражающих, пропускающих и самосветящихся образцов.

Колориметры, подобные колориметру Дональдсона, нашли широкое применение в ряде исследований, например бинокулярный колориметр Мак Адама [404, 700] и колориметр с семью полями, описанный Вышецки [726].

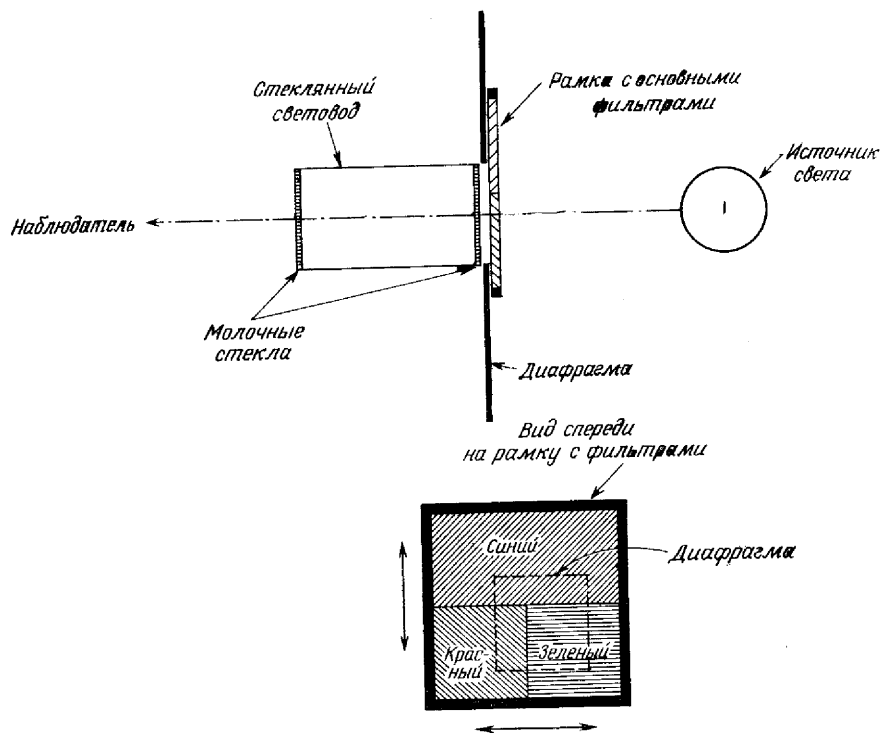


Рис. 2.36. Принципиальная схема колориметра Бернема.

Излучение лампы накаливания проходит через рамку с основными светофильтрами (красным, зеленым и синим) диафрагму, площадь которой равна $\frac{1}{4}$ площади светофильтров, и стеклянный световод, торцы которого закрыты молочным стеклом, цвет которого регулируется товода равномерно заполнен смесью основных стимулов, цвет которой регулируется перед перемещением рамки с фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях неподвижной диафрагмой. Яркость поля зрения может регулироваться любым ослабленным телом, установленным между источником света и рамкой. Вместо показанной на рисунке рамки может быть использовано любое другое устройство с четырьмя или большим числом основных фильтров. Обычно для исследования цветового равенства или иных задач используются одновременно два одинаковых колориметра, поля которых сводятся рядом.

К другому типу визуального колориметра, часто используемого в исследовательской практике, относится колориметр Бернема [83], схема которого показана на рис. 2.36. Этот прибор может иметь довольно компактную конструкцию и сравнительно малую стоимость.

В упомянутых выше трехцветных колориметрах смесь в поле сравнения составляется комбинацией световых пучков от различных источников таким образом, что суммарный эффект достигается либо при непрерывном освещении, либо при усреднении во времени мельканий с частотой, выше критической частоты слияния мельканий. Этот последний принцип лежит в основе схемы очень простого и широко применяемого трехцветного колориметра с четырьмя дисками с вырезанными секторами; упомянутые диски укреплены на валу двигателя и вращаются так быстро, что не видны не только отдельные сектора, но и сами мелькания. Такое устройство для смешения цветов с помощью вращающегося диска уже рассматривалось под наименованием диска Максвелла (рис. 1.22). Четыре диска обеспечивают три необходимые степени свободы при установке равенства; если координаты цвета отдельных дисков известны, координаты цвета смеси могут быть рассчитаны при учете площадей секторов.

Колориметр с диском Максвелла раньше применялся при промышленном контроле цвета [489, 491], однако в современной практике используется очень редко.

Субтрактивные колориметры. Если в визуальном колориметре цвет поля сравнения регулируется путем введения в единый световой пучок, освещающий поле, трех фильтров, то такой колориметр называется субтрактивным. Каждый из трех фильтров вычитает определенную часть из спектра падающего излучения.

Субтрактивные колориметры могут быть применены для измерения цвета самосветящихся поверхностей отражающих и пропускающих образцов, однако в последнем случае их применение наиболее оправдано. Так как цвет поля сравнения регулируется пропускающими свет фильтрами, источник света колориметра может служить и для освещения измеряемого фильтра; при этом допустимы небольшие изменения излучения источника, поскольку они не влияют на установку равенства.

Главная трудность при работе с субтрактивными колориметрами заключается в их градуировке, которая дает возможность получить значения координаты цвета Y и цветности x, y .

Двумя примерами субтрактивных колориметров являются колориметр Джонса и тинтометр Ловибонда.

В субтрактивном колориметре Джонса [309] цветовой стимул в поле сравнения регулируется последовательным введением в пучок излучения лампы накаливания или искусственного дневного света трех цветных желатиновых клиньев, окрашенных сине-зеленым циановым, пурпурным фуксиновым и желтым красителями. Цветовое равенство достигается регулировкой положения этих клиньев, поглощающих в основном красное, зеленое и синее излучение соответственно. Поэтому субтрактивный колориметр экви-

валентен трехцветному колориметру, в котором основные цвета, однако, несколько меняются по цветности при изменении толщины клиньев. В приборе имеется также нейтральный клин, так что при желании можно установить равенство с использованием лишь двух цветных клиньев. Такой метод работы в общем случае более удобен, поскольку оператору легче понять, какая требуется регулировка, чтобы скорректировать малое остаточное цветовое различие. Если это различие по цветовому тону, нужно изменить соотношение излучений, прошедших через цветные клинья. Если же цвет поля сравнения недостаточно насыщен, требуется увеличить количество обеих цветных компонент и уменьшить долю нейтральной. Если поле сравнения темнее, чем нужно, следует уменьшить только нейтральную компоненту. Спектральные составы излучений, прошедших через клинья и через исследуемые образцы, обычно довольно близки между собой. По этой причине равенство, как правило, бывает лишь умеренно метамерным, что позволяет использовать большие поля зрения.

Колориметр Джонса является полезным прибором для визуального измерения и контроля процессов обработки цветных фотоснимков [148]. Цветные клинья в этом случае окрашиваются теми же красителями, которые используются в цветной фотографии. Если равенство получено, то как тестовое поле, так и поле сравнения оказываются окрашенными одинаковыми количествами одних и тех же красителей. Спектральный состав обеих полей автоматически становится одинаковым. Это гарантирует, что установки равенства, выполненные любыми двумя наблюдателями с нормальным трехцветным зрением, будут расходиться незначительно, что является еще одним обстоятельством, позволяющим использовать большие поля наблюдения для увеличения точности установки равенства. Более того, в результате измерения оператор может сразу же узнать, какие количества цианового, фуксина и желтого красителей смешаны в исследуемой области самого фотодиапозитива, ибо для этого не требуется специальной градуировки или пересчета данных. Единственный недостаток субтрактивных колориметров с желатиновыми клиньями при таком применении заключается в отсутствии вполне постоянных характеристик самих клиньев. Это непостоянство затрудняет градуировку прибора в системе МКО, так как всегда имеется вероятность изменения цвета клиньев еще до окончания этой длительной процедуры.

Тинтометр Ловибонда в той или иной модификации [392, 393, 584] широко применяется для цветовых измерений светопроницающих коммерческих продуктов, например смазочные масла, растворители для красок, растительные масла, сахарные растворы, пиво, а также некоторых светоотражающих продуктов, например маргарин. Цвет поля сравнения регулируется введением в све-

товой пучок красного, желтого и синего фильтров Ловибонда. Материалами для окраски этих фильтров являются золото, хром и кобальт. Собственно окрашены лишь тонкие слои накладных стекол, помещенные на прозрачную бесцветную стеклянную подложку. Единица шкалы, определяемой каждой группой фильтров, произвольна, однако соотношение трех единичных ступеней подобрано таким образом, что субтрактивная комбинация одной единицы из красной, желтой и синей шкал при освещении дневным светом воспринимается почти как нейтральный фильтр. Каждая шкала выполняется из многих фильтров, причем каждый маркируется числом единиц, которому он эквивалентен. Если используется комбинация двух или более фильтров одного цвета, то сумма единичных фильтров, которой эквивалентна данная комбинация, определяется простым сложением маркировок каждого отдельного фильтра комбинации. С этой точки зрения шкалы Ловибонда эквивалентны трем цветным клиньям, за исключением того обстоятельства, что цвет должен меняться не плавно, а малыми дискретными скачками. Фактически числа в системе Ловибонда определяют в произвольных единицах толщину трех слоев красящих веществ, необходимых для получения данного цвета с помощью субтрактивной комбинации.

Тинтометр Ловибонда представляет собой прибор, конструкция которого позволяет максимально использовать возможности описанных выше цветных фильтров, изготавливаемых с высокой точностью. Он устроен таким образом, что белая поверхность и установленный рядом с ней неизвестный образец (освещенные соответствующим образом) наблюдаются через окуляр, причем с помощью несложной системы скользящих реек в поле зрения могут быть введены одна, две или три шкалы цветных фильтров Ловибонда. Неизвестный цвет может быть уравнен как фильтром одной шкалы, так и комбинацией из двух или трех фильтров. Если введены все три типа фильтра Ловибонда (красный, желтый и синий), это означает, что измеряемый цвет имеет некоторую серую составляющую и самый низкий из трех оттенков является мерой этой серой составляющей; цветовой оттенок будет в этом случае определяться дополнительными количествами единичных ступеней двух остальных шкал. Прибор предназначен для измерения как жидких, так и твердых образцов. Несмотря на то что равенство, как правило, имеет лишь умеренно метамерный характер, размер поля зрения не превышает 2° , что соответствует использованию стандартного наблюдателя МКО 1931 г. Калибровка фильтров Ловибонда выполняется обычно фирмой-изготовителем с такой точностью, что в данных условиях наблюдения нельзя было обнаружить ни одной остаточной ошибки.

Тинтометр Ловибонда — Шофилда [584] снабжен дополнительным устройством для независимой регулировки яркости поля

сравнения; яркость можно изменять с помощью поворотной ручки на тинтометре и считыванием величины изменения на шкале прибора. Такое устройство освобождает от необходимости менять все

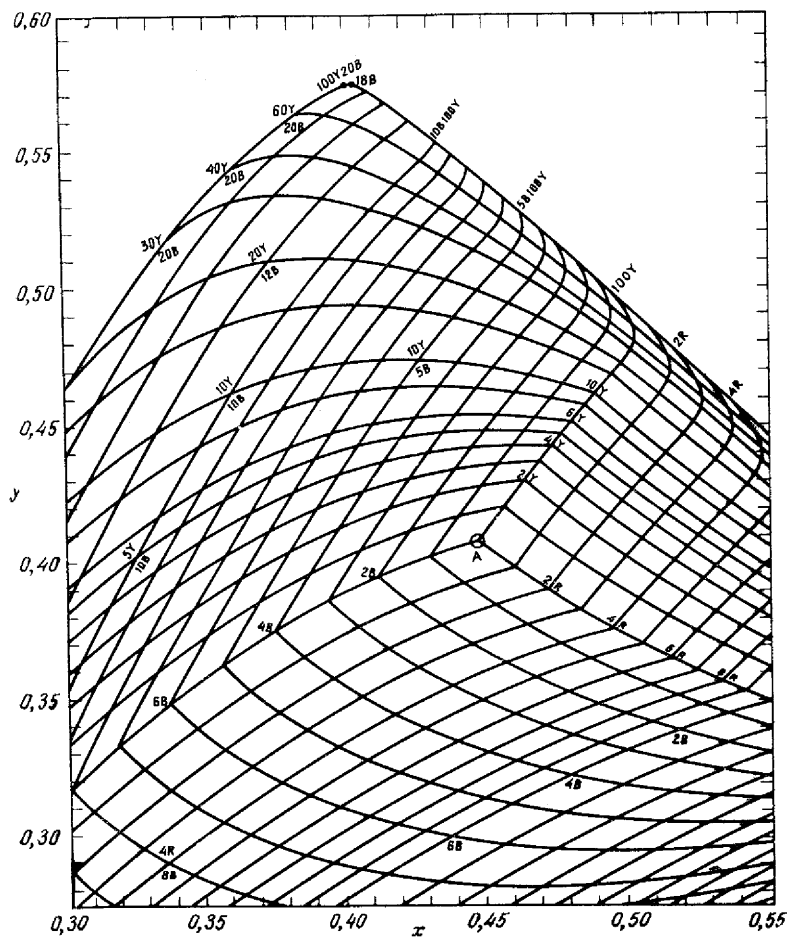


Рис. 2.37. Часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с линиями постоянных значений идеальной красной (R), желтой (Y) и синей (B) цветных шкал Ловибонда при освещении стандартным излучением МКО А [348].

три фильтра Ловибонда (красный, синий, желтый) одновременно. Система Ловибонда позволяет любому наблюдателю с нормальным цветовым зрением легко интерпретировать показания тинтометра, которые сами по себе уже являются характеристикой

данного цвета. Пересчетные номограммы позволяют по отсчетам прибора в системе Ловибонда — Шофилда легко и быстро определить координаты Y, x, y в системе МКО с достаточной для большинства практических задач степенью точности. Освещение производится источником А, однако предусмотрена возможность установки в окуляре прибора жидкостных светофильтров, так что по желанию цвета нелюминесцирующих образцов могут быть определены и относительно источников В или С.

На рис. 2.37, взятом из работы [348], показана часть цветового графика x, y МКО 1931 г. с нанесенными на нем линиями постоянных значений идеальных шкал Ловибонда относительно стандартного излучения А. Сравнительно небольшой охват цветностей, который обеспечивается фильтрами Ловибонда в направлении зеленых цветов, объясняется значительным их пропусканием в длинноволновой части спектра (700 нм), в связи с чем комбинация желтого и синего фильтров дает недостаточно насыщенный зеленый цвет. Однако практика показывает, что этот недостаток не так уж важен при контроле цвета в промышленности и торговле. Гаупт и др. [228] определили цвета идеальных фильтров Ловибонда при освещении стандартными излучениями А и С в трех колориметрических системах координат МКО: цветовом графике x, y 1931 г., графике u, v 1960 г. и системе $U^*V^*W^*$ 1964 г.

Поскольку фильтры Ловибонда обеспечивают умеренно метамерное цветовое равенство для многих коммерческих изделий, отпадает проблема разброса при установке равенства различными наблюдателями. Насколько известно, при правильном обращении (если не поцарапать накладное окрашенное стекло) фильтры сохраняют цвет постоянным в течение длительного времени; с ними удобно работать как в самом тинтометре, так и в составе другого прибора. Результаты измерений в обозначениях Ловибонда легко доступны пониманию; при желании они могут быть пересчитаны в стандартные величины МКО для сопоставления с результатами измерений, выполненных другими методами. Однако необходимо учитывать, что использование фильтров Ловибонда при больших полях зрения может привести к значительным ошибкам. Лишь в том случае, когда фильтры применяются в тинтометрах фирмы «Тинтометр Лимитед», изготовитель гарантирует точность их калибровки.

Компараторы цвета. Как следует из названия, основное назначение компараторов цвета состоит в обеспечении возможности наблюдения двух близко расположенных (но не обязательно прилегающих друг к другу) полей зрения, одно из которых освещено светом стандартного излучения, а другое — светом неизвестного излучения. Две одинаковые чашки чая на обеденном столе уже представляют компаратор цвета. С его помощью можно с первого

взгляда сказать, одинаково ли крепок чай в обеих чашках; или одинаково ли количество сливок в двух чашках кофе, налитых из одного кофейника. Немногим более сложен компаратор цвета, состоящий из держателя с двумя пробирками, поставленными рядом друг с другом и рассматриваемыми на свет, иногда такую конструкцию используют при титровании, чтобы с помощью красителя-индикатора определить наличие кислотных или щелочных свойств растворов. Если у химика имеется в пробирках набор стандартных растворов, он может использовать этот простой компаратор для приблизительной оценки концентрации аналогичного раствора в диапазоне стандартного ряда. В некоторых компараторах вместо пробирок используются кюветы прямоугольного сечения, установленные на прямолинейных или круговых стойках для более удобной манипуляции и наблюдения. В других приборах имеются встроенные осветители и оптические устройства для сопоставления сравниваемых полей. Растворы со слабой концентрацией заливаются обычно в трубки Несслера с плоскими торцами. Световой луч входит в дно трубки и поглощается, пройдя полную высоту раствора. Цвет можно менять добавлением некоторого количества как стандартного, так и исследуемого раствора. В компараторе Дюбоска имеется поршень из оптического стекла, с помощью которого при введении его в исследуемый раствор очень удобно менять эффективную высоту столба раствора. Некоторые компараторы поставляются с наборами для выполнения частного химического эксперимента, например, компаратор Хеллига, применяемый для контроля показателя кислотности растворов для гальванопластики и гальваностегии, воды в прачечных, плавательных бассейнах и очистных сооружениях, контроля цвета виски, пива, лаков и воды, а также в медицинских лабораториях (например, контроль продуктов деятельности печени, анализ крови и мочи). Для детального знакомства с такого рода компараторами можно обратиться к обширному обзору, выполненному Меллоном [436]. Компараторы цвета просты и практичны, поэтому не имеет никакого смысла использовать дорогостоящие трехцветные колориметры там, где требуется лишь сравнение по цвету.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛОРИМЕТРЫ

Фотоэлектрические колориметры представляют собой такие приборы, в которых координаты цвета исследуемого цветового стимула определяются без участия глаза.

Здесь сразу же вспоминаются спектрорадиометры и спектрофотометры, которые в сочетании с соответствующими вычислительными средствами позволяют определить не только спектральные распределения энергии самосветящихся или кривые спек-

трального апертурного коэффициента отражения несамосветящихся стимулов, но и координаты цвета этих стимулов (рис. 2.1 и 2.3). Тем не менее эти приборы обычно не относят к фотоэлектрическим колориметрам. Их основное назначение ограничивается измерением собственно спектрального распределения потока излучения или коэффициентов отражения или пропускания. Колориметрические величины, например координаты цвета, рассчитываются на основе измеренных спектральных характеристик стимула.

Название фотоэлектрические колориметры, или, как иногда говорят, фотоэлектрические трехцветные колориметры, сохраняется обычно за приборами, спектральная чувствительность приемников которых прямо пропорциональна функциям сложения стандартного наблюдателя МКО. Большой эффект от использования таких приборов для контроля цвета в промышленности совершенно очевиден. Большинство серийно выпускаемых колориметров обладает достаточной воспроизводимостью результатов измерений и простотой в работе; измерение на них занимает достаточно мало времени — за день можно измерить множество образцов. Однако многие из этих колориметров недостаточно точны, т. е. измеренные на них координаты цвета обычно расходятся с координатами, полученными путем расчета по спектральным данным относительно стандартного наблюдателя. К счастью, этот недостаток не означает, что такой прибор совершенно бесполезен. Как вскоре будет показано, существует множество практических случаев, когда вполне пригодны менее точные приборы при условии хорошей воспроизводимости измерений.

Основной трудностью при создании фотоэлектрического колориметра является такая регулировка трех фотоэлементов или фотоумножителей, чтобы их чувствительности были пропорциональны по всему видимому спектру (с достаточным приближением), например, функциям сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ МКО 1931 г. (рис. 2.12) или их линейным комбинациям этих функций. Если получено точное воспроизведение функций сложения МКО, реакция первого фотоэлемента даст координату цвета X лучистого потока, падающего на этот фотоэлемент; реакция второго — даст координату цвета Y ; реакция третьего — координату Z . Если стимул с другим спектральным составом, попадая на эти три фотоэлемента, вызывает те же самые реакции, справедливо будет заключить, что оба стимула одноцветны относительно стандартного наблюдателя МКО 1931 г. При таком применении фотоэлектрические приемники представляют собой устройства для автоматического расчета координат цвета в соответствии с уравнением (2.11).

Правильная настройка фотоэлектрических приемников может быть выполнена (приблизительно) с использованием одного из двух основных методов. В первом методе используется монохроматор,

в плоскость спектра которого попеременно устанавливаются три спектральные маски, приводящие функцию спектральной чувствительности единственного фотоэлектрического приемника к требуемым функциям $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ стандартного наблюдателя. Во втором методе коррекция спектральной чувствительности фотоприемника выполняется с помощью цветных стеклянных или желатиновых светофильтров, устанавливаемых перед светочувствительной поверхностью приемника. В первом случае получаем колориметр с масками, во втором — со светофильтрами.

На рис. 2.38 показана принципиальная схема фотоэлектрического колориметра с масками. Лучистый поток от образца проходит

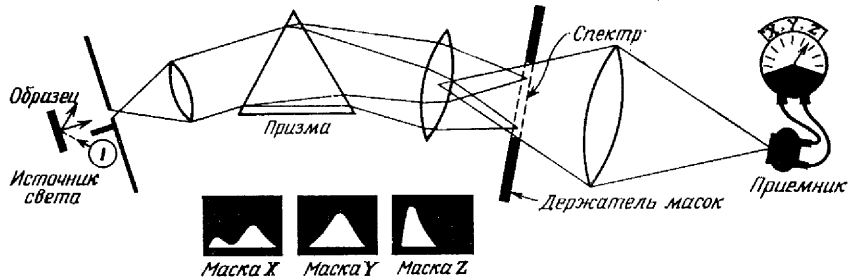


Рис. 2.38. Принципиальная схема фотоэлектрического колориметра с масками.

через входную щель монохроматора и диспергируется в спектр, в плоскости которого устанавливается одна из трех масок — X, Y или Z. Каждая маска предназначена для селективного изменения равноэнергетического спектра, при этом кривая спектральной чувствительности приемника приводится к форме одной из трех кривых сложения стандартного наблюдателя. При введенной маске X реакция приемника будет соответствовать координате цвета X комбинации источник — образец независимо от спектрального состава излучения этой комбинации. Аналогично при введении масок Y и Z получаются координаты цвета Y и Z. Разработан ряд колориметров с масками, которые используются для измерения координат цвета самосветящихся (люминесцентные лампы) и всех видов несамосветящихся образцов [224, 294, 417, 419, 696]. При установке соответствующих масок эти приборы могут также применяться для определения цветопередающих свойств источников света спектрально-анализирующим методом. Точность колориметров с масками может быть очень высокой, особенно когда окошко для масок имеет большие размеры (10 × 5 см). В этих случаях ограничение и калибровка масок сравнительно нетрудны и могут быть выполнены достаточно точно. У приборов

с небольшими окошками (3 × 1 см и менее) точность меньше из-за значительных трудностей при изготовлении и градуировке масок.

Хороший колориметр с масками представляет собой тщательно изготовленный и сложный прибор. Сложность его конструкции сравнима со сложностью спектрофотометра, в связи с чем его

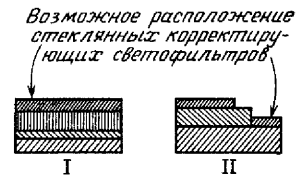
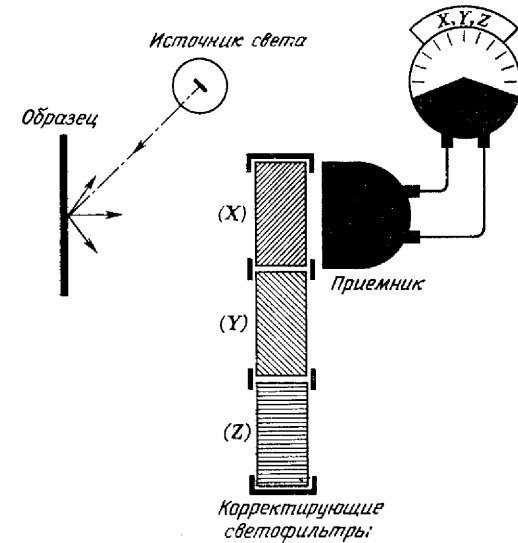


Рис. 2.39. Принципиальная схема фотоэлектрического трехцветного фильтрового колориметра.

Показаны два (I и II) основных способа расположения корректирующих светофильтров.

стоимость высока. Поэтому неудивительно, что на практике было использовано лишь небольшое количество колориметров с масками. Вместо этого используются спектрофотометры в сочетании с соответствующими цифровыми вычислительными устройствами.

Более дешевые (хотя и менее точные) фильтровые колориметры все еще пользуются большим спросом. На рис. 2.39 показана принципиальная схема такого колориметра. Лучистый поток от образца проходит через один из трех корректирующих светофильтров (X), (Y), (Z) и попадает на фотоэлемент, реакция которого

в этом случае пропорциональна соответствующей координате цвета комбинации образец — источник. Каждый светофильтр обычно представляет собой комбинацию цветных стеклянных фильтров, подобранных таким образом, чтобы суммарная функция спектрального коэффициента пропускания комбинации приводила спектральную чувствительность фотоэлемента к одной из функций сложения МКО. Если кривая спектральной чувствительности фотоэлемента тождественна кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$, функция спектрального коэффициента пропускания $T(\lambda, X)$ идеального корректирующего светофильтра X должна определиться следующим образом:

$$T(\lambda, X) = \frac{\bar{x}(\lambda)}{s(\lambda)},$$

где $s(\lambda)$ — неисправленная функция спектральной чувствительности фотоэлемента в произвольных единицах. Аналогичные выражения можно записать и для идеальных корректирующих светофильтров Y и Z

$$T(\lambda, Y) = \frac{\bar{y}(\lambda)}{s(\lambda)} \quad \text{и} \quad T(\lambda, Z) = \frac{\bar{z}(\lambda)}{s(\lambda)}.$$

Иногда более желательным представляется воспроизведение функции сложения, умноженной на относительное спектральное распределение энергии одного из стандартных излучений. В этом случае в качестве требуемых функций вместо $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ выбираются функции

$$\frac{S_{Ст}(\lambda)}{S(\lambda)} \bar{x}(\lambda), \quad \frac{S_{Ст}(\lambda)}{S(\lambda)} \bar{y}(\lambda), \quad \frac{S_{Ст}(\lambda)}{S(\lambda)} \bar{z}(\lambda),$$

где $S(\lambda)$ — относительное спектральное распределение реального источника света в колориметре, а $S_{Ст}(\lambda)$ — распределение стандартного излучения МКО, например D_{65} . В этом случае переход от реального источника $[S(\lambda)]$ к D_{65} $[S_{Ст}(\lambda)]$ заложен в схему колориметра. Координаты цвета отражающего (нелюминесцирующего) образца измеряются непосредственно относительно D_{65} , хотя реальный источник, освещающий образец, может быть совершенно иным, например лампой накаливания.

Существуют два основных типа расположения корректирующих светофильтров. В первом случае цветные фильтры с подходящими спектральными характеристиками располагаются в комбинации последовательно друг за другом (нижняя часть рис. 2.39). При таком расположении (I) излучение, прежде чем попасть на катод приемника, последовательно фильтруется в каждом фильтре. К сожалению, диапазон возможных спектральных характеристик стеклянных светофильтров довольно ограничен, что делает невозможным выполнение корректирующих светофильтров с идеальной

характеристикой. Это, в частности, очевидно в случае корректирующего фильтра X , для которого нужно иметь кривую спектрального пропускания с двумя максимумами; обойти эту трудность можно лишь с помощью двух отдельных комбинаций стекол. При последовательном расположении фильтров корректирующая комбинация всегда дает только грубое приближение к идеалу. Увеличивая число фильтров, можно улучшить приближение, однако при этом возможно значительное увеличение плотности всей комбинации, что может сделать ее в итоге непригодной, так как она практически перестанет пропускать свет.

Рис. 2.40, а показывает, что можно ожидать от фильтрового колориметра при последовательном расположении цветных стекол в корректирующих светофильтрах. Этот рисунок дает представление о качестве воспроизведения функций сложения МКО 1931 г. комбинациями корректирующий фильтр — фотоэлемент в одном из лучших приборов такого типа [556]. Совпадение достаточно хорошее, но не идеальное, что приводит к некоторым погрешностям измерений цветности и коэффициентов яркости несамосветящихся стимулов. В таком специально изготовленном колориметре погрешности в общем невелики и ими можно даже в большинстве практических ситуаций пренебречь. Однако это особый случай; он не распространяется на серийные колориметры. В серийных приборах корректирующая кривая чувствительности фотоэлемента может значительно отличаться от требуемых кривых сложения; результаты измерения цветности и коэффициентов яркости обычно заметно расходятся с результатами расчета по спектральным данным. Погрешности в 0,020 по координатам цветности x и y и 1,5 по коэффициенту яркости Y при измерениях несамосветящихся стимулов со средней и высокой светлотой вполне возможны; такие погрешности примерно в 10 раз больше допуска, приемлемого для большинства колориметрических измерений.

Другой метод расположения фильтров с требуемыми спектральными характеристиками показан на схеме II (нижняя часть рис. 2.39). При этом расположении, иногда называемом схемой Дреслера [138, 177], некоторые компоненты фильтра размещаются рядом один с другим. Различные части светового пучка по-разному фильтруются стеклами, прежде чем пучок достигает катода фотоэлемента. Результирующая кривая спектрального пропускания комбинации может эффективно регулироваться путем изменения относительного размера отдельных компонентов. Выполненные по такому принципу корректирующие светофильтры могут с высокой степенью точности приближаться к идеальным при относительно высоком пропускании в максимумах кривых.

На рис. 2.40, б дан образец того, что может дать фильтровый колориметр с тщательно изготовленными по схеме Дреслера корректирующими светофильтрами из цветного стекла [166]. При

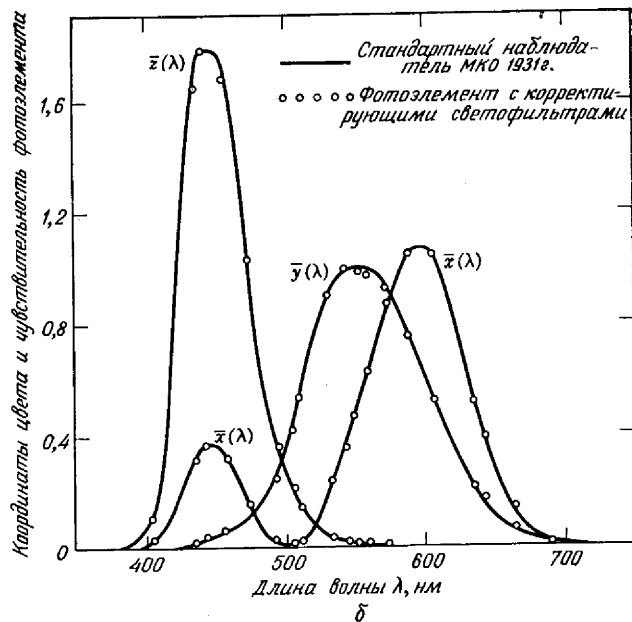
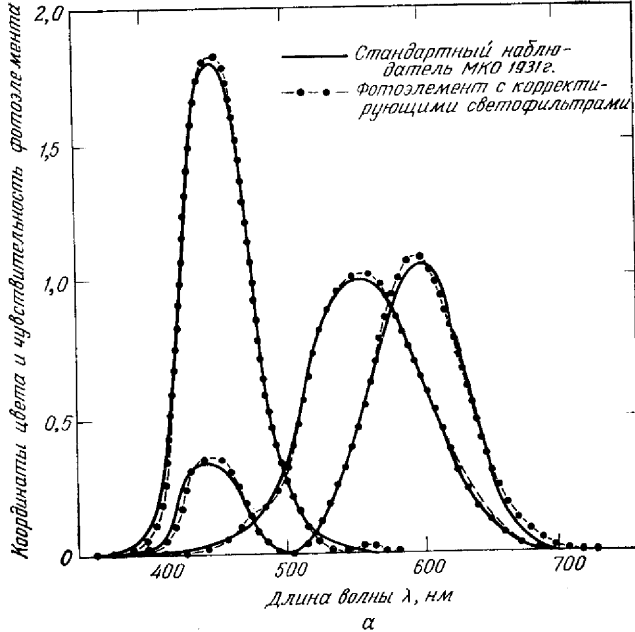


Рис. 2.40. Примеры наилучшего воспроизведения функций сложения стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. при помощи цветных корректирующих светофильтров.

а — Субтрактивная корректирующая комбинация; светофильтры расположены один за другим [556]. б — Смешанная аддитивно-субтрактивная комбинация; светофильтры расположены как последовательно один за другим, так и рядом один с другим [166].

введении коррекции можно ожидать такого качества, что в большинстве случаев погрешности будут незначительными. Даже при измерениях с использованием люминесцентных ламп вряд ли можно превысить величину погрешности $\pm 0,004$ по x и y относительно данных, рассчитанных по результатам спектрорадиометрических измерений. Однако из-за технических трудностей, связанных с изготовлением этих довольно сложных блоков светофильтров, лишь в немногих колориметрах используется схема Дреслера.

Подбор соответствующих светофильтров, как при методе I, так и при методе II (рис. 2.39), обычно выполняется эмпирическим путем [109, 264]; существуют также и численные методы, облегчающие эту задачу [125, 699].

Степень приближения кривой спектрального пропускания корректирующих светофильтров к идеальной является возможно наиболее важным показателем точности, которую можно ожидать от фотоэлектрического трехцветного колориметра. Чтобы точно получать на колориметре координаты цвета (или координаты цветности и коэффициент яркости), необходимо полное соблюдение стандартов, рекомендованных МКО. Это относится не только к соответствию функций спектральной чувствительности колориметра стандартным функциям сложения. Необходимо также, чтобы при конструировании прибора был тщательно обоснован выбор источника света, освещающего образец; в идеальном случае его излучение будет воспроизводить спектральное распределение одного из стандартных излучений МКО, например D_{65} . Кроме того, отражающие образцы должны измеряться в стандартных условиях освещения и наблюдения (рис. 2.11); в качестве эталона при таких измерениях должен использоваться идеальный отражающий рассеиватель.

Изготовить точный фотоэлектрический колориметр с учетом изложенных требований чрезвычайно трудно; попытка достичь этого приводит к тому, что стоимость такого прибора становится сравнимой со стоимостью хорошего спектрофотометра, так что непонятно, нужно ли это вообще делать.

Могут возразить, что фотоэлектрические трехцветные колориметры позволяют определить цветовые характеристики образцов быстрее, чем спектрофотометры, соединенные с вычислительными устройствами, однако можно уже сейчас указать на усовершенствованные спектрофотометрические приборы, которые позволяют достаточно быстро сканировать спектр. На таких приборах характеристика цвета может быть получена почти так же быстро, как и на фотоэлектрических колориметрах.

Доводом в защиту точного фотоэлектрического трехцветного колориметра может служить его компактность и лучшая приспособленность для эксплуатации в полевых условиях. И снова можно отметить успехи приборостроения, которые говорят, что

недалеко то время, когда появятся портативные, точные и недорогие спектрофотометры с вычислительными устройствами, предназначенные для колориметрических измерений.

Тем не менее на практике существует множество, если не большинство, колориметрических задач, для решения которых не требуется определения абсолютных значений колориметрических величин. *Колориметрия цветовых различий* представляет собой весьма распространенный в практике промышленного контроля цвета метод, который требует не столько высокой точности, сколько хорошей воспроизводимости измерений. Если же несколько снизить требования к точности, окажется, что недорогие фотоэлектрические трехцветные колориметры могут оказаться ценным и экономичным средством для практической колориметрии.

В частности, при измерениях малых цветовых различий между образцами с близкими спектральными характеристиками допустимы довольно значительные расхождения функций спектральной чувствительности прибора и функций сложения стандартного наблюдателя МКО. Цветовые различия измеряются и в этих случаях с большой точностью. Удовлетворительная точность измерений цветовых различий между образцами гарантируется тогда, когда различия между их спектральными характеристиками носят простой характер или умеренно метамерны (рис. 2.31). Если сравниваются пары образцов с высокой степенью метамерности, измеренные величины цветовых различий могут значительно отклоняться от истинных значений.

На практике стандартный образец часто изготавливается из того же материала и окрашен теми же красителями, что и его дубликат. Колориметрия цветовых различий является в этом случае наиболее точным методом определения того, насколько копия отличается от стандартного образца.

Когда стандартный образец изготавливается из другого материала и (или) окрашен другими красителями, нежели копия, может иметь место высокая степень метамеризма между ними, и оператор, выполняющий измерения на колориметре, должен вовремя заметить, что различие спектральных составов используемого стандарта и дубликатов слишком велико, чтобы позволить надежные измерения цветового различия.

Колориметрия цветовых различий является важным методом практической колориметрии, который заслуживает несколько более детального обсуждения.

КОЛОРИМЕТРИЯ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

Основной метод определения координат цвета заключается в их расчете по данным спектро радиометрии или спектрофотометрии. Для каждого класса самосветящихся и несамосветящихся

стимулов применяется свой отдельный стандарт. Несамосветящиеся стимулы, создаваемые непрозрачными образцами, измеряются относительно идеального отражающего рассеивателя; создаваемые прозрачными образцами, например желатиновыми пленками, кристаллами или стеклянными пластинками, — относительно слоя воздуха той же толщины; прозрачные растворы измеряются либо относительно дистиллированной воды, либо относительно растворителя, а концентрированные растворы — только относительно аналогичного растворителя с той же толщиной слоя. Самосветящиеся стимулы, например прямое излучение люминесцентных ламп, электронно-лучевых трубок, телевизионных экранов и ламп накаливания, измеряются по отношению к одному из стандартных источников, обычно источнику МКО А или источнику А в комбинации с фильтром с известным спектральным пропусканием. Анализ спектральных составов стимулов обоих видов относительно этих стандартов может быть проведен независимо от того, подобны или различны исследуемые стимулы и исходный стандарт. Последующий расчет координат цвета выполняется по уравнениям 2.11—2.13. Такой метод является фундаментальным и весьма общим; он иногда именуется *абсолютной колориметрией*.

Если необходимо определить координаты цвета стимула относительно стандарта с существенно отличающимися спектральными характеристиками, абсолютная колориметрия с применением спектро радиометра или спектрофотометра является кратчайшим путем к получению точных, однозначных результатов. Как уже говорилось, применение большинства визуальных и фотоэлектрических колориметров для абсолютной колориметрии строго ограничено. Однако, если характер спектров исследуемого и стандартного стимулов почти одинаков, т. е. если стимулы образуют пару с простым различием между спектрами (рис. 2.31), точные и однозначные результаты измерений могут быть получены при непосредственном сравнении этих стимулов методами как визуальным, так и фотоэлектрическим. Более того, результаты получаются быстрее и с меньшими затратами, нежели с помощью спектро радиометра или спектрофотометра.

Например, цвета почти прозрачных стеклянных пластин могут быть быстро и точно определены при прямом сравнении, так как спектральное распределение потока, прошедшего через стекло, подобно распределению потока, прошедшего через такой же слой воздуха, с которым стекло сравнивается. Сравнение почти белого образца с отражающим стандартом из окиси магния также представляет собой простую колориметрическую задачу; то же можно сказать и об измерениях цвета ламп накаливания почти эквивалентных стандартному источнику А.

Измерение высокоселективных поглотителей и излучателей, подобных стеклам, содержащим редкоземельные элементы, и газоразрядным трубкам, представляет собой трудную колориметрическую проблему. В общем случае чем больше различия в спектральных составах между измеряемым образцом и стандартом, тем меньше точность результатов измерений, полученных с помощью визуального или фотоэлектрического колориметра.

Современные фотоэлектрические спектрофотометры позволили значительно расширить области применения как визуальной, так и фотоэлектрической колориметрии. Они представляют собой практическое средство для быстрой калибровки рабочих цветовых стандартов. Если нужно измерить достаточно большую группу образцов (порядка 20 или более), имеющих примерно один и тот же спектральный состав, то при современном состоянии колориметрии наиболее удовлетворительный путь решения задачи заключается в тщательном измерении на спектрофотометре одного или двух образцов из этой группы и использованием их в качестве рабочих стандартов при визуальном или фотоэлектрическом измерении цветовых различий между стандартами и остальными образцами. Необходимо отметить, что много задач при промышленном контроле цвета попадает в эту категорию. Вариации цвета промышленных изделий вызываются, как правило, небольшими изменениями пропорций небольшого числа красителей или изменениями параметров технологических процессов, например температуры, влажности, кислотности, щелочности, а также небольшими изменениями цвета исходных материалов. Случаи, когда перечисленные изменения приводят к значительным метамерным различиям между изделиями одной партии, редки.

Другим важным применением колориметрии цветовых различий является определение изменений цвета, вызванных воздействием различных факторов внешней среды (выветривание, нагрев, действие солей, кислот, щелочей, износ и т. д.) или примесями в красителях. В этих случаях цветовым стандартом служит исходный, не подвергавшийся воздействию образец; основное значение придается оценке величины и характера цветовых различий, а определение абсолютных цветовых характеристик представляет собой второстепенную задачу или требует лишь приближенного рассмотрения. Для круга перечисленных применений колориметрию цветовых различий следует предпочесть абсолютной колориметрии.

Еще одно применение колориметрии цветовых различий заключается в измерении вариаций цвета незамутненных растворов. Здесь обычно интересуются изменениями цвета при изменении количества одного из компонентов раствора. Если в качестве стандарта взят раствор с известной концентрацией интересующих нас компонентов, то подобие спектров между стандартом и исследуе-

мым раствором гарантировано, и концентрация соответствующих компонентов может быть определена с помощью колориметрии цветовых различий. Результат обычно получают непосредственно в виде концентрации искомого компонента, меняя толщину стандартного или измеряемого растворов до получения цветового равенства. Этот метод применяется в качестве окончательной оценки во множестве количественных химических анализов [436]. Применение такого рода «химической колориметрии» так разнообразно, а компараторы цвета (как визуальные, так и фотоэлектрические) так широко распространены, что многие полагают, будто химическая колориметрия — это и есть вся колориметрия, а компараторы цвета незаслуженно именуется при этом колориметрами. В химической колориметрии цвет раствора служит показателем концентрации одного из веществ в этом растворе. При наблюдении в дневном свете гамма цветов, обусловленная изменением концентрации какого-либо вещества в растворе, определяется спектральным пропусканием неизвестного компонента и может следовать сложной траектории в цветовом теле. Тем не менее, поскольку вариация вариации цвета с равным успехом могут оцениваться при наблюдении образца и стандарта через цветной светофильтр; именно так и поступают во всех случаях, когда удастся найти светофильтр, увеличивающий различительную способность (глаза или прибора) к данным цветам. Если выбранный фильтр сильно селективен по длинам волн, т. е. он может выделить ограниченный участок спектра, то изменения цвета сводятся к изменению светлоты при почти постоянной цветности. В этом случае задача по своей природе становится скорее фотоэлектрической, нежели колориметрической, как это иллюстрируется колориметрией сахарных растворов [740]. Термин абсорбциометрия, введенный Меллоном [436] для обозначения этого метода, чрезвычайно удачен в данном случае, так как измеряется именно абсорбционная способность системы в отношении лучистой энергии. Как и при других применениях колориметрии цветовых различий, спектрофотометр остается незаменимым прибором для предварительной калибровки стандартов, используемых в текущих измерениях.

Потенциальные преимущества колориметрии различий по сравнению с абсолютной колориметрией могут быть продемонстрированы при рассмотрении математической модели двух видов измерений.

Пусть имеются два стимула, создаваемые несамосветящимися непрозрачными образцами. Образец 1 является исходным стандартом, образец 2 — исследуемым, неизвестным образцом. Колориметрическая задача может преследовать одну или две цели:

1. Определить координаты цвета обоих образцов относительно дополнительного стандартного наблюдателя МКО 1964 г. при освещении стандартным излучением D_{65} .

2. Определить различия между координатами цвета этих двух образцов, рассматриваемых и освещаемых в вышеуказанных условиях.

В абсолютной колориметрии для решения этой задачи можно использовать методы а) или б), приведенные ниже.

а) На спектрофотометре измеряются спектральные апертурные коэффициенты отражения каждого образца для всех длин волн видимого спектра (380—780 нм), например с интервалом 10 нм. Затем рассчитываются по уравнениям (2.26) и (2.27) координаты цвета образцов с использованием табличных значений для излучения D_{65} и наблюдателя МКО 1964 г. В результате измерений на спектрофотометре и расчета получаем координаты цвета $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ для образца 1 и $X_{10}^{(2)}$, $Y_{10}^{(2)}$, $Z_{10}^{(2)}$ — для образца 2.

При таком методе каждый образец измеряется независимо путем сравнения их с калиброванным рабочим стандартом отражения, таким, например, как пластина из прессованных порошков сульфата бария или окиси магния. Точность измерений зависит от точности шкалы длин волн и фотометрической шкалы спектрофотометра, а также калибровки рабочего стандарта.

б) Используется фотоэлектрический трехцветный колориметр. Образцы освещаются источником, относительное спектральное распределение энергии которого достаточно хорошо повторяет распределение стандартного излучения D_{65} МКО; прибор откалиброван таким образом, что координаты цвета рабочего стандарта отражения получаются точными. Каждый образец измеряется колориметром независимо, и значения $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ для первого образца и $X_{10}^{(2)}$, $Y_{10}^{(2)}$, $Z_{10}^{(2)}$ — для второго непосредственно получаются на измерительном приборе колориметра.

Точность измерений зависит, главным образом, от характеристик спектральной чувствительности колориметра, т. е. от того, насколько хорошо они совпадают с функциями сложения наблюдателя МКО 1964 г. Фотометрические шкалы трех приемников должны быть также линейными, иными словами, величина реакции каждого из них должна расти или уменьшаться прямо пропорционально росту или уменьшению лучистого потока, попадающего на приемник. Точность измерений зависит также от степени соответствия относительного спектрального распределения энергии источника, освещающего образцы, распределению D_{65} . И наконец, точность измерений зависит от точности калибровки рабочего стандарта отражения.

Определение различий между координатами цвета двух образцов — дело простой арифметики:

$$\Delta X_{10} = X_{10}^{(1)} - X_{10}^{(2)},$$

$$\Delta Y_{10} = Y_{10}^{(1)} - Y_{10}^{(2)}, \quad (2.28)$$

$$\Delta Z_{10} = Z_{10}^{(1)} - Z_{10}^{(2)}.$$

Естественно, если координаты цвета определены без погрешностей, не будет ошибок и при определении различий. Если же имеются ошибки измерений, точность определения различий не может быть указана до тех пор, пока неизвестны величина и знаки этих ошибок. Оценка величины и направления систематических ошибок измерений является весьма трудной задачей.

Теперь обратимся к колориметрии различий.

Этот метод не может быть полностью применен при выполнении пункта 1. Иными словами, если нужно определить координаты цвета двух образцов при отсутствии какого-либо иного исходного стандарта с известными координатами, колориметрия различий применена быть не может. Предположим, однако, что координаты цвета одного из образцов уже известны. Например, образец 1 мог быть прокалиброван авторитетной метрологической лабораторией с помощью абсолютных методов на уникальном спектрофотометре. Или в данной лаборатории есть собственный хороший спектрофотометр, на котором откалиброван этот образец 1. Координаты цвета образца 2 и координаты любого другого образца со спектральной характеристикой, подобной спектральной характеристике образца 1, могут теперь быть получены с помощью колориметрии различий, причем для этого можно использовать как спектрофотометр, так и фотоэлектрический трехцветный колориметр.

Если используется спектрофотометр, то спектральные различия между образцами измеряются непосредственно путем установки образца 1 на место, куда обычно устанавливается стандарт (рис. 2.3), и образца 2 — на место измеряемого. Координаты цвета, рассчитанные по кривой спектральных различий апертурных коэффициентов отражения, идентичны величинам ΔX_{10} , ΔY_{10} ; ΔZ_{10} ; искомые координаты цвета образца 2 теперь определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{10}^{(2)} &= X_{10}^{(1)} - \Delta X_{10}, \\ Y_{10}^{(2)} &= Y_{10}^{(1)} - \Delta Y_{10}, \\ Z_{10}^{(2)} &= Z_{10}^{(1)} - \Delta Z_{10}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

где $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ — величины, известные по результатам калибровки образца 1.

Если предполагается, что $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ определены точно, а кривые спектральных апертурных коэффициентов отражения обоих образцов подобны, можно ожидать получения точных значений величин ΔX_{10} , ΔY_{10} , ΔZ_{10} и координат цвета $X_{10}^{(2)}$, $Y_{10}^{(2)}$, $Z_{10}^{(2)}$. Предположим, что образец 1 при длине волны λ имеет спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$, а образец 2 —

$\beta^{(2)}(\lambda)$, почти одинаковый с $\beta^{(1)}(\lambda)$. При одновременном (или при кратковременном последовательном) сравнении в приборе обоих образцов два фотоэлектрических сигнала будут почти одинаковы. Ошибки фотометрической шкалы и шкалы длин волн будут оказывать ничтожное влияние на разностный сигнал. Ошибка $\varepsilon^{(1)}(\lambda)$, полученная при измерении $\beta^{(1)}(\lambda)$, будет иметь тот же знак и почти ту же величину, что и ошибка $\varepsilon^{(2)}(\lambda)$, полученная при измерении $\beta^{(2)}(\lambda)$. Отсюда

$$\Delta\beta(\lambda) = [\beta^{(1)}(\lambda) - \varepsilon^{(1)}(\lambda)] - [\beta^{(2)}(\lambda) - \varepsilon^{(2)}(\lambda)] = \beta^{(1)}(\lambda) - \beta^{(2)}(\lambda). \quad (2.30)$$

Аналогичные соображения можно распространить на все длины волн видимого спектра при условии, конечно, что $\beta^{(2)}(\lambda)$ нигде не отличается от $\beta^{(1)}(\lambda)$ настолько, чтобы условие $\varepsilon^{(1)}(\lambda) - \varepsilon^{(2)}(\lambda) \approx 0$ утратило силу на всех длинах волн.

При использовании фотоэлектрического устройства колориметрии цветовых различий заключается в том, что в измерительное плечо прибора сперва устанавливается калиброванный образец 1 и показания прибора настраиваются до тех пор, пока они не станут равными известным значениям координат цвета образца 1. Затем образец 1 заменяется образцом 2 и непосредственно определяются значения ΔX_{10} , ΔY_{10} , ΔZ_{10} . Можно ожидать, что и в этом случае точность измерений будет высока; координаты цвета образца 2 посредством простых арифметических расчетов могут быть получены по значениям ΔX_{10} , ΔY_{10} , ΔZ_{10} и $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ с той же степенью точности, с которой были определены координаты цвета образца 1.

Обоснование этого последнего утверждения в данном случае несколько отличается от обоснований, приведенных в случае использования спектрофотометра. Когда используется фотоэлектрический колориметр, следует учитывать тот факт, что фотоэлектрические сигналы прибора являются сигналами, которые соответствуют интегральным спектральным характеристикам чувствительности, а не спектральным характеристикам как таковым.

Пусть при длине волны λ образец 1 имеет апертурный коэффициент отражения $\beta^{(1)}(\lambda)$. Реакция приемника на лучистый поток $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda)$, падающий на него, будет пропорциональна величине $\beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) s(\lambda)$, где $S(\lambda)$ — относительное спектральное распределение энергии источника, освещающего образец, а $s(\lambda)$ — спектральная чувствительность одного из приемников колориметра.

В приборе имеются три приемника, функции спектральной чувствительности которых определяются соотношениями

$$\begin{aligned} s_x(\lambda) &= \bar{x}_{10}(\lambda) + \varepsilon_x(\lambda), \\ s_y(\lambda) &= \bar{y}_{10}(\lambda) + \varepsilon_y(\lambda), \\ s_z(\lambda) &= \bar{z}_{10}(\lambda) + \varepsilon_z(\lambda), \end{aligned} \quad (2.31)$$

где $\varepsilon_x(\lambda)$, $\varepsilon_y(\lambda)$, $\varepsilon_z(\lambda)$ обозначают отклонения спектральной чувствительности приемника от идеальной, обозначаемой $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$.

Когда измеряется образец 1, получаются интегральные реакции $R_x^{(1)}$, $R_y^{(1)}$, $R_z^{(1)}$, пропорциональные интегралам

$$\begin{aligned} &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) s_x(\lambda) d\lambda, \\ &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) s_y(\lambda) d\lambda, \\ &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) s_z(\lambda) d\lambda. \end{aligned}$$

Аналогично определяются реакции $R_x^{(2)}$, $R_y^{(2)}$, $R_z^{(2)}$ для образца 2.

Подставляя в эти выражения уравнения (2.31), получим для первого приемника x

$$\begin{aligned} R_x^{(1)} &\simeq \int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) x_{10}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \varepsilon_x(\lambda) d\lambda, \\ R_x^{(2)} &\simeq \int_{\lambda} \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} \beta^{(2)}(\lambda) S(\lambda) \varepsilon_x(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Аналогичные соотношения могут быть записаны для двух других приемников y и z .

Теперь следует вспомнить, что определение различий с помощью фотоэлектрического колориметра начинается с градуировки прибора, при которой величины $R_x^{(1)}$, $R_y^{(1)}$, $R_z^{(1)}$ устанавливаются идентичными координатам цвета $X_{10}^{(1)}$, $Y_{10}^{(1)}$, $Z_{10}^{(1)}$ соответственно. Такая градуировка эквивалентна сведению к нулевым значениям интегральных ошибок образца 1

$$\begin{aligned} &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \varepsilon_x(\lambda) d\lambda = 0, \\ &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \varepsilon_y(\lambda) d\lambda = 0, \\ &\int_{\lambda} \beta^{(1)}(\lambda) S(\lambda) \varepsilon_z(\lambda) d\lambda = 0. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Само собой разумеется, что градуировка прибора не приводит точно также к исчезновению интегральных ошибок образца 2. Однако можно заметить, что эти интегралы будут стремиться к нулю в том случае, если спектральные коэффициенты $\beta^{(2)}(\lambda)$

образца 2 пропорциональны коэффициентам образца 1, т. е. если

$$\beta^{(2)}(\lambda) = \alpha \beta^{(1)}(\lambda) \quad (2.34)$$

для всех длин волн. Если подставить это соотношение в выражение (2.32) для $R_x^{(2)}$, получим

$$R_x^{(2)} = \alpha R_x^{(1)}$$

и аналогично

$$R_y^{(2)} = \alpha R_y^{(1)},$$

$$R_z^{(2)} = \alpha R_z^{(1)},$$

что и представляет очевидное решение задачи.

Однако следует отметить, что условие (2.34), связанное с простым различием спектральных характеристик двух образцов (рис. 2.31), не является единственным, при котором возможно применение колориметрии различий. Из выражений (2.32) следует

$$[R_x^{(1)} - R_x^{(2)}] \simeq [X_{10}^{(1)} - X_{10}^{(2)}] + \int_{\lambda} [\beta^{(1)}(\lambda) - \beta^{(2)}(\lambda)] S(\lambda) \varepsilon_x(\lambda) d\lambda \quad (2.35)$$

и еще два аналогичных выражения для $[R_y^{(1)} - R_y^{(2)}]$ и $[R_z^{(1)} - R_z^{(2)}]$. Если $\beta^{(1)}(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda)$ пересекаются в трех или более точках в диапазоне видимого спектра, легко представить, что интегральные ошибки, выражаемые уравнениями (2.35), могут обратиться в нуль. В некотором смысле, $\beta^{(1)}(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda)$ должны быть метамерными относительно $S(\lambda) \varepsilon_x(\lambda)$, $S(\lambda) \varepsilon_y(\lambda)$ и $S(\lambda) \varepsilon_z(\lambda)$. Даже если $\beta^{(1)}(\lambda)$ и $\beta^{(2)}(\lambda)$ и не обнаруживают полностью метамерного различия, пересечение двух кривых обеспечивает уменьшение величины интегральных ошибок, особенно если различия по спектру нигде не становятся слишком значительными. Как уже упоминалось выше, на практике такой случай скорее правило, чем исключение.

КОЛОРИМЕТРИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

На рис. 2.41 схематически показан спектрофотометр, измеряющий спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta(\lambda)$ данного объекта относительно рабочего стандарта с известной спектральной характеристикой $\beta_{Ст}(\lambda)$ (см. также рис. 2.2 и 2.3).

Если в пучок вводится измеряемый объект, в детекторе генерируется фототок, прямо пропорциональный энергетической яркости $L_{\lambda} d\lambda$ объекта при длине волны λ излучения, регистрируемого монохроматором. Когда измеряемый объект заменяется стандартом отражения, генерируется другой фототок, который прямо пропорционален энергетической яркости $L_{\lambda}(Ст) d\lambda$ отражающего стандарта в этой длине волны. Отношение двух фототоков равно

отношению двух энергетических яркостей $L_{\lambda} d\lambda$ и $L_{\lambda}(Ст) d\lambda$. Если спектральный апертурный коэффициент отражения стандарта известен и равен $\beta_{Ст}(\lambda)$, то спектральный апертурный коэффициент

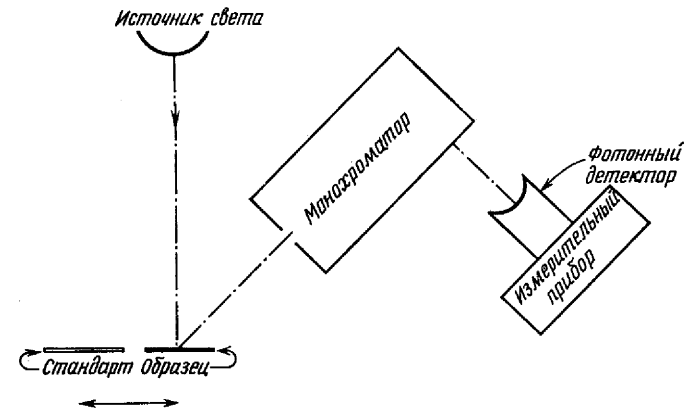


Рис. 2.41. Принципиальная блок-схема спектрофотометра: источник света, монохроматор, фотонный детектор с измерительным прибором и отражающий стандарт, взаимозаменяемый с образцом, спектральный коэффициент яркости которого измеряется.

отражения измеряемого объекта определится уравнением

$$\beta(\lambda) = \beta_{Ст}(\lambda) \left[\frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}(Ст)} \right]. \quad (2.36)$$

Спектральный апертурный коэффициент отражения $\beta_{Ст}(\lambda)$ стандарта задается выражением

$$\beta_{Ст}(\lambda) = \frac{L_{\lambda}(Ст) d\lambda}{L_{\lambda}^0 d\lambda} = \frac{L_{\lambda}(Ст)}{L_{\lambda}^0}, \quad (2.37)$$

где $L_{\lambda}^0 d\lambda$ — энергетическая яркость идеального отражающего рассеивателя, облученного идентично рабочему стандарту отражения. Подставляя выражение (2.37) в (2.36), получим

$$\beta(\lambda) = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}^0}, \quad (2.38)$$

т. е. спектральный апертурный коэффициент отражения исследуемого образца, измеренный относительно идеального отражающего рассеивателя, который является основным эталоном отражения.

Геометрия освещения и наблюдения (0/45), показанная на рис. 2.41, соответствует измерению отношения энергетических яркостей, поэтому термин апертурный коэффициент отражения заменяется соответственно на коэффициент яркости (рис. 2.2),

и в последующем для каждой длины волны используется уже спектральный коэффициент яркости.

Когда спектральная составляющая коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ объекта определена для всех длин волн λ видимого спектра, координаты цвета X, Y, Z рассчитываются по уже известным уравнениям:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2.39)$$

где

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}.$$

В этих уравнениях $S(\lambda)$ — относительное спектральное распределение энергии источника, освещающего объект, например дневной свет, представленный стандартным излучением D_{65} (рис. 2.6); $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — функции сложения стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. (рис. 2.12). Аналогичные уравнения существуют, если в качестве наблюдателя принят дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1964 г. (рис. 2.15).

Здесь важно еще раз подчеркнуть, что уравнения (2.39) являются основными уравнениями для определения координат цвета цветового стимула, создаваемого любым объектом, спектральный коэффициент яркости $\beta(\lambda)$ которого может быть измерен с достаточной степенью точности. В частности, ни основные уравнения, ни принцип измерений (рис. 2.41) не изменятся, если объект люминесцирует. Следует напомнить, что координаты цвета описывают определенные колориметрические свойства цветового стимула, воспринимаемого наблюдателем; каким образом этот стимул создан, и как он направляется к глазу наблюдателя, совершенно безразлично при определении координат цвета. Однако важно, чтобы применяемый для определения $\beta(\lambda)$ метод измерений соответствовал тем условиям, при которых реальный наблюдатель обычно рассматривает объект. На рис. 2.42 показана геометрия освещения и наблюдения при визуальном рассматривании объекта, эквивалентная геометрии на рис. 2.41.

Возникает вопрос, почему же колориметрия люминесцирующих материалов считается особой проблемой, отличной от колориметрии нелюминесцирующих объектов? Чтобы ответить на него, рас-

смотрим более или менее детально два типичных примера, из которых один относится к колориметрии нелюминесцирующих, а второй — люминесцирующих материалов.

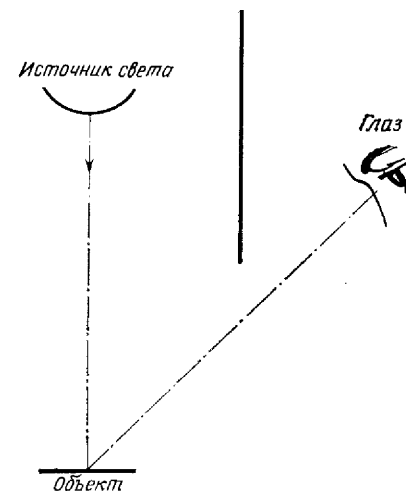


Рис. 2.42. Схема наблюдения поверхности объекта, облучаемого источником лучистой энергии.

Эта схема эквивалентна схеме, показанной на рис. 2.41.

Снова посмотрим на рис. 2.41, где приведена схема установки для измерения спектрального коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ данного объекта. Если это объект нелюминесцирующий, функция

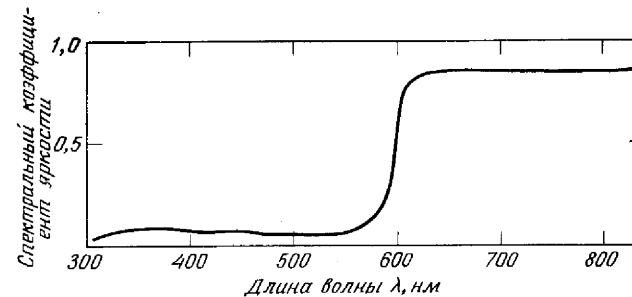


Рис. 2.43. Пример кривой спектрального коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ нелюминесцирующего объекта.

Значения $\beta(\lambda)$ не зависят от спектрального распределения энергии источника, облучающего объект.

$\beta(\lambda)$ может иметь вид, показанный на рис. 2.43. Все значения $\beta(\lambda)$ меньше единицы, т. е. меньше значений коэффициента ярко-

сти идеального отражающего рассеивателя. При измерениях $\beta(\lambda)$ в качестве источника освещения можно сначала выбрать источник, относительное спектральное распределение энергии которого воспроизводит распределение стандартного излучения D_{85} . Измерения можно повторить с другим источником, спектральное распределение которого на этот раз воспроизводит распределение стандартного излучения A . В обоих случаях получим одну и ту же функцию $\beta(\lambda)$. Фактически можно было бы использовать источник с произвольно выбранным относительным спектральным распределением энергии $S(\lambda)$ и получить все ту же функцию спектрального коэффициента яркости $\beta(\lambda)$.

Требуется лишь, чтобы $S(\lambda)$ отличалось от нуля для всех длин волн λ , представляющих интерес, и чтобы спектральная облученность поверхности объекта была достаточно высокой для обеспечения необходимой точности измерений. Можно поэтому утверждать, что $\beta(\lambda)$ исследуемого нелюминесцирующего объекта не зависит от спектрального распределения энергии $S(\lambda)$ источника, облучающего этот объект.

Часть падающего на объект лучистого потока поглощается, другая часть, возможно, пропускается и оставшаяся часть — отражается объектом. Что касается глаза, то для него поглощенная и пропущенная части потока потеряны. Пропущенная часть распространяется в направлениях от наблюдателя, а поглощенная часть превращается в тепло — иной вид лучистой энергии, невоспринимаемый органом зрения. Отраженная в направлении глаза часть потока создает цветовой стимул и является, собственно, предметом рассмотрения. Цветовой стимул полностью определяется спектральной плотностью энергетической яркости L_λ объекта.

Когда исследуемый объект заменяется рабочим стандартом отражения, например пластиной из прессованного порошка сульфата бария, поглощается лишь малая часть падающего лучистого потока, фактически ничего не пропускается, и почти все отражается. Снова интерес представляет отраженный от стандарта в направлении глаза поток, который создает исходный, стандартный стимул. Стандартный стимул полностью определяется спектральной плотностью энергетической яркости L_λ (Ст) отражающего стандарта. Если спектральный коэффициент яркости $\beta_{Ст}(\lambda)$ стандарта известен, $\beta(\lambda)$ исследуемого объекта можно определить по уравнению (2.37).

Поскольку $\beta(\lambda)$ нелюминесцирующего объекта не зависит от источника света, при освещении которым он определяется, не обязательно снабжать спектрофотометр, показанный на рис. 2.41, источником с известным относительным спектральным распределением энергии. Часто достаточно обычной, но стабильной лампы накаливания, работающей на постоянном токе. Более

того, конструкция спектрофотометра может быть такова, что источник света устанавливается перед входной щелью монохроматора, а исследуемый объект и отражающий стандарт — между выходной щелью и фотонным детектором, как показано на рис. 2.44.

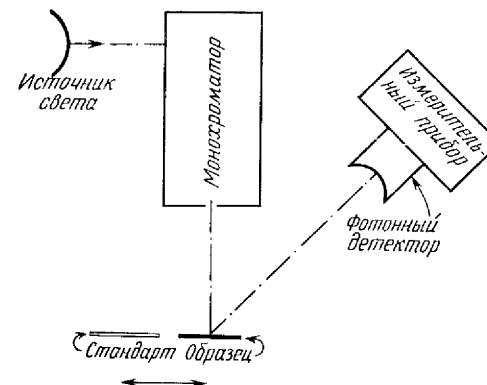


Рис. 2.44. Принципиальная схема возможного расположения основных элементов спектрофотометра при измерении спектральных коэффициентов яркости $\beta(\lambda)$ нелюминесцирующих объектов.

Измеряемый и стандартный образцы располагаются между выходной щелью монохроматора и фотонным детектором. Измеренные значения $\beta(\lambda)$ не зависят от спектрального распределения энергии источника света спектрофотометра.

Такое расположение может оказаться желательным, поскольку уменьшается опасность повреждения измеряемого объекта вредной (например, тепловой) частью излучения источника. Проведенные таким способом измерения $\beta(\lambda)$ идентичны измерениям того же объекта по схеме, показанной на рис. 2.41.

Когда функция $\beta(\lambda)$ определена одним из двух методов (рис. 2.41 или 2.44), спектральная характеристика цветового стимула задается относительным спектральным распределением энергии $\beta(\lambda) S(\lambda)$, где $S(\lambda)$ выбирается в соответствии с применением исследуемого образца. Если объект должен рассматриваться при дневном свете, $S(\lambda)$ соответствует распределению D_{85} . Если же объект наблюдается при свете лампы накаливания, выбирается $S(\lambda)$ стандартного излучения A . Поскольку $S(\lambda)$ представляет стандартное распределение (табл. 2.1), не требуется никаких дополнительных измерений (кроме первоначально проведенных измерений $\beta(\lambda)$), чтобы определить цветовой стимул и затем рассчитать его координаты цвета.

Теперь рассмотрим люминесцирующий объект. Установка, показанная на рис. 2.41, вновь используется для измерения спектрального коэффициента яркости объекта, облучаемого сначала

источником, относительное спектральное распределение энергии $S(\lambda)$ которого воспроизводит распределение стандартного излучения D_{65} . Результатом измерения является функция $\beta(\lambda, D_{65})$, показанная на рис. 2.45. Функция $\beta(\lambda, D_{65})$ имеет вблизи точки $\lambda \approx 610$ нм колоколообразный максимум, величина которого превышает единицу. При повторении измерений, но на этот раз с источником $S(\lambda)$, воспроизводящим стандартное излучение A , получается функция $\beta(\lambda, A)$, которая явно отличается от $\beta(\lambda, D_{65})$

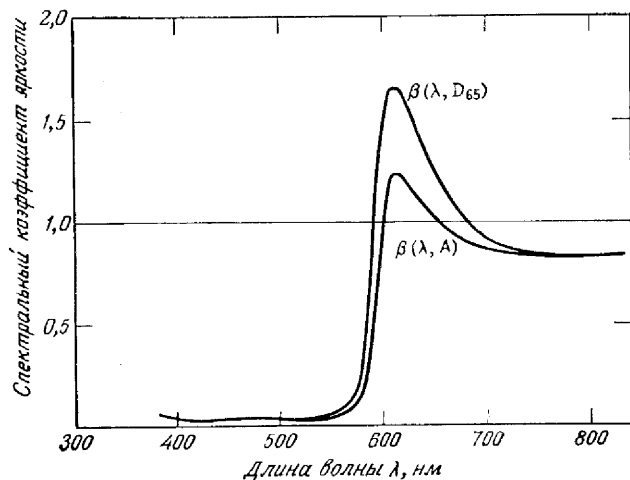


Рис. 2.45. Спектральные коэффициенты яркости люминесцирующего объекта, измеренные при облучении образца источниками со спектральными распределениями энергии, соответствующими стандартному излучению МКО D_{65} и стандартному излучению МКО A .

Измерительная установка собрана по схеме, показанной на рис. 2.41.

вблизи точки 610 нм. Колоколообразный максимум еще сохраняется, но уменьшается по величине. Это говорит о том, что спектральный коэффициент яркости люминесцирующего объекта зависит от спектрального распределения энергии $S(\lambda)$ источника, облучающего этот объект. Такая зависимость обязывает использовать для измерений установку, показанную на рис. 2.41, вместо той, которая дана на рис. 2.44.

При использовании схемы рис. 2.44 обычно получают совершенно ошибочные и вводящие в заблуждение результаты. Они показаны на рис. 2.46 для того же самого объекта. Различия между правильными результатами на рис. 2.45 и ошибочными на рис. 2.46 весьма значительны.

Прежде чем перейти к более детальному рассмотрению проблемы спектрофотометрирования и колориметрии люминесцирующих

объектов, необходимо сделать отступление, чтобы напомнить некоторые основные сведения, касающиеся явления люминесценции и его механизма.

Люминесценция — это общее название класса явлений, наблюдаемых у многих веществ. Люминесценция относится к процессам, в которых лучистая энергия испускается молекулами или

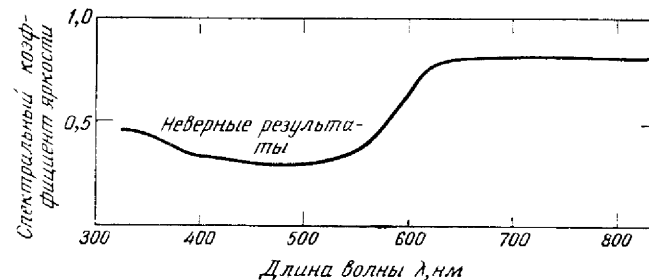


Рис. 2.46. Неверные значения спектральных коэффициентов яркости $\beta(\lambda)$ люминесцирующего образца, полученные на установке, показанной на рис. 2.44.

Правильные результаты приведены на рис. 2.45.

атомами, возбужденными поглощенной лучистой энергией. Для построения моделей люминесценции используются понятия квантовой механики.

Система молекул или атомов поглощает лучистую энергию только некоторыми определенными порциями, оставаясь стабильной лишь на дискретных, более или менее четко фиксированных энергетических уровнях. Самый нижний из этих уровней является основным энергетическим уровнем или основным состоянием системы. Для атомов и многих двухатомных молекул газов энергетические уровни хорошо известны. Для многоатомных молекул и систем, которые имеются в кристаллах и других твердых веществах, энергетические уровни трудно определить, и они в основном неизвестны. Тем не менее предположение о том, что такие уровни вообще существуют, привело к значительному прогрессу в понимании явлений люминесценции [31, 537].

На рис. 2.47 показана типичная схема нескольких энергетических уровней простой системы молекул. Уровни представлены горизонтальными линиями. Величина интервала между любыми двумя из этих линий пропорциональна соответствующей разности энергий. На основном энергетическом уровне (линия N) система имеет энергию Q_N ; на уровне F — энергию Q_F . Разница между энергиями пропорциональна частоте ν_{FN} лучистой энергии, испускаемой или поглощаемой при переходе с одного уровня на другой. В соответствии с основным законом разность энергий опре-

деляется уравнением

$$h\nu_{FN} = Q_F - Q_N, \quad (2.40)$$

где h — постоянная Планка ($\approx 6,63 \cdot 10^{-27}$ эрг·с). Величина $h\nu_{FN}$ определяет элементарное количество лучистой энергии, называемое *квантом* или *фотоном*.

Когда поглощается лучистая энергия с частотой ν_{FN} , энергия системы возрастает с уровня N до уровня F . Если между N и F не существует других энергетических уровней, система может

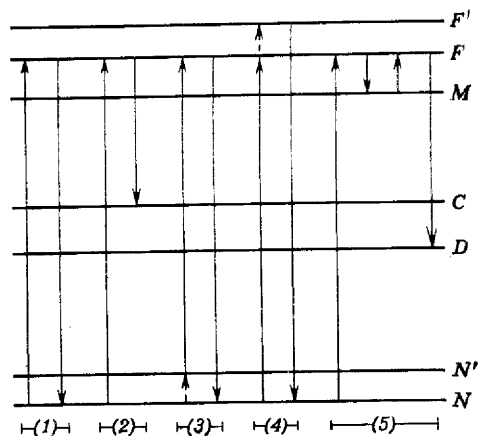


Рис. 2.47. Схема энергетических уровней, иллюстрирующая различные случаи люминесценции: 1) резонансная люминесценция, 2) обычная люминесценция (флуоресценция), 3) и 4) антистоксовская люминесценция, 5) фосфоресценция.

при испускании лучистой энергии с той же частотой ν_{FN} вернуться только на уровень N . Теоретически это простейший случай люминесценции, называемый *резонансной люминесценцией* (случай 1 на рис. 2.47).

Однако в общем случае между N и F имеются промежуточные уровни (C, D, \dots), поэтому возможны и другие переходы с F на C , на D и т. д. Эти переходы вызывают люминесценцию, т. е. испускание лучистой энергии с частотами ν_{FC} , ν_{FD} и т. д., меньшими, чем частота ν_{FN} (случай 2 на рис. 2.47).

Тот факт, что при люминесценции частота энергии излучения ниже (что означает увеличение длины волны в соответствии с соотношением $\nu = C/\lambda$, чем частота поглощенной энергии, впервые был эмпирически обнаружен Стоксом [638] и часто называется *правилом Стокса*. Однако возможны отклонения от правила Стокса в том случае, если непосредственно выше уровней N или F расположены энергетические уровни N' или F' соответственно. Тепло-

вая энергия может поднять систему с уровня N на N' прежде, чем поглощенная лучистая энергия с частотой $\nu_{N'F}$ поднимет ее на уровень F . В этом случае частота люминесценции $\nu_{FN} > \nu_{N'F}$. Тепловая энергия может также поднять систему, находящуюся в возбужденном состоянии на уровне F , до уровня F' . И снова частота люминесценции $\nu_{F'N} > \nu_{NF}$. Оба эти случая относятся к *антистоксовому излучению* (случаи 3 и 4 на рис. 2.47).

Случай 5 на рис. 2.47 иллюстрирует *фосфоресценцию*. При поглощении лучистой энергии система сперва переходит с уровня N на F , затем возвращается на соседний метастабильный уровень M лишь с тем, чтобы снова возвратиться на F за счет тепловой энергии прежде, чем перейти с испусканием лучистой энергии на нижележащий уровень, например D .

Люминесценция существует еще некоторый период времени и после прекращения действия лучистого потока. Время превращения данной части падающего потока в излучаемый зависит от вида люминесценции (флуоресценция или фосфоресценция), природы вещества и других факторов (например, температуры в случае фосфоресценции). Длительность флуоресценции обычно значительно короче, чем длительность фосфоресценции. Для флуоресценции время, которое требуется для затухания испускаемого лучистого потока в e^{-1} раз, составляет величину порядка 10^{-8} с, в то время как для фосфоресценции этот период может длиться от 10^{-3} с до многих дней (e — основание натуральных логарифмов = 2,718...).

Люминесценция, возбуждаемая поглощенной лучистой энергией, имеет определенный период нарастания. При достаточно длительном периоде постоянного облучения испускаемый лучистый поток достигает равновесного значения, когда число молекул, возбуждаемых в единицу времени поглощенной энергией, равно числу молекул, деактивированных при излучении. Практически для всех люминесцирующих веществ периоды нарастания и затухания равны, так как относительное количество возбужденных молекул всегда мало по сравнению с общим числом невозбужденных, даже если интенсивность облучения очень велика. Отсюда следует, что лучистый поток люминесценции строго пропорционален лучистому потоку, падающему на данное вещество [513, 537]. Линейная зависимость между падающим лучистым потоком и потоком люминесценции чрезвычайно важна для колориметрии люминесцирующих материалов, использующей данные спектрофотометрии. Для фосфоресценции такая линейная связь обычно не имеет места [537].

Для сложных систем молекул, таких, как системы, встречающиеся в твердых телах, энергетические уровни люминесцирующей молекулы не так четко определены, как это показано горизонтальными линиями на рис. 2.47. На положение каждого энер-

гетического уровня влияет постоянно меняющееся взаимодействие с окружающим полем молекул, конфигурация которого меняется из-за тепловых колебаний. Молекулы колеблются вокруг устойчивых положений внутри расширенной энергетической зоны, откуда следует, что как поглощенная, так и испускаемая лучистая энергия располагаются в спектре не линиями, а полосами, занимающими определенный интервал длин волн.

У некоторых веществ полосы в спектре лучистого потока люминесценции имеют ту же ширину и форму, что и полосы в спектре поглощения этих веществ, однако центр полосы в спектре люминесценции всегда сдвинут в сторону более длинных волн (правило Стокса). Такое подобие спектров привело к установлению *правила зеркальной симметрии*. Однако на твердые тела, как и на многие другие вещества, это правило не распространяется. В твердых веществах обычно оказывается, что полосы в спектрах поглощения значительно шире, чем в спектрах потока люминесценции. Длинноволновая граница полосы поглощения обычно пересекается с коротковолновой границей полосы излучения.

Характер спектров люминесценции определяется относительным спектральным распределением лучистого потока в полосах испускания. Обычно оно не меняется при изменении длины волны падающего лучистого потока. Часто распределение потока в полосах имеет вид колоколообразной кривой с максимумом вблизи центральной длины волны полосы испускания. Однако абсолютная величина лучистого потока, испускаемого при люминесценции в длине волны λ , может значительно меняться с изменением длины волны μ падающего потока. Величина потока люминесценции является функцией лучистого потока, поглощенного на длине волны μ , и *квантового выхода* вещества в этой длине волны. Если вещество поглощает q_0 квантов в данной длине волны μ и излучает в общей сложности q квантов внутри всей полосы испускания, его квантовый выход определяется отношением q/q_0 . Те поглощенные кванты, которые не излучаются при люминесценции, превращаются в тепловую энергию. По-видимому, квантовый выход большинства твердых люминофоров остается почти постоянным в значительном диапазоне длин волн μ падающего потока. Однако квантовый выход резко снижается, если длина волны потока облучения попадает внутрь полосы испускания.

Поглощенный лучистый поток представляет собой ту часть падающего потока, которая не отражается и не пропускается. Сумма поглощенного, отраженного и пропущенного потоков всегда равна падающему. Коэффициент отражения ρ материала площади dA определяется отношением потока, отраженного от dA в полной полусфере ($\Omega = 2\pi$ ср) над поверхностью, к потоку, падающему на dA . Аналогично коэффициент пропускания τ того же материала определяется отношением потока, пропущенного

этим материалом, к потоку, падающему на него. Отсюда коэффициент поглощения α определяется следующим образом:

$$\alpha = 1 - \rho - \tau. \quad (2.41)$$

Все три величины α , ρ и τ зависят от длины волны. Здесь важно вспомнить разницу между коэффициентом отражения ρ и коэффициентом яркости β (рис. 2.2 и пояснения к нему). Очевидно, что для определения α по формуле (2.41) следует пользоваться величиной ρ , а не β . Поскольку не существует материальной

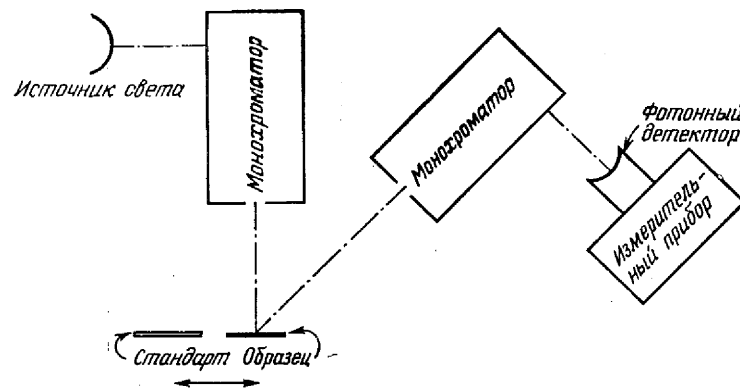


Рис. 2.48. Принципиальная схема расположения основных элементов специального спектрофотометра для исследования спектров люминесцирующих объектов.

Спектральный коэффициент яркости может быть измерен при облучении образца монохроматическими излучениями различных длин волн.

поверхности со свойствами идеального рассеивателя, коэффициент яркости β поверхности меняется с изменением угла наблюдения ε и поэтому обычно отличается по величине от коэффициента отражения ρ .

Лучистый поток люминесценции имеет однородное пространственное распределение во всех направлениях над поверхностью люминесцирующего объекта. Это означает, что яркость люминесцентной компоненты, измеренная под различными углами к поверхности, постоянна; такая поверхность называется *равноярким* или *ламбертовским* излучателем. Следует напомнить, что такие характеристики имеет лишь идеальный отражающий рассеиватель; ни одна реальная отражающая поверхность ими не обладает.

Детальное спектрофотометрическое исследование люминесцирующего объекта поясняет некоторые из только что рассмотренных важных свойств люминесценции. Измерительная установка для такого исследования схематически показана на рис. 2.48.

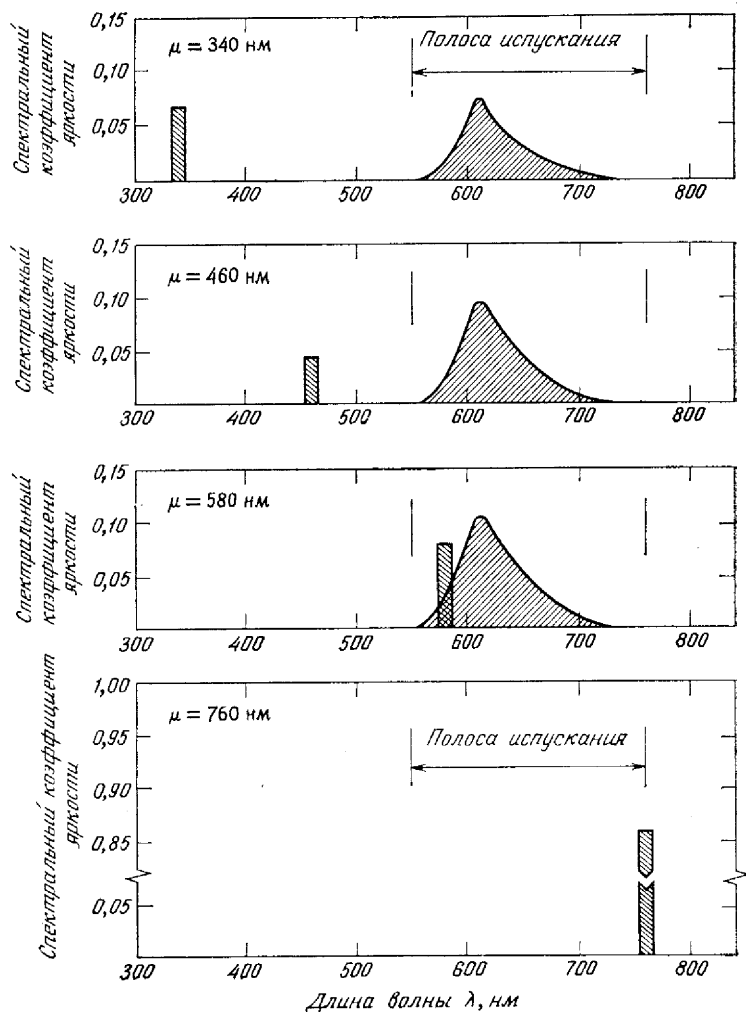


Рис. 2.49. Типичный пример анализа спектра люминесценции красного люминесцирующего красителя при облучении его монохроматическими потоками с различной длиной волны μ [136].

Вместо облучения объекта лучистой энергией всех длин волн одновременно и последующего измерения спектрального коэффициента яркости, как это показано на рис. 2.41, в этой схеме объект облучается монохроматическими лучистыми потоками с различной длиной волны.

В свою очередь измерение спектрального коэффициента яркости включает в себя измерение спектральных энергетических яркостей, т. е. лучистых потоков, испускаемых объектом и стандартом отражения и распространяющихся в элементарном конусе с телесным углом $d\Omega$ в направлении $\epsilon = 45^\circ$.

Типичные кривые спектрального коэффициента яркости, полученные при измерении люминесцирующей красной краски, облучаемой потоками с различными длинами волн μ , показаны на рис. 2.49 [136].

При данной облученности $E_\mu d\mu$ потоком с длиной волны μ , более короткой, чем любая длина волны полосы испускания, определяется энергетическая яркость L_λ (Ст) $d\lambda$ элемента поверхности dA отражающего стандарта при $\lambda = \mu$. Для всех других длин волн спектра энергетическая яркость стандарта равна нулю. При той же облученности $E_\mu d\mu$ теперь определяется энергетическая яркость $L_\lambda(\mu)$ $d\lambda$ площадки dA люминесцирующего объекта. В этом случае энергетическая яркость отлична от нуля не только при $\lambda = \mu$, но и внутри всей полосы испускания. Поэтому спектральный коэффициент яркости объекта, облучаемого монохроматическим лучистым потоком с длиной волны μ , определится следующим соотношением:

$$\beta(\lambda, \mu) = \beta_{\text{Ст}}(\lambda) \left[\frac{L_\lambda(\mu)}{L_{\lambda \text{ Ст}}} \right]. \quad (2.42)$$

Когда длина волны μ падающего лучистого потока приходится на полосу испускания, люминесценция уменьшается; она совершенно отсутствует, когда μ переходит длинноволновую границу полосы (правило Стокса).

Измерение коэффициента яркости становится трудным, когда μ находится внутри полосы испускания. Ширина полосы $d\mu$ должна быть достаточной (~ 10 нм), чтобы обеспечить требуемое количество энергии, что, однако, уменьшает спектральное разрешение. Кроме того, внутри полосы испускания резко падает квантовый выход объекта, как это иллюстрируется графиком на рис. 2.50.

Ввиду невозможности точных измерений внутри полосы испускания можно лишь строить предположения о том, что может произойти в действительности. Обычно считается, что люминесценция существует до тех пор, пока μ не достигает длины волны λ , при которой лучистый поток люминесценции имеет максимальную величину. В примере на рис. 2.49 это происходит при длине волны около 610 нм. При больших значениях μ люминесценция отсут-

ствует. Однако до тех пор, пока существует люминесценция, поток люминесценции может быть определен для всех длин волн полосы испускания, причем форма распределения потока по спектру не зависит от μ . Такой случай иллюстрируется третьим (сверху)

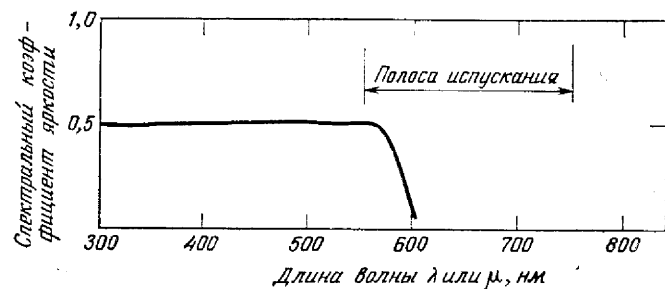


Рис. 2.50. Квантовый выход люминесцирующего красного красителя [136]. До тех пор, пока падающий лучистый поток с энергией q_0 квантов имеет длину волны λ короче, чем длина волны λ_0 полосы испускания, количество q квантов потока люминесценции пропорционально q_0 , т. е. $q/q_0 = \text{const}$. Однако, когда μ попадает в полосу испускания, квантовый выход q/q_0 быстро спадает до нуля.

графиком на рис. 2.49, где точка $\mu = 580$ нм еще не достигает максимума $\lambda = 610$ нм, но уже находится внутри полосы испускания.

Полную спектрофотометрическую запись коэффициентов яркости $\beta(\lambda, \mu)$ люминесцирующего объекта удобно проводить в матричной форме $\{\beta(\lambda, \mu)\}$

Длина волны λ отраженного или испускаемого лучистого потока	Длина волны μ падающего лучистого потока				
	300	310	...	790	800
300	$\beta(300, 300)$	.	.	.	.
310	$\beta(310, 300)$	$\beta(310, 310)$	.	.	.
.
.
790	$\beta(790, 300)$	$\beta(790, 310)$	...	$\beta(790, 790)$	.
800	$\beta(800, 300)$	$\beta(800, 310)$	...	$\beta(800, 790)$	$\beta(800, 800)$

Графически иллюстрированные на рис. 2.49 примеры 1—4 при такой форме записи представляют собой столбцы матрицы при $\mu = 340, 460, 580$ и 760 нм.

Приведенная матрица является треугольной с нулевыми элементами над диагональным рядом, что находится в соответствии

с правилом Стокса. Однако, как уже обсуждалось выше и продемонстрировалось на рис. 2.49 при $\mu = 580$ нм, непосредственно над диагональю могут оказаться некоторые ненулевые элементы малой величины, соответствующие переходу μ левой границы полосы испускания, когда люминесценция еще имеет место.

Не все элементы ниже диагонали обязательно отличны от нуля. В каждом столбце ниже ненулевого обычно диагонального элемента $\beta(\lambda, \mu)$ при $\lambda = \mu$ имеется в общем случае один или более нулевых элементов, исключая интервал длин волн λ полосы испускания. Естественно, что для нелюминесцирующего объекта отличными от нуля могут быть только диагональные элементы, и треугольная матрица вырождается в строго диагональную.

Матрица $\{\beta(\lambda, \mu)\}$ полностью характеризует объект относительно его отражающих и люминесцентных свойств при постоянной спектральной облученности и фиксированной геометрии измерений. При заданных элементах матрицы $\beta(\lambda, \mu)$ легко рассчитать спектральные коэффициенты яркости $\beta(\lambda, S)$ объекта, облучаемого любым источником с известным спектральным распределением энергии $S(\lambda)$

$$\beta(\lambda, S) = \frac{\int_{\mu} \beta(\lambda, \mu) S(\mu) d\mu}{S(\lambda) d\lambda} \quad (2.43)$$

На практике при вычислении интеграла в уравнении (2.43) элементы матрицы $\beta(\lambda, \mu)$ ряда λ просто суммируются после того, как каждый из них умножен на соответствующее значение $S(\mu)$. Зависимость определяемого таким образом коэффициента яркости от источника, облучающего объект, обозначается буквой S в выражении $\beta(\lambda, S)$. На рис. 2.45 показаны два примера $\beta(\lambda, S)$, где S представляет стандартные излучения МКО D_{65} и A .

Расчет координат цвета X, Y, Z цветового стимула, создаваемого люминесцирующим объектом при облучении его данным источником S , легко выполняется с помощью уравнений (2.39) при подстановке в них $\beta(\lambda, S)$ вместо $\beta(\lambda)$.

Описанный выше матричный метод можно считать основным и наиболее совершенным методом спектрофотометрического анализа люминесцирующих объектов. Проведя однажды такой анализ, можно легко дать колориметрическую интерпретацию результатов в виде координат цвета объекта при любом заданном источнике облучения. Тем не менее очевидно, что определение матрицы является весьма запутанной и трудоемкой задачей, в связи с чем этот метод не привлекает колориметристов-практиков.

Объем спектрофотометрических измерений существенно уменьшается, если вновь обратиться к методу, иллюстрированному на рис. 2.41. Однако применение этого метода приводит к необходимости использовать при измерении источник с относительным спектральным распределением энергии $S(\lambda)$, идентичным распре-

делению излучения, относительно которого рассчитываются координаты цвета. На практике это не всегда легко достижимо, особенно если речь идет, например, об излучении D_{65} [729]. Поэтому такой метод сопряжен с возможностью получения неточных результатов.

Предпринимались попытки найти методы, которые были бы так же (или почти так же) универсальны, как матричный метод. Но требовали бы меньшего объема измерений [46, 146, 198]. Обычно эти методы используют упрощенные схемы отделения спектрального лучистого потока люминесценции от лучистого потока, отраженного объектом. Однако любой из них по необходимости должен базироваться на ряде предположений относительно механизма люминесценции в твердых материалах. Поскольку в этой области накоплено еще недостаточно знаний, некоторые из этих предположений могут оказаться неприемлемыми для упрощенных методов, что может привести к недостаточной точности измерений.

Люминесцирующие материалы сейчас широко применяются, поэтому не удивительно, что многие отрасли промышленности занимаются колориметрией таких материалов. В этой связи испытывается большая потребность в экономических методах производственного контроля и исследования новых изделий. Существует обширная литература, посвященная конкретным практическим и теоретическим аспектам колориметрии различных видов люминесцирующих материалов [1, 10, 43, 169, 199, 240, 456, 621, 622, 686, 731].

ЦВЕТНАЯ РЕПРОДУКЦИЯ

Цветные изображения доставляют нам много удовольствия и значительно обогащают нашу повседневную жизнь. Цветные репродукции знаменитых шедевров живописи напоминают нам о сокровищах художественных галерей, в которых нам уже довелось побывать, и возбуждают желание побывать в новых. Цветные фотографии семейных событий или эпизодов путешествий во время отпуска служат живым напоминанием о приятных мгновениях нашей жизни. Цветные иллюстрации придают дополнительную привлекательность журналам, а растущее вопреки высокой стоимости цветных изображений применение цвета в рекламе дает превосходное доказательство влияния последнего на эту важную область торговли. Цветное кино уже в течение многих лет обогащает круг наших развлечений, а цветное телевидение делает нас участниками отдаленных событий, происходящих как в студиях, так и вне их.

Измерения цвета широко распространены в печати, фотографии, кино и телевидении; само существование этих отраслей техники является доказательством того, что многие разнообразные

цветовые проблемы успешно решены. Однако не все. Кто непосредственно не связан с этими отраслями, осознают, что автоматизированный процесс цветовой репродукции является, по существу, измерением цвета в большом объеме. Чтобы достаточно хорошо воспроизвести картину или сцену в цвете, требуются два процесса. Во-первых, должны быть зафиксированы цвета каждого элемента воспроизводимого изображения. Для этого нужно около 100 000 цветовых измерений, а поскольку каждый цвет определяется, как известно, тремя числами, нужно зафиксировать 100 000 триад, где каждая триада представляет собой координаты цвета отдельного элемента. Зафиксировать координаты можно, например, с помощью трех отдельных негативов, полученных при фотографировании воспроизводимого объекта через красный, зеленый и синий светофильтры; в этом случае каждый негатив приблизительно фиксирует одну координату цвета для каждого среди примерно 100 000 элементов изображения. Во-вторых, эти 100 000 записей координат цвета нужно использовать для контроля цвета полученной репродукции. Автоматический процесс воспроизведения цветного изображения состоит поэтому из автоматизированных колориметрических измерений, повторенных около 100 000 раз для каждой репродуцируемой картины. Расположенные соответствующим образом 100 000 цветных элементов представляют собой 100 000 колориметрических полей сравнения, с помощью которых контролируется цвет полученной репродукции.

В цветной фотографии эти 100 000 триад координат цвета могут быть определены путем измерения коэффициента пропускания каждого элемента на цветоделенных негативах или их эквивалентах с помощью микроденситометра. В цветном телевидении это сделать еще легче, так как координаты цвета определяются сигналами передающей камеры, которые при строчно-кадровой развертке изображения управляют яркостью светящихся элементов на экране кинескопа, составляющих цветоделенные изображения в телевизионном приемнике. Яркость каждого элемента в цветоделенном изображении соответствует одной из координат цвета этого элемента в системе рабочих основных (красного, зеленого, синего) цветов кинескопа.

Было бы, естественно, совершенно бесполезно записывать все эти 100 000 триад координат цвета фото- или телеизображения в цифровой форме. Эти координаты используются непосредственно для получения соответствующего цвета каждого элемента репродукции. В цветном телевизоре каждый элемент изображения формируется группой из трех элементов — красного, зеленого и синего цвета: их яркость регулируется независимо друг от друга. В большинстве других типов цветной репродукции правильный цвет каждого элемента изображения получается при подборе субтрактивной комбинации красителей, так же как это делается в суб-

трактивном колориметре Джонса. Обычно циановый краситель определяет количество красного света, отражаемого или пропускаемого изображением, фуксиновый краситель — количество зеленого света и желтый краситель — количество синего света.

Важным вопросом в цветной репродукции является надежность цветовоспроизведения, т. е. точность воспроизведения исходных цветов. Это не вся проблема получения изображения, которое должно понравиться зрителю. Мы слишком мало знаем о том, что заставляет наш глаз видеть в мозаике цветных точек изображения предметов и людей, чтобы с уверенностью установить, будто идеально точное воспроизведение цветов (кстати сказать, еще не достигнутое) всегда приятно воспринимается. Действительно, многие стоят на позиции, что идеальное цветовоспроизведение обычно обедняет восприятие, и поэтому его следует намеренно избегать. Они утверждают, что умышленное упорядоченное искажение первоначальных цветов делает репродукцию даже более приятной, чем сам оригинал. Здесь уже наука граничит с искусством. Тем не менее даже при попытке улучшить оригинал весьма полезно иметь в качестве исходной точную репродукцию. Нельзя добиться успеха в улучшении оригинала, если надежность цветовоспроизведения настолько мала, что красные цвета, например, в изображении не передаются, или зеленые цвета оригинала на изображении передаются красными. Поэтому в любой системе цветной репродукции должна быть достигнута достаточно точная передача цветов оригинала, даже если конечной целью является художественное воспроизведение оригинального изображения.

Поскольку была высказана мысль о тождественности процесса цветной репродукции трехцветной колориметрии, повторенной 100 000 раз на каждом изображении, становится очевидным, что базовая теория колориметрически точного цветовоспроизведения является обычной теорией трехцветной колориметрии, основы которой были изложены в предшествующих разделах. Эта базовая теория является одним из средств, которые служат решению проблемы цветной репродукции, независимо от того, используются ли при этом полиграфические краски, или красочные слои на прозрачной позитивной кино- или фотопленке, или изображение создается бегущим лучом на экране телевизора.

В задачи данного обсуждения не входит детальное рассмотрение способов применения базовой теории ко многим, уже разработанным системам цветной репродукции, в частности тем, где окончательный результат достигается субтрактивной комбинацией пигментов или красителей и где должно учитываться изменение красного, зеленого и синего основных цветов при изменении количества определяющих их красителей. По этому вопросу опубликованы квалифицированные руководства, в которых читателю предлагается всестороннее рассмотрение как базовой теории, так

и технических подробностей ее применения в указанных системах цветной репродукции [262, 738]. Тем не менее представляется уместным остановиться несколько подробнее на применении колориметрии в цветном телевидении, поскольку между ними наблюдается полная аналогия. По крайней мере можно очень легко показать, почему в цветном телевидении требуется для каждого элемента изображения три отдельных независимых сигнала и почему в качестве основных стимулов, модулированных этими сигналами, всегда выбираются красный, зеленый и синий. Наконец, можно выявить главные трудности в достижении точной цветопередачи при смешении красного, зеленого и синего стимулов.

Ответить на вопрос, почему в цветном телевидении используются три отдельных независимых сигнала, несложно: это обусловлено свойствами самого глаза. В глазу каждого человека (рис. 1.1) изображение рассматриваемого предмета фокусируется на мозаике из светочувствительных элементов, известной под названием сетчатки (рис. 1.3). У некоторых людей все эти элементы имеют одинаковую спектральную чувствительность (рис. 1.2). Это случай так называемой полной цветовой слепоты. Цветно-слепые могут отличать лишь свет от темноты и не более (табл. 1.3). У большинства из них в сетчатке имеются только палочки (рис. 1.2, палочки), такие люди хорошо себя чувствуют лишь при слабом свете. У остальной части цветно-слепых в сетчатке имеются колбочки, но с идентичными характеристиками спектральной чувствительности (рис. 1.2, колбочки). Такие люди не нуждаются в цветном телевидении, поскольку они не могут отличить его от черно-белого.

Имеются люди, в сетчатке которых есть только два вида колбочек. На рис. 1.24 показаны кривые спектральной чувствительности колбочек в этих случаях. Три возможные попарные комбинации этих кривых соответствуют действительно наблюдаемым на практике случаям так называемой частичной цветовой слепоты. Людей с такими дефектами цветового зрения вполне удовлетворило бы двухцветное телевидение. Однако свыше 95 процентов всех людей имеют в сетчатке все три вида колбочек, показанных на рис. 1.24, или по крайней мере они реагируют так, как если бы у них были эти три вида. Для того чтобы человеку с нормальным цветовым зрением цветное изображение казалось естественным, необходимо трехцветное телевидение.

Теперь относительно того, почему в цветном телевидении всегда в качестве основных выбираются красный, зеленый и синий цвета. Это легко проиллюстрировать с помощью цветового графика x, y МКО 1931 г., показанного, например, на рис. 2.13. Очевидно, что из-за кривизны линии спектральных чувствительностей не существует таких трех стимулов, смешением которых можно было бы получить любую цветность. Также ясно, что максимальный цветовой охват

достигается при выборе в качестве основных цветов монохроматических стимулов в красной, зеленой и фиолетовой частях спектра (рис. 2.32).

Основные стимулы в цветном телевидении могут быть получены различными методами. Можно перед черно-белым кинескопом установить вращающийся диск с красным, зеленым и синим фильтрами. Цветное изображение обеспечивается при синхронизации в приемнике красного, зеленого и синего сигналов с прохождением соответствующих цветных фильтров перед экраном. При другом методе, который более распространен в современных цветных телевизионных приемниках, на экран кинескопа наносится мозаика из точек или полос люминофора, размеры которых настолько малы, что наблюдатель их не различает. Подбираются три люминофора с узкими кривыми спектральной плотности излучения: один с максимумом излучения в синей части спектра, второй — в зеленой и третий — в красной части. Хотя некоторые люминофоры дают возможность получить достаточно узкополосные монохроматические красное, зеленое и синее излучения, яркость свечения таких люминофоров неизбежно будет довольно низкой. Чтобы получить красный или синий монохроматические цвета с высокой яркостью, люминофоры должны излучать потоки слишком большой мощности. Это требование по экономическим соображениям невыполнимо, поэтому на практике выбор люминофоров (и тем самым основных цветов) представляет собой компромисс между стремлением обеспечить максимально возможный цветовой охват и желанием получить достаточно яркое изображение. С этой точки зрения вместо почти монохроматического красного основного цвета используют оранжево-красный; вместо почти монохроматического фиолетового или синего — менее насыщенный синий; вместо почти монохроматического зеленого — до некоторой степени «разбавленный» желтовато-зеленый цвет.

На рис. 2.51 показан разумный компромиссный выбор, рекомендованный Национальным комитетом США по системам телевидения (NTSC) и принятый Федеральной комиссией по связи (FCC) в 1953 г. Координаты цветности основных цветов составляют:

$$(R): x_R = 0,67, y_R = 0,33,$$

$$(G): x_G = 0,21, y_G = 0,71,$$

$$(B): x_B = 0,14, y_B = 0,08$$

Эти цветности являются вершинами треугольника, определяющего цветовой охват системы. Легко видеть, что при таком компромиссном охвате нет надежды на точную передачу насыщенных голубых и насыщенных пурпурных цветов любого оригинала. Можно сказать, что в цветном телевидении красный, зеленый и синий цвета принимаются в качестве основных потому, что они пред-

ставляют наилучший компромисс между антагонистическими стремлениями к максимально красочному и максимально яркому изображению.

В настоящее время в цветном телевидении повсеместно используются следующие люминофоры: ортованадат иттрия, активиро-

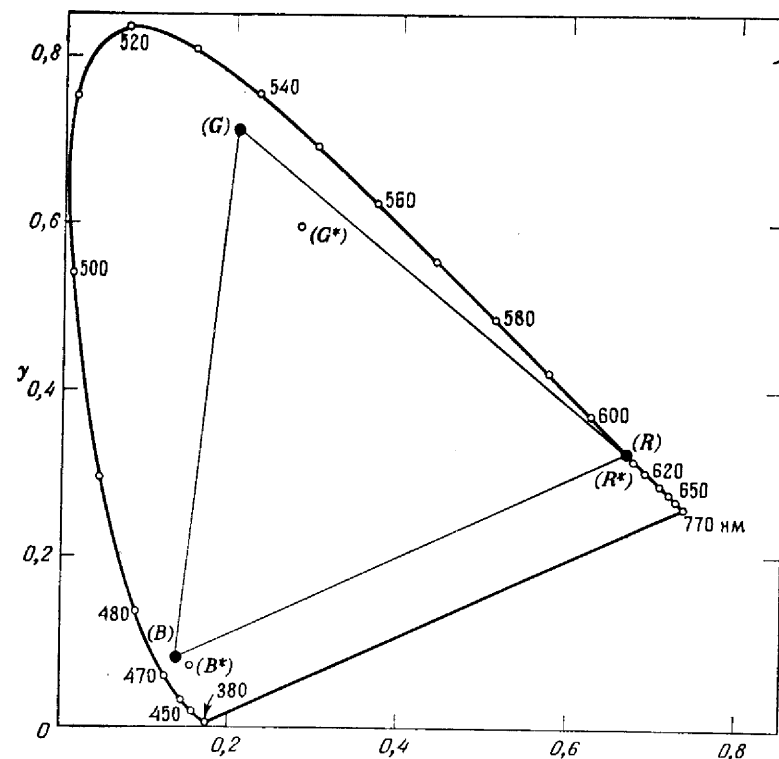


Рис. 2.51. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с цветностями основных цветов, рекомендованных NTSC в 1953 г. [(R), (G), (B)] и реально воспроизводимых современными люминофорами [(R*), (G*), (B*)].

ванный европием, — для красного; смесь сульфидов кадмия и цинка — для зеленого и сульфид цинка — для синего цветов (рис. 2.52). Цветности свечения этих люминофоров несколько отличаются от основных цветов:

$$(R)*: x_R = 0,68, y_R = 0,32,$$

$$(G)*: x_G = 0,28, y_G = 0,60,$$

$$(B)*: x_B = 0,15, y_B = 0,07.$$

Ограниченный цветовой охват, иллюстрируемый рис. 2.51, является одной из главных причин ухудшения цветопередачи при смешении трех стимулов, что, впрочем, не является особенностью лишь цветного телевидения. Аналогичные явления наблюдаются и в цветной фотографии, и в трехцветной печати. Они обусловлены типом приемников лучистой энергии глаза человека.

Теперь о качестве воспроизведения тех цветов, которые находятся внутри цветового охвата. По цветностям основных цве-

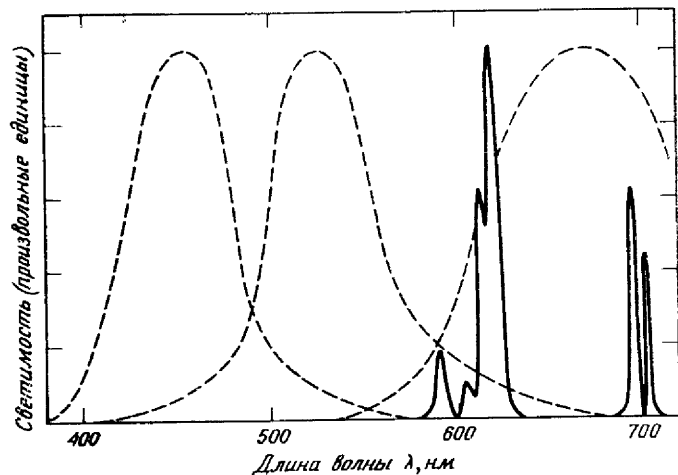


Рис. 2.52. Относительная спектральная плотность излучения повсеместно применяемых в цветном телевидении люминофоров.

Кривая с зубцами и несколькими максимумами соответствует красному люминофору, содержащему редкоземельные элементы.

тов можно рассчитать требуемые кривые спектральной чувствительности приемников передающей камеры, сигналы которой управляют свечением каждого люминофора. Для этого нужно просто рассчитать координаты цвета спектральных излучений в системе основных рабочих цветов. Рассчитаем требуемые кривые спектральной чувствительности камеры при заданной совокупности рабочих основных цветов, например цветов, рекомендованных NTSC, или цветов, реально воспроизводимых применяемыми люминофорами (рис. 2.51).

Обозначим координаты цветности рабочих основных красного (**R**), зеленого (**G**) и синего (**B**) цветов соответственно через (x_r, y_r, z_r) , (x_g, y_g, z_g) и (x_b, y_b, z_b) . Соответствующие координаты цвета должны быть пропорциональны координатам цветности, поскольку те и другие связаны между собой, как мы помним, сле-

дующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Отсюда имеем

$$\begin{aligned} X_r &= c_r x_r, & X_g &= c_g x_g, & X_b &= c_b x_b, \\ Y_r &= c_r y_r, & Y_g &= c_g y_g, & Y_b &= c_b y_b, \\ Z_r &= c_r z_r, & Z_g &= c_g z_g, & Z_b &= c_b z_b, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где коэффициенты пропорциональности c_r, c_g, c_b представляют собой суммы соответствующих координат цвета. Например, $c_r = X_r + Y_r + Z_r$. Величина этих коэффициентов остается неопределенной до тех пор, пока на систему **R, G, B** не будет наложено дополнительное условие, касающееся единичных количеств основных цветов. На практике это условие заключается в том, чтобы c_r, c_g, c_b были выбраны таким образом, что смесь единичных количеств основных цветов должна давать ошреденный стандартный нейтральный цвет. Прежде чем ввести это условие, сперва запишем в общем виде уравнения преобразования, связывающие систему **X, Y, Z** с системой **R, G, B**, и наоборот. Для этого нужно вспомнить уравнения (1.11), которые связывают координаты цвета **R, G, B** с координатами **X, Y, Z**. Принимая во внимание уравнения (2.45), можно записать

$$\begin{aligned} X &= c_r x_r R + c_g x_g G + c_b x_b B, \\ Y &= c_r y_r R + c_g y_g G + c_b y_b B, \\ Z &= c_r z_r R + c_g z_g G + c_b z_b B. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Чтобы определить координаты цвета спектральных излучений относительно рабочих основных цветов (**R, G, B**), требуются уравнения обратного преобразования, которые могут быть получены по уравнениям (2.46) в соответствии с уравнениями (1.12). Искомые уравнения запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} R &= \frac{y_g z_b - y_b z_g}{c_r \Delta'} X + \frac{x_b z_g - x_g z_b}{c_r \Delta'} Y + \frac{x_g y_b - x_b y_g}{c_r \Delta'} Z, \\ G &= \frac{y_b z_r - y_r z_b}{c_g \Delta'} X + \frac{x_r z_b - x_b z_r}{c_g \Delta'} Y + \frac{x_b y_r - x_r y_b}{c_g \Delta'} Z \\ B &= \frac{y_r z_g - y_g z_r}{c_b \Delta'} X + \frac{x_g z_r - x_r z_g}{c_b \Delta'} Y + \frac{x_r y_g - x_g y_r}{c_b \Delta'} Z, \end{aligned} \quad (2.47)$$

где

$$\Delta' = x_r(y_g z_b - y_b z_g) + x_g(y_b z_r - y_r z_b) + x_b(y_r z_g - y_g z_r).$$

Не определенные до сих пор коэффициенты c_r , c_g , c_b можно найти из условия, что, например, стандартное излучение МКО D₆₅ с координатами цвета $X_D = 95,04$, $Y_D = 100,000$, $Z_D = 108,89$ обеспечивает координаты цвета основных цветов $R = G = B = 1$.

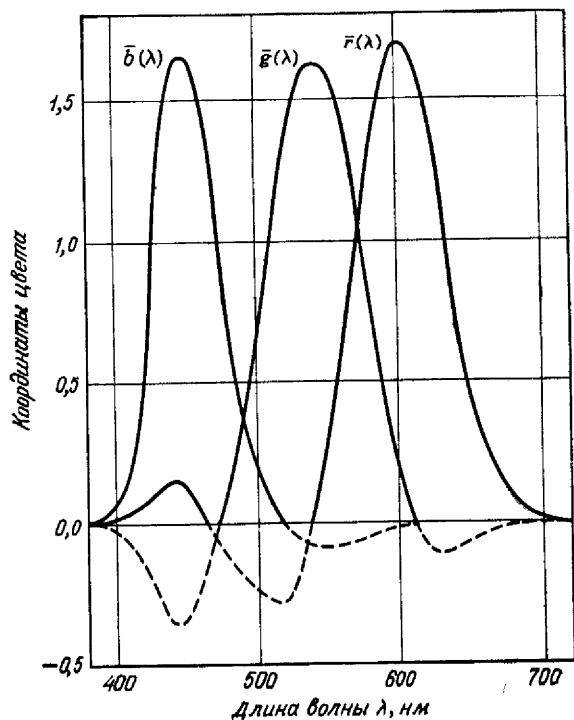


Рис. 2.53. Кривые спектральной чувствительности телевизионной камеры, соответствующие основным цветам NTSC. Отрицательные ветви кривых обозначены штриховыми линиями.

Использование такого условия общепринято в цветном телевидении. Действительные значения c_r , c_g , c_b можно теперь легко получить подстановкой в уравнения (2.47) значений X_D , Y_D , Z_D вместо X , Y , Z и использованием условия $R = G = B = 1$.

Коль скоро подсчитаны коэффициенты c_r , c_g , c_b , можно переписать уравнения (2.46) применительно к конкретным основным рабочим цветам МКО, координаты цветности которых показаны на рис. 2.51.

Уравнения (2.46) с известными значениями коэффициентов $c_r x_r$, $c_g x_g$, ..., $c_b x_b$ находят самое общее применение. Если имеется цветовой стимул с координатами цвета X , Y , Z , который должен быть воспроизведен на телеэкране системой рабочих основных цветов **R**, **G**, **B**, уравнения (2.46) позволяют определить интенсивность сигналов (R , G , B) приемников передающей камеры при условии линейности их световых характеристик. Уравнения (2.46) дают положительные значения этих интенсивностей для всех цветов, лежащих внутри треугольника рабочих основных цветов системы.

Уравнения (2.46) отвечают также на вопрос о том, какова должна быть интенсивность сигналов для передачи монохроматических стимулов с длинами волн λ . Рис. 2.51 показывает, что для любого монохроматического стимула (за исключением лишь красного с $\lambda = 611$ нм) по крайней мере одно из значений R , G , B будет отрицательным. На рис. 2.53 приведены координаты цвета $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ всех стимулов равноэнергетического спектра в функции длины волны, полученные подстановкой из табл. 2.6 координат цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ монохроматических стимулов в системе МКО 1931 г. в уравнения (2.46) вместо X , Y , Z соответственно.

Положительные ветви кривых на рис. 2.53 даны сплошными линиями, отрицательные — штриховыми. Как и ожидалось, отрицательные ветви распространяются по всему спектру, за исключением красного основного цвета с $\lambda = 611$ нм; иными словами, рис. 2.53 показывает, что монохроматические стимулы не могут быть воспроизведены на экране кинескопа, работающего в системе основных цветов **R**, **G**, **B**, независимо от интенсивности сигналов, подводимых к электродам кинескопа. Рассчитаем теперь интенсивности сигналов, требуемые для воспроизведения цвета, полученного смешением двух единичных монохроматических стимулов с длинами волн 500 и 600 нм. Эти интенсивности могут быть непосредственно определены по ординатам кривых на рис. 2.53

Длина волны (нм)	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$
500	-0,24	0,63	0,21
600	1,69	0,22	-0,01
Сумма:	$R = 1,45$	$G = 0,85$	$B = 0,20$

Положительные величины говорят о том, что цвет смеси двух монохроматических стимулов может быть воспроизведен на экране кинескопа.

Очевидно, что если бы имелись три камеры, спектральные чувствительности приемников которых совпадали бы соответственно с кривыми сложения на рис. 2.53, а интегральные реакции представляли бы разности интегралов соответствующих положительных и отрицательных ветвей этих кривых, то совокупность этих камер представляла бы собой автоматическое счетное устройство для вычисления интенсивностей сигналов, требуемых для точного воспроизведения на экране приемника любого объекта передачи, на который наведена система камер.

Этот вывод точный и удовлетворительный с позиции теории, несколько разочаровывает с практической точки зрения, так как он заставляет задуматься о создании камеры с отрицательной чувствительностью к некоторым частям спектра. Например, камера, регулирующая количество красного рабочего основного цвета, должна быть чувствительна не только к красной части спектра излучения объекта передачи в соответствии с положительной ветвью кривой $\bar{r}(\lambda)$ на рис. 2.53, но также обеспечивать отрицательный сигнал при экспозиции к сине-зеленой части спектра в соответствии с отрицательной ветвью кривой $r(\lambda)$; все это необходимо, если требуется точное воспроизведение на экране телевизора всех элементов передаваемого объекта. Однако это требование, кажущееся невыполнимым, можно удовлетворить. Одна из возможностей состоит в применении двух камер для управления каждым основным цветом, т. е. системы из шести камер. Одна из двух камер должна иметь спектральную чувствительность, соответствующую положительной ветви кривой сложения (например, в красной и фиолетовой частях спектра), а другая — отрицательной ветви (в сине-зеленой части спектра). Затем, полученный с помощью электроники, разностный сигнал от двух камер должен был бы управлять количеством (красного) основного цвета в телевизионном приемнике.

Примерно аналогичные требования предъявляются и к цветной фотографии. Там для идеального цветовоспроизведения вместо трех цветоделенных негативов требуется шесть. Три из них, соответствующие отрицательным ветвям, должны были бы выполняться в виде позитивов, что при совмещении их с основными негативами обеспечивало бы коррекцию цвета при обращении основных негативов в позитивы. В цветной фотографии иногда используют один или два корректирующих позитива (называемые масками) несмотря на то обстоятельство, что циановый, фуксиновый и желтый красители, применяемые для регулировки количества красного, зеленого и синего излучений, меняют свою цветность с изменением количества красителя. Этот метод известен, как метод маскирования [262]. Однако маски в цветной фотографии обычно имеют спектральную чувствительность, соответствующую положительным ветвям двух остальных кривых сложения, т. е. их изготавливают

из основных цветоделенных негативов, а не из специальных эмульсионных слоев, воспроизводящих отрицательные ветви. Такой метод дает возможность лишь приблизительно корректировать цвет, тем не менее он часто приводит к неплохим результатам.

Сомнительно, чтобы использование шестикамерных систем в цветном телевидении имело смысл. Господствующей практикой является сейчас применение камер лишь с положительными ветвями кривых спектральной чувствительности. Основной результат пренебрежения отрицательными ветвями заключается в передаче цветов, расположенных вблизи границ цветового охвата, менее насыщенными, чем в оригинале. Другой метод повышения качества цветовоспроизведения, не требующий использования шести камер, заключается в применении электронных устройств и носит название «матрицирования» [691]. Сигналы, поступающие от камер, проходят через электронное вычислительное устройство, так называемое матричное устройство, в котором они смешиваются в определенных пропорциях таким образом, чтобы матрицированные сигналы были идентичны сигналам от камеры с идеальными кривыми спектральной чувствительности, показанными на рис. 2.53. Однако матрицирование можно применить только в том случае, если сигналы камеры генерируются линейными устройствами, т. е. устройствами, сигналы которых прямо пропорциональны падающему лучистому потоку. Большинство камер обладает нелинейными характеристиками, и матрицирование приводит лишь к частичному успеху.

В цветном телевидении существует множество других препятствий (например, перекрестные искажения) качественному цветовоспроизведению, которые, возможно, даже более важны, чем неточное воспроизведение стандартных функций сложения [89, 262, 691]. Тем не менее колориметрическая теория содействовала правильному выбору спектральной чувствительности передающих устройств и продолжает оставаться руководством в дальнейшем прогрессе цветного телевидения.

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ЦВЕТА

Визуальное сопоставление цвета предметов с цветом стандартных образцов обладает рядом преимуществ по сравнению с инструментальным определением колориметрических показателей в основной системе МКО и потому достаточно широко используется в торговле. Материальные образцы можно легко переносить с места на место и если их цвета достаточно близки к определяемому, то путем визуального сравнения из них может быть подобран самый близкий по цвету, или, что даже лучше, непосредственной визуальной интерполяцией достаточно точно оценено промежуточное значение цвета. Таким образом, контролер может отметить,

что неизвестный цвет наиболее близок к цвету стандартного образца 13, но отклоняется от него в направлении цвета образца 28 приблизительно на 1/3 различия. Этому чисто практическому методу присвоили научное наименование; он известен как метод отношений [484, 541, 542].

Стандартные образцы цвета можно классифицировать в соответствии с их возможным назначением. Обычный образец, используемый для определения цвета поставляемой краски, совсем не имеет универсальности. Он годен лишь для одного цвета и очень часто для одного конкретного заказа. Тысячи таких образцов, выбираемых ежегодно, достаточно хорошо служат своему назначению, и в расчет их брать не следует. Затем имеются ограниченные ряды образцов цвета, представляющих изменение цвета в одном направлении. В повседневной практике используются сотни таких образцов цвета, иногда называемых цветовыми шкалами. В качестве типичного примера можно привести используемые в химических анализах ряды растворов, каждый из которых содержит различные концентрации одного и того же красящего вещества. Другим важным примером может служить набор стеклянных образцов, дублирующих такой ряд цветов. Шкалы для сортировки нефтепродуктов по цвету, растворы сахара или смолы, которые представляют цвета, соответствующие различным степеням очистки или чистоты, представляют собой другие примеры. Такие ряды стандартных образцов, проявляющих изменения цвета в одном направлении, являются более важными в применении, так как они представляют серию цветов, а не один-единственный цвет. И в заключение можно сказать о наборах стандартных образцов, предназначенных для охвата значительной части всех цветов. Из такой совокупности для любого цвета в пределах цветового охвата можно подобрать достаточно близкий цвет. Эти наборы охватили также широкое распространение в промышленности, но наиболее ценные из них можно буквально пересчитать по пальцам. Так как цвет сам по себе является трехмерной величиной, то такие наборы обязательно должны представлять трехмерное изменение, чтобы обеспечить адекватный отбор цветов, представленных рассматриваемой области цветового тела.

СИСТЕМНЫЙ ОТБОР ОБРАЗЦОВ ЦВЕТОВОГО ТЕЛА

Если довольно небольшим количеством образцов (например, 1000) необходимо охватить область всех возможных цветов (по крайней мере заметно различаемых 10 млн), то, чтобы для каждого наугад выбранного цвета в наборе можно было бы найти достаточно близкий, эти образцы должны быть отобраны в соответствии с определенной системой или методом. В противном случае в наборе могут оказаться большие группы близких цветов, в то

время как относительно обширные области цветового тела останутся неохваченными. При создании систематизированного набора стандартных образцов цвета обычно следуют одному из основных методов [161, 721, 736].

Наиболее распространенным способом создания набора цветов является выбор ограниченного числа пигментов и смешение их в изменяющихся пропорциях. Такая система может называться *системой смешения красок*. Типичными системами такого рода являются системы цветов, выпускаемые фирмой «Мартин-Сенур».

Другой метод заключается в воспроизведении красками цвета смесей, полученных с помощью трехцветного колориметра или вращающегося секторного диска при систематическом изменении координат цвета. Системы, полученные с помощью приборов этим способом, называются *системами смешения цветов*. Классическим примером подобной системы является *цветовая система Оствальда*.

Промежуточный метод заключается в том, что цвета воспроизводятся систематическими вариациями размеров раскрываемых элементов в процессе автотипной печати. Этот метод является промежуточным потому, что в зависимости от того, накладываются печатные точки друг на друга или нет, результаты будут аналогичны полученным с помощью метода смешения красок или метода смешения цветов. Хорошим примером такой системы считается *Словарь цвета* Мэрца и Пауля [418].

Кроме того, можно получить систематизированный набор цветов, ориентируясь на восприятие цвета наблюдателем, обладающим нормальным цветовым зрением. Эта цель может быть достигнута путем подбора ряда образцов цвета, каждый из которых воспринимается как отличающийся от ближайших к нему на постоянную величину, так что достигается равномерное заполнение психологического цветового тела, либо она может быть достигнута с помощью равномерных цветовых шкал, отражающих изменение психологических характеристик восприятия цвета: цветового тона, светлоты и насыщенности (как это сделано в цветовой системе Манселла). Так как результат получают путем визуальной оценки, то созданная таким образом система может быть названа системой восприятия цвета.

СИСТЕМЫ СМЕШЕНИЯ КРАСОК

Основная задача системы смешения красок заключается в том, чтобы показать, какие цвета получаются на их основе. Набор образцов должен наглядно представлять цвета, которые могут быть получены при помощи данных красок, это и есть цветовой охват. В таких наборах цветов может также указываться количество основных красок, используемое для получения различных смесей. Концепции, наглядно представленные таким систематизи-

рованным набором образцов, обязательно являются концепциями, относящимися к области красок. Таким образом, если имеются три основные краски: белая, черная и красная, то логически можно представить две последовательности цветов: одну, полученную при смешении белой и красной, а другую — при смешении черной и красной. Не следует полагать, что цвета, полученные в результате такого смешения, обязательно должны иметь одинаковый цветовой тон. Это практически никогда не наблюдается. Например, темно-красный ализарин, смешанный с белой краской, дает цвета красных тонов с пурпурным оттенком. Основное назначение системы смешения красок, использующей любой красный пигмент, может заключаться в том, чтобы показать более или менее пурпурные оттенки красного, получаемые при смешении этого пигмента с белой краской. Не следует также полагать, что при смешении черной и белой красок обязательно получаются чистые серые цвета. Почти всегда воспроизведенные подобным образом цвета имеют голубой оттенок и низкую насыщенность, в связи с чем они воспринимаются как голубовато-серые. Таким образом, концепции, примером которых служат образцы цвета, воспроизведенные путем смешения красок, относятся к концепциям красок. Последовательности цветов, воспроизведенные смешением красок, в целом значительно отличаются как от цветов, созданных на основе аддитивного смешения в пределах тех же конечных точек (например, аддитивное смешение цветовых стимулов), так и от последовательностей, полученных с помощью визуальной оценки непосредственно в пределах тех же конечных точек. Интервал между цветами в этих последовательностях, построенных в соответствии с равномерным изменением весовых или объемных пропорций красок, значительно отличается как от интервалов, определяемых по равномерному изменению коэффициента яркости Y и координат цветности x, y в системе МКО, так и от интервалов, оцениваемых равными на основе визуального восприятия.

Чтобы понять систему смешения красок, необходимо знать метод, в соответствии с которым она была разработана. Отсутствие понимания может привести к ошибочным заключениям при использовании образцов или неправильному их применению.

Цветовая система Нью-Хью, разработанная Фоссом еще в 1946 г. для фирмы «Мартин-Сенур», может служить хорошим примером целой группы систем смешения красок, широко используемых в настоящее время, как в первоначальном варианте, так и с некоторыми модификациями.

В серийной цветовой системе Нью-Хью содержится 1000 цветных матовых образцов, которые выпускаются в виде карт размером $7,6 \times 12,7$ см, содержащихся в пластмассовом футляре, и дисков, расположенных в систематическом порядке между прозрачными прокладками. Она представляет собой систему цветово-

го смешения, построенную на использовании восьми основных красок (шесть хроматических, одна почти черная и одна белая). Девять различных типов смеси белой краски с остальными представлены в виде карт. На периферии самой темной карты имеется 54 цветовых тона. На этом уровне светлоты вокруг нейтрального

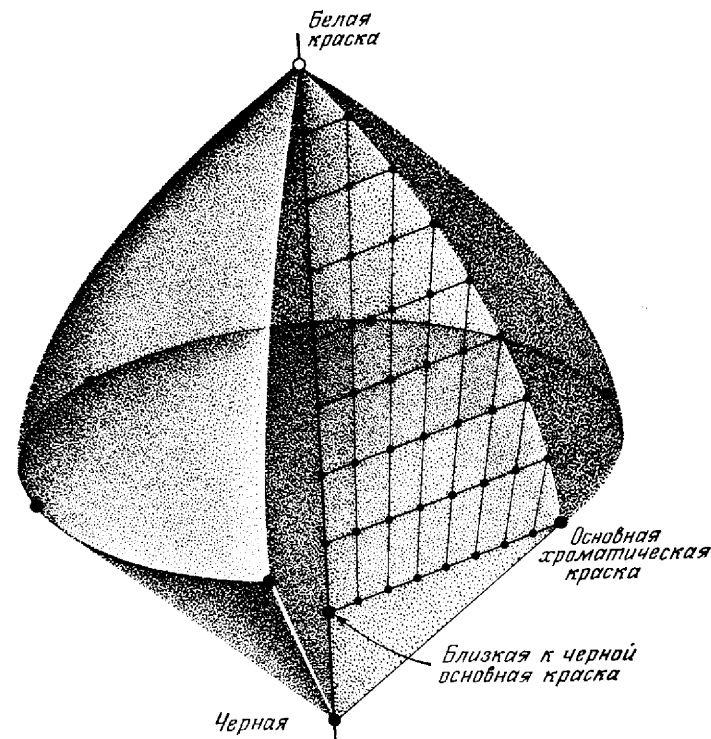


Рис. 2.54. Цветовое тело, схематически представляющее расположение цветов в системе Нью-Хью, полученных смешением шести основных хроматических красок с черной и белой.

Это — типичный пример системы смешения красок.

центра располагаются девять кругов, каждый из которых соответствует последовательному смешению почти черной краски с шестью основными цветными красками. Каждая последующая карта с более светлым тоном содержит на один круг меньше, так что количество кругов постепенно уменьшается от 9 для нижнего уровня светлоты до 0 для белого цвета. Построение такой системы для одной из основных хроматических красок схематически показано на рис. 2.54. 1000 образцов цвета этой системы наглядно представляют пределы, до которых можно производить смешение шес-

ти хроматических красок по отдельности с белой и почти черной красками. Для каждого из этих 1000 цветов известен вес и объем 8 основных красок, что позволяет по этим рецептурным данным получать путем смешения цвет, близкий к любому из указанных цветов. Основные краски были выбраны из-за их постоянства, в результате чего наблюдается ограничение цветового охвата в области красно-пурпурных и синих цветовых тонов. Однако система Нью-Хью включает цвета, обычно используемые для окраски интерьеров и фасадов зданий, она очень успешно содействовала сбыту краски, полученной в результате рецептурного смешения. Последними модификациями этой системы, выпускаемыми фирмой «Мартин-Сенур», являются *Цветовой координатор Нью-Хью*, его сокращенный вариант *Профессиональное руководство по цвету* и *Цветовой робот Марка II*.

СИСТЕМЫ СМЕШЕНИЯ ЦВЕТОВ

Основная задача систем смешения цветов состоит в том, чтобы в виде материальных стандартных образцов цвета воспроизвести последовательности цветов, получаемых с помощью трехцветного колориметра или изменением пропорции площадей сектора на диске Максвелла. Эти последовательности цветов представляют интерес по ряду причин. Во-первых, трехцветный колориметр является прибором, на котором основана стандартная система координат МКО для колориметрии. Колориметрические показатели, связанные с этой системой (коэффициент яркости, координаты цветности, доминирующая и дополнительная длины волн, условная чистота), определяют самый фундаментальный аспект цветового стимула — его спектральный состав. Все, столь же простое по своей сути, как эта проблема, изучалось из чистого любопытства. Например, постоянная цветность соответствует поддержанию одинакового соотношения между координатами цвета.

Вместе с тем к системам смешения цветов привлекает нечто большее, чем чисто научный интерес. Еще задолго до принятия системы координат МКО диск Максвелла использовался в качестве основы при создании цветовых систем. Например, с помощью диска Максвелла можно получить цвета постоянной доминирующей длины волны с использованием комбинаций любого цветного (например, красного) с ахроматическим (белого, серого или черного цвета) секторами просто за счет изменения пропорций между двумя секторами. Накраски, воспроизводящие созданные таким образом цвета, можно также легко проверить на согласованность с помощью диска Максвелла.

Кроме того, последовательности данного типа цветов составляют большую часть нашей повседневной практики, что вызывает дополнительный интерес к цветам постоянной цветности. Форма

предметов представляется нам наглядной благодаря наличию оттенков и теней. Часть предмета, непосредственно обращенная к свету, освещена больше, часть предмета, несколько повернутая от света, освещена меньше, та часть, на которую не попадает свет источника, освещена совсем слабо, получая лишь свет, отраженный от других предметов в комнате. Если поверхность предмета равномерно покрыта одной и той же матовой краской, то эти три области предмета (свет, полутьма и тень) достаточно точно соответствуют цветам с одинаковой цветностью, когда мы воспринимаем форму предмета, находящегося в поле нашего зрения, чаще всего реагируем на сложный стимул, состоящий из стимулов приблизительно одинаковой цветности. Иногда говорят, что такие цветовые стимулы образуют теневые ряды. Если цветовая система основана на группах таких теневых рядов, можно по крайней мере предположить, что такие последовательности цветов появляются в результате привычного восприятия, т. е. так, как мы их видим всегда.

В конечном счете чисто практическая причина особого интереса к системам смешения цветов, построенных на основе смешения при усреднении на диске Максвелла, заключается в ее связи с процессом цветной печати. Этому виду смешения соответствуют цвета, полученные в результате сочетания хроматической и черной красок. Тремя усредненными таким образом цветами являются цвета черной краски, хроматической краски и белой бумаги. Это смешение не является субтрактивным, так как черные точки полностью закрывают любую часть цветных точек, на которые они попадают. Более того, даже процесс растровой печати с помощью так называемых основных субтрактивных красок пурпурного, желтого и голубого цвета может рассматриваться как смешение восьми основных цветов с использованием усреднения [217, 481]. Этими восемью основными цветами являются: белый цвет бумаги, пурпурный, желтый и голубой участки бумаги, покрытой только одним слоем красной краски; синий и зеленый участки бумаги, покрытой двойными слоями красок (пурпурной — желтой, пурпурной — голубой, желтой — голубой) и черные участки бумаги, покрытой тройным слоем краски (пурпурной — желтой — голубой). Таким образом, системы смешения цветов непосредственно относятся к печати в процессе полутонового растривания.

Классическим примером ряда систем смешения цветов является цветовая система Оствальда [160]. *Руководство по цветовой гармонии*, издаваемое фирмой «Контейнер Корпорейшн оф Америка» является прекрасным воплощением цветовой системы Оствальда, однако, к сожалению, оно не получило достаточного распространения.

Во втором издании *Руководства по цветовой гармонии* (1948 г.) содержится 680 образцов цвета (квадраты со стороной 2,54 см),

помещенных на 12 картах в форме двойных треугольников, один из которых представляет цвета с одинаковой доминирующей длиной волны, а другой — цвета с дополнительной длиной волны. Каждому образцу приписывается обозначение Оствальда, причем

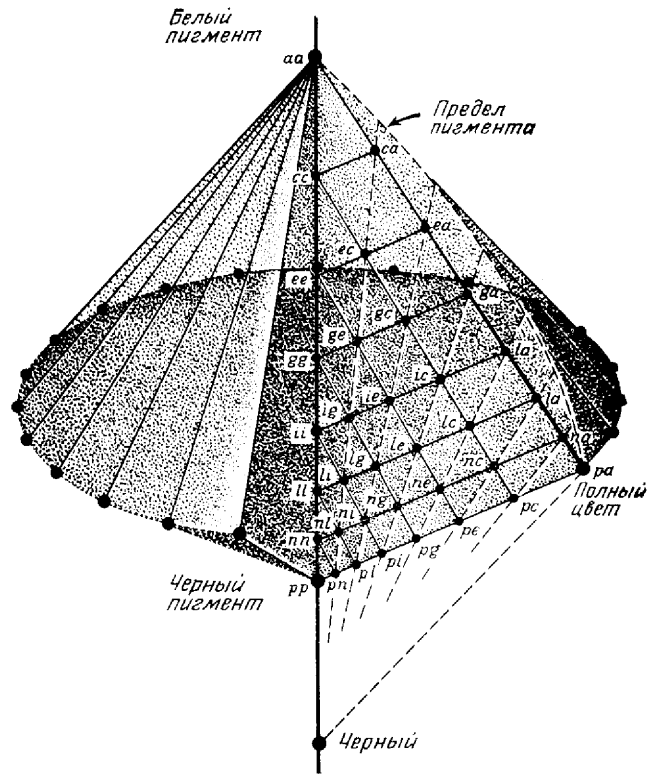


Рис. 2.55. Цветовое тело, схематически представляющее расположение цветов одной из 24-х доминирующих (или дополнительных) длин волн по Оствальду, показанных сплошными прямыми линиями.

— — — показывает отклонения, введенные в *Руководство по цветовой гармонии* для расширения цветового охвата за счет более чистых цветов с данным коэффициентом яркости.

доминирующая (или дополнительная) длина волны на шкале цветовых тонов Оствальда обозначается числом (от 1 до 24), а содержание белого, черного и полного цвета — двумя буквами (*ra*, *na*, *pe* и т. д.). Образцы, обозначенные индексом *ra*, являются приближением к чистым цветам по Оствальду, воспроизведенным пигментами. Имеется 28 цветов каждой доминирующей (или дополнительной) длины волны, которые вместе с 8-ю образцами серой шкалы составляют $(24 \times 28) + 8 = 680$ цветов. Образцы цвета

изготовлены на основе окрашенной прозрачной ацетатцеллюлозной пленки, причем каждый образец имеет глянцевую и матовую поверхности с одним и тем же обозначением цвета по Оствальду. Цвета были выбраны не только для того, чтобы иметь постоянную доминирующую длину волны для каждого цвета одного и того же номера по шкале цветовых тонов Оствальда, но также и для того, чтобы образцы цвета в любой вертикальной колонке имели постоянную чистоту. Эти вертикальные серии цветов с одинаковой цветностью известны как теньевые ряды. Однако серии, связывающие образец цвета (*pa*) с белым и черным цветами, не следуют законам смешения цветов с помощью диска, а представляют максимально возможный цветовой охват с используемым покрытием (рис. 2.55). Колориметрические показатели образцов с матовой поверхностью были рассчитаны по результатам спектрофотометрических измерений и опубликованы в [194]. Было показано, что эти образцы цвета более точно соответствуют системе Оствальда по сравнению с любым другим ранее выпускавшимся набором стандартных образцов цвета. Образцы легко снимаются, что облегчает сравнение с неизвестными цветами и позволяет составлять из них различные сочетания при создании цветовых гармоний. Используемая в руководстве форма двойного треугольника подчеркивает важность гармонии отдельного цветового тона с дополнительным цветовым тоном.

В третьем издании *Руководства по цветовой гармонии* (1948 г.) образцы выполнены в форме шестиугольников со стороной 2,2 см. Были изготовлены карты для 6 дополнительных значений доминирующей длины волны со значениями цветового тона по Оствальду $4\frac{1}{2}$, $6\frac{1}{2}$, $7\frac{1}{2}$, $12\frac{1}{2}$, $13\frac{1}{2}$ и $24\frac{1}{2}$ для обеспечения лучшего цветового охвата в цветовой области, важной с точки зрения торговли. По этой же причине для 12 карт были изготовлены дополнительные теньевые ряды по 7 ступеней каждый со значениями цветового тона по Оствальду 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 19, 22, 24, $24\frac{1}{2}$, а для 4 карт дополнительные ряды с равным содержанием черного цвета (чуть более темные, чем светлые серии) со значениями цветового тона по Оствальду $24\frac{1}{2}$, 1, $4\frac{1}{2}$, 2. Поэтому общее число цветов в третьем издании достигло 943.

В соответствии со своим названием *Руководство* предназначено главным образом для понимания и изучения цветовой гармонии и координации цвета в дизайне [296]. Вместе с тем, поскольку имеются образцы с блестящей и матовой поверхностями, которые легко доступны для сравнения с неизвестными цветами, Руководство исключительно удобно использовать в качестве набора стандартных образцов цвета. Блестящая сторона образцов расширяет цветовую гамму до более темных и более насыщенных цветов по сравнению с возможностями матовых образцов. Ацетатный лак, используемый в качестве связующего, предохраняет светлые образцы от пожелтения с течением времени.

ЦВЕТОВЫЕ СИСТЕМЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ РАСТРОВОЙ ПЕЧАТИ

Серии цветов от белого цвета бумаги до цвета оттиска со сплошным покрытием краски могут быть получены в процессе растровой печати при постепенном изменении количества красок на оттиске. Эти серии соответствуют смещению цветов небольших точек краски, расположенных рядом и неразрешимых глазом. Печатаются ряды таких серий второй краски поверх первой, можно получить двумерную последовательность смещений этих двух красок с белым цветом бумаги. Этот основной метод создания систематизированных изменений цветов в процессе растровой печати использовался очень часто. В качестве наиболее важного примера из прошлого можно привести шкалы цветового охвата Хьюбнера, представляющие все комбинации растровых плотностей для трех основных красок, а также все возможные комбинации при добавлении к ним четвертой (черной) краски. Аналогично Ивс изготовил совершенные карты со всеми цветами, связанными таким образом, чтобы обеспечивать отбор проб цветового пространства. В том случае, когда растровые точки перекрываются, последовательности цветов соответствуют смещению красок, в противном случае — смещению цветов. Таким образом, в цветовых системах, воспроизведенных в процессе растровой печати, сочетаются принципы систем смещения красок и цветов.

Некоторые из наиболее ценных карт цветов воспроизведены типографским способом. Они обеспечивают практическое использование эталонных образцов цвета, благодаря их разумной стоимости, достаточной однородности и постоянства.

Словарь цвета Мэрца и Пауля, первое издание которого вышло в 1930 г., а второе — в 1950 г., является хорошим примером цветовой системы, полученной в процессе растровой печати [418]. В словаре содержится 7056 различных образцов цвета, отпечатанных на полуглянцевой бумаге, 6048 из которых представляют собой прямоугольники размером $1,3 \times 1,6$ см, а 1008 более темных — прямоугольники размером $2,7 \times 1,6$ см. Цвета получены методом полутонной растровой печати на основе 8 хроматических и 7 основных серых красок. Цветовой круг делится на 8 частей: от пурпуровато-красного до красного, от красного до оранжевого, от оранжевого до желтого, от желтого до зеленого, от зеленого до сине-зеленого, от сине-зеленого до синего, от синего до пурпуровато-красного и от пурпурного до пурпуровато-красного. В последнем интервале даются оттенки, представленные в последней части предыдущего интервала, очевидно затем, что таким образом цветовой охват может быть значительно увеличен за счет более светлых и более насыщенных цветов. Каждый интервал цветового тона представлен серией из 8 карт. В первой карте каждой серии пред-

ставлены цвета, полученные в результате совмещенного печатания двух красок на белой бумаге. Оттиски первой краски расположены в 12 вертикальных колонках одинаковых цветов, из которых первая колонка остается ненапечатанной, а последующие колонки отпечатаны со все возрастающим количеством основной краски, которая в 12-й колонке полностью закрывает бумагу. Оттиски основной краски, следующей по тону, расположены в 12 горизонтальных рядах одинаковых цветов, первый ряд которых не напечатан, а последующие ряды напечатаны с все возрастающим количеством основной краски, которая в 12-м ряду полностью закрывает бумагу. При таком способе печати верхний левый угол бумаги остается чистым (коэффициент яркости Y составляет около 86%), а нижний правый угол представляет собой сплошной оттиск одного слоя основной краски по второму. Все остальные образцы представляют промежуточные цвета, причем количество краски в клише подобрано таким образом, что переходы от одного цвета к другому являются более или менее равноступенными. На прямой, соединяющей верхний правый и нижний левый углы карт, располагается последовательность образцов различных цветовых тонов, в то время как на прямых, проходящих через верхний левый угол, находятся образцы с приблизительно одинаковым цветовым тоном. Вторые карты в серии отличаются от первых тем, что аналогичные оттиски красок отпечатаны не на белой бумаге, а на фоне первой основной серой краски (коэффициент яркости который составляет около 74%). На третьей карте оттиски наложены на более темный серый фон и т. д., соответственно на седьмой и восьмой картах представлены самые темные цвета, так как коэффициент яркости фона в этих случаях самый низкий. Седьмая и восьмая карты отличаются от шести предшествующих наличием только 6 колонок (вместо 12) по 12 образцов в каждой. Первые две серии цветов (от пурпуровато-красных до красных и от красных до оранжевых) отличаются от последующих серий наличием только 6 горизонтальных рядов вместо 12. Таким образом, имеется $7 \times 6 = 42$ печатных форм по 144 цвета каждая и $7 \times 2 = 14$ печатных форм по 72 цвета каждая. Всего же в словаре $6048 + 1008 = 7056$ цветов. На рис. 2.56 показано расположение цветов для одной из 8 основных хроматических красок.

Коэффициенты яркости серии серых основных красок при дневном свете составляют 74, 67, 48, 38, 28, 20 и 10%. При переходе от светлых карт к темным воспринимаемые различия по светлоте значительно увеличиваются. Чистота светлых цветов, воспроизведенных этим способом, несколько ниже, чем при использовании других методов. Более того, многие темно-красные и пурпурные образцы при зеркальном отражении имеют различный цветовой тон (так называемый эффект бронзовости [76, 159]). Однако это несущественные дефекты. Вместе с тем широкий выбор

достаточно интенсивных цветов и систематизированное расположение образцов позволяют легко найти желаемый цвет. К словарю приложен алфавитный указатель, содержащий более 4000 тща-

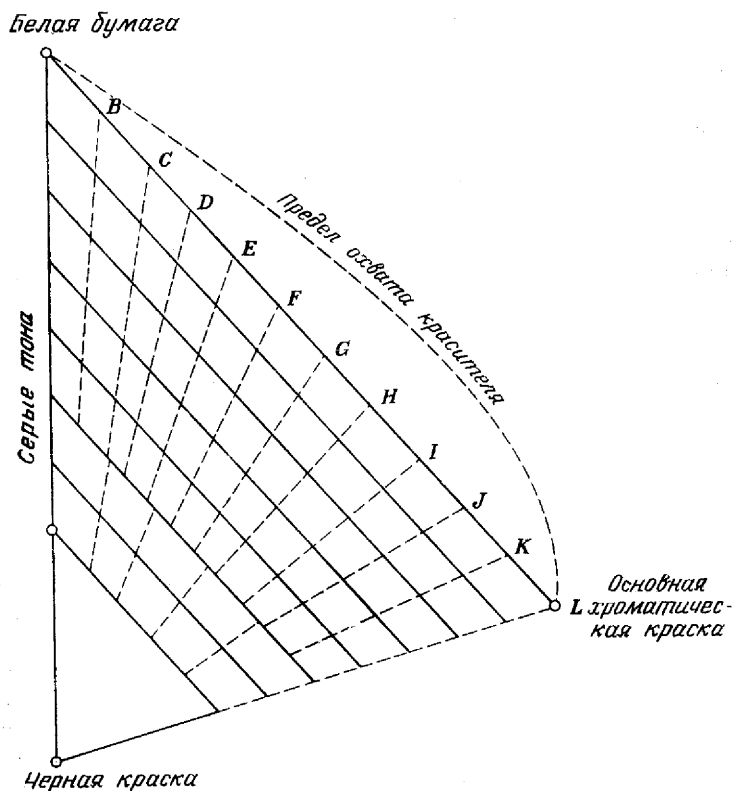


Рис. 2.56. Схематическое представление расположения цветов в Словаре цвета Мэрца и Пауля, полученных на основе одной из восьми основных хроматических красок.

Цвета (от белого до темно-серого) получены печатью на серой бумаге при возрастающем количестве краски.

тельно отобранных наименований цветов вместе с буквенно-цифровым индексом (номер карты, номер ряда, буквенное обозначение колонки), так что каждый соответствующий образец можно легко отыскать. На картах также указаны наименования цветов. Цветов в атласе настолько много, что различия между соседними цветами малы и интерполяция часто не нужна. Словарь Мэрца и Пауля можно широко использовать в качестве набора стандартных образцов цвета в различных областях науки и техники.

Техническая организация полиграфической промышленности (GATF) в 1973 г. предложила новую карту цветов, называемую *Цветовой системой Фосса* [176], предназначенную в основном для полиграфистов. В ней содержится около 6000 различных цветов, причем светлых воспроизведено столь же много, как и темных, и все они расположены на двух листах, что очень удобно для их быстрого просмотра. В принципе расположения цветов в этой системе используются некоторые новые идеи. Во время написания данной главы у нас не было образца цветовой системы Фосса.

СИСТЕМЫ ВОСПРИЯТИЯ ЦВЕТА

Необходимо отметить, что с точки зрения визуального восприятия все системы смешения красок и цветов будут производить отбор образцов цветовой тела более или менее неравномерно. Это значит, что одни цветовые области представлены образцами, цвета которых отличаются очень незначительно, а другие — вообще не представлены. Одна из основных задач систем восприятия цвета заключается в том, чтобы обеспечить равномерное заполнение психологического цветовой тела. Другая состоит в том, чтобы наглядно представить психологические характеристики цветовой восприятия, например в значениях цветовой тона, светлоты и насыщенности. Другими словами, необходимо создать серии образцов, все цвета которых при обычных условиях освещения и наблюдения воспринимаются, как имеющие одинаковый цветовой тон, одинаковую светлоту или одинаковую насыщенность. Это стремление к созданию наборов образцов цвета с постоянным цветовым тоном наблюдалось даже у создателей систем смешения красок. Данная идея использовалась во многих наборах образцов цвета. Разумеется, у цветов смеси красок с белой или черной лишь приблизительно одинаковый цветовой тон. В системе восприятия цвета сделана попытка следовать этой идее до логического завершения и получить группы образцов, которые будут точно соответствовать цвету без необходимых скидок.

Психологическое цветовой тело может рассматриваться как геометрическая модель цветов, воспринимаемых при наблюдении цветowych стимулов предметов. Например, цветовые восприятия, выраженные значениями психологических характеристик цветовой тона, светлоты и насыщенности, могут быть представлены точками цветовой тела, координаты которых соответствуют этим характеристикам.

Для этого случая наиболее подходящей является система координат, показанная на рис. 2.57, а. Восприятия ахроматических (серых) цветов от черного до белого представлены точками на вертикальной оси, являющейся осью светлоты. Светлота (L) черного цвета равна 0, а белого — равна 100.

Восприятия всех остальных цветов обозначаются точками, лежащими вне вертикальной оси. Восприятие цветов с одинаковой светлотой задается точками в горизонтальной плоскости, перпендикулярной оси светлоты. В пределах этой плоскости восприятия цветов одинаковой насыщенности (S) представлены точками на

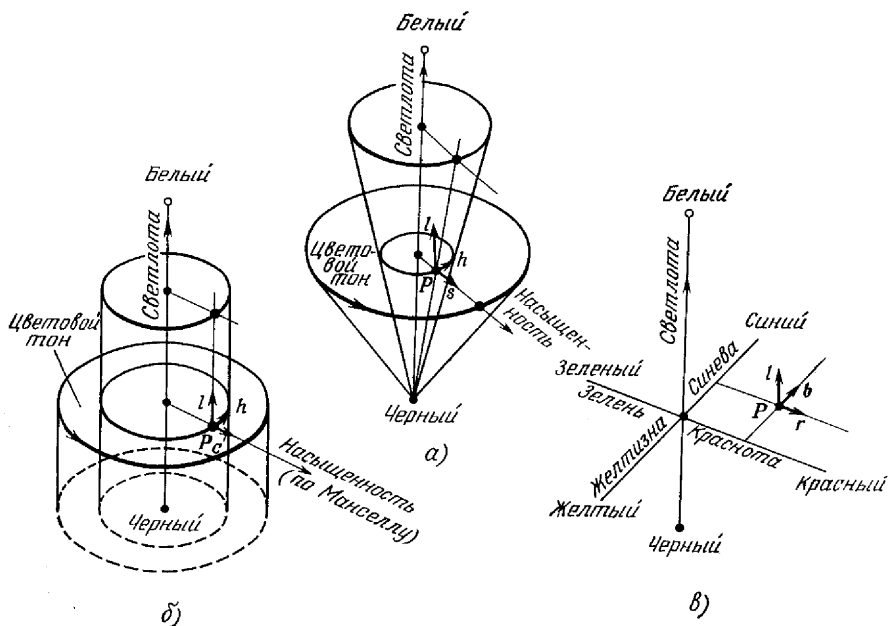


Рис. 2.57. Различные геометрические модели, представляющие пространство цветового восприятия.

концентрических окружностях. Радиусы окружностей пропорциональны насыщенности: чем больше радиус окружности, тем выше насыщенность.

Восприятия постоянной светлоты (L) и постоянной насыщенности (S) могут отличаться по цветовому тону (H). Наиболее подходящим геометрическим местом точек для характеристики цветового тона является окружность. Различные оттенки расположены в их естественном порядке от красного к желтому, зеленому, синему, пурпурному и снова к красному, образуя замкнутый круг.

Данное цветовое восприятие, представленное точкой P на рис. 2.57, a , может изменяться в трех основных направлениях: по цветовому тону (h), светлоте (l), насыщенности (s). Цветовой тон изменяется по кругу, насыщенность — по радиусу, светлота — в вертикальном направлении, параллельном оси светлоты.

При изменении светлоты стимула цвета предмета многие наблюдатели отмечают одновременное изменение насыщенности. В частности, при увеличении светлоты насыщенность стимула уменьшается, при ее уменьшении — возрастает. Это явление взаимосвязи светлоты и насыщенности становится понятным благодаря геометрической модели на рис. 2.57, a . Цветовые восприятия постоянной насыщенности представлены коаксиальными конусами с вершиной в точке, представляющей черный цвет.

Модель пространства цветового восприятия, представленная на рис. 2.57, a , применима далеко не ко всем наблюдателям. Многие наблюдатели воспринимают и описывают цвет не в характеристиках цветового тона насыщенности и светлоты, а в системе координат, представленной на рис. 2.57, b . Характеристики цветового тона и светлоты представлены таким же образом, как и на рис. 2.57, a , только насыщенность заменена насыщенностью (по Манселлу). Цветовые восприятия насыщенности представлены коаксиальными цилиндрами. При изменении светлоты цветового стимула предмета наблюдатель, воспринимающий цвет в системе цветовой тон — светлота — насыщенность (по Манселлу), будет замечать только изменение светлоты. Другие характеристики останутся неизменными.

Понятие насыщенности (по Манселлу) отличается от понятия насыщенности, которое включает изменения светлоты. Для цветовых восприятий одной и той же светлоты насыщенность и насыщенность (по Манселлу) представлены теми же точками в цветовом теле.

Некоторые наблюдатели предпочитают альтернативное описание цветовых восприятий через светлоту, желтизну или синеву и красноту или зеленю. В этом случае цветовое тело может быть изображено в декартовых координатах с использованием трех взаимноперпендикулярных осей. На рис. 2.57, c представлена такая система координат. Ось светлоты также проходит от черного цвета внизу до белого наверху. Желто-синия и красно-зеленая оси перпендикулярны друг другу и оси светлоты. В вертикальной плоскости, проходящей через желто-синюю ось, точками представлены цветовые стимулы предметов, в которых наблюдатель не отмечает наличия красного или зеленого цветов. Те стимулы, в которых наблюдатель не отмечает наличия желтого или синего цветов, представлены точками на вертикальной плоскости, проходящей через красно-зеленую ось. Цветовые стимулы тех предметов, в которых наблюдатель не отмечает никакой цветности, воспринимаются как ахроматические или серые и представлены точками на оси светлоты.

Эта система координат также объясняет, почему наличие синего иногда называют отрицательной желтизной, а наличие зеленого — отрицательной краснотой.

Если цветовое тело представлено в системе координат, показанной на рис. 2.57, *в*, цветовые тона красный, зеленый, синий и желтый обычно соответствуют *унитарным тонам*. Эти тона большинства наблюдателей оценивают как психологически однозначные. Другие цветовые тона воспринимаются как комбинации двух соседних унитарных тонов, например оранжевый тон составлен из красного и желтого. Однако не совсем ясно, как этот принцип можно применить ко всем цветовым восприятиям. В этом смысле проблема восприятия коричневого цвета является спорной, причем может возникнуть вопрос о том, может ли коричневый цвет также являться психологически однозначным цветом.

Понятие цветового тела, представленного любой из трех систем координат на рис. 2.57, применимо не только к цветовым стимулам объектов, включая окрашенные поверхности, такие, как образцы красок, но и к цветовым стимулам прозрачных объемов. Однако здесь имеется незначительное различие. В верхней части цветового тела прозрачных веществ должно быть цветовое восприятие не белого цвета, а цвета совершенной прозрачной среды (вакуума, воздуха, дистиллированной воды, водопроводной воды, и т. д. с постепенным уменьшением точности передачи).

Аналогично можно представить также восприятия цветов самосветящихся поверхностей. В этом случае цветовое тело весьма существенно отличается от тех, которые предложены для восприятия цвета предметов. Для самосветящихся поверхностей не существует понятия черного или белого цвета. Следовательно, нижняя граница такого цветового тела невидима или совсем не имеет цвета, а верхняя граница очень яркая (или слепящая) и представляет самое высокое ощущение светлоты, которую могут воспринять наши глаза. Из-за различия между самосветящимися и несамосветящимися предметами для определения светлоты используются два термина: для самосветящихся предметов *brightness* (или *luminosity*), для несамосветящихся *lightness*. Светлота самосветящихся предметов изменяется от невидимой глазу до слепящей (максимальная светлота, которую может ощущать наблюдатель). Светлота несамосветящихся предметов изменяется от черной до белой (или абсолютно прозрачной).

Особый интерес представляет собой восприятие цвета предметов, в особенности окрашенных поверхностей, таких, как образцы красок. Чаще всего такие наборы красок иллюстрируют системы восприятия цвета.

Система Манселла. Наиболее значительным примером системы восприятия цвета является *Атлас цветов Манселла*, выпускаемый фирмой «Манселл калор». Имеются различные издания атласа, отличающиеся по количеству образцов, их размеру и типу поверхности (блестящая или матовая). Например, издание атласа с гли-

цевыми образцами включает 1450 цветных красок, расположенных на 40 картах постоянного цветового тона. Кроме того, в атлас входит 18-ступенчатая серая шкала. Каждый образец цвета располагается в прорези на карте и при необходимости может быть легко вынут. Размер карты 25,4 × 33 см; размер отдельного образца 1,8 × 2,1 см. Атлас выпускается в двух томах размером 33 × 30,5 × 5,1 см.

На каждой карте постоянного цветового тона образцы расположены по рядам и столбцам. Имелось в виду, что при обычных условиях наблюдения (освещение дневным светом, фон от средне-серого до белого) образцы одного ряда будут восприниматься как имеющие равную светлоту, а одного столбца — как имеющие равную насыщенность. Цвета на каждой карте постепенно изменяются от очень светлого (наверху) до очень темного (внизу), при этом различия между ними воспринимаются одинаковыми. Они меняются от ахроматических цветов, черного, серого или белого (на внутренней кромке карты) до хроматических цветов (на внешней кромке) ступенями, которые, как полагают, также воспринимаются равными. Каждый образец обозначен тремя символами — первый указывает *цветовой тон по Манселлу*, второй — *светлоту* по Манселлу, а третий — *насыщенность* по Манселлу: 2,5 YR 5/10 обозначает величину насыщенности в 10 ступеней от серого той же светлоты (N5/). Обозначение в системе Манселла основано на практически равноконтрастных цветовых шкалах, что является весьма полезным при постановке и решении многих проблем в колориметрии.

Расположение цветов в атласе Манселла следует геометрической модели, приведенной для системы восприятия цвета на рис. 2.57, *б*. В соответствии с этой моделью карта постоянного цветового тона в атласе Манселла построена следующим образом (рис. 2.58). Шкала светлоты представлена шкалой светлоты по Манселлу, по которой черный цвет обозначен индексом 0/, а белый — 10/. Между ними равномерно распределены девять серых цветов. Цвета одинаковой насыщенности расположены на вертикальных линиях, параллельных шкале светлоты. Насыщенность по Манселлу увеличивается через две ступени (1/2, 1/4, . . . , 1/10). Цвета, расположенные на горизонтальных линиях, имеют одинаковое значение светлоты по Манселлу. Цветовой охват на карте постоянного цветового тона по Манселлу ограничен. Смеси цветных пигментов с черным и белым дают цветовой охват, граница которого представлена штриховой линией на рис. 2.58. Каждый ряд цветов с одинаковым значением светлоты расширяется до тех пор, пока следующий интервал в две ступени насыщенности не выйдет за границу цветового охвата. На рис. 2.59 представлено строение карт одинаковой светлоты, которые могут быть составлены из карт постоянного цветового тона. 100-значная шкала

и обозначения цветовых тонов по Манселлу показаны в пределах охвата внешнего круга. Цвета одинакового цветового тона по Манселлу представлены радиусами исходящими из центра, представляющего собой серый цвет с насыщенностью /0. Шкала цветового

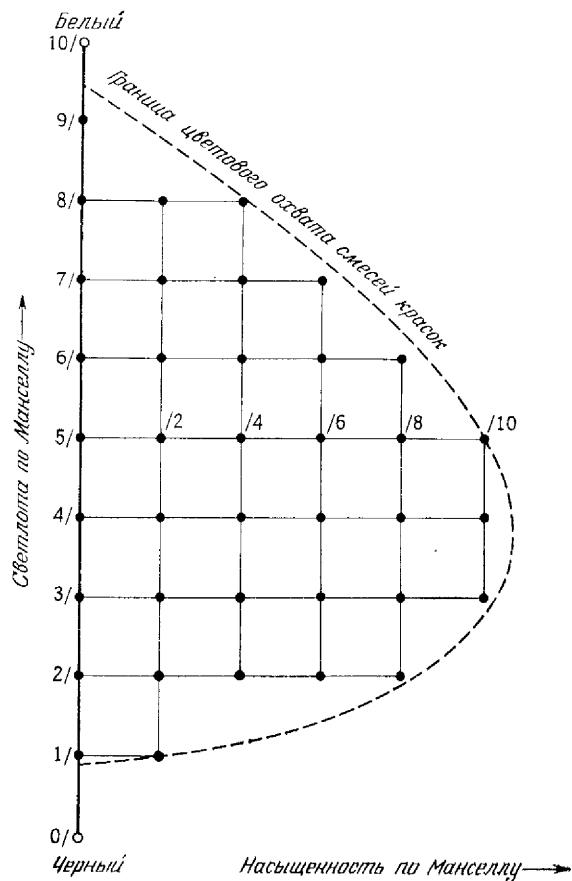


Рис. 2.58. Расположение в атласе Манселла цветов с одинаковым цветовым тоном по Манселлу.

тона составлена десятью сегментами по 10 цветовых тонов в каждом, например сегмент от 1YR до 10YR, а пятый цветовой тон каждого из этих сегментов обозначается только буквами, таким образом 5YR часто записывается просто как YR. Шкала насыщенности по Манселлу до значения /10 представлена вдоль радиальных линий на рис. 2.59, а цвета с одинаковым значением насыщенности представлены пятью concentрическими окружностями. Сле-

дует отметить, что заполнение образцами цветового тела вблизи черно-белой оси (насыщенность /0) благодаря этому методу построения является более плотным, чем для цветов высокой насыщенности, расположенных далеко от оси. Это является недостатком, присущим любому набору образцов цвета, построенному на основе

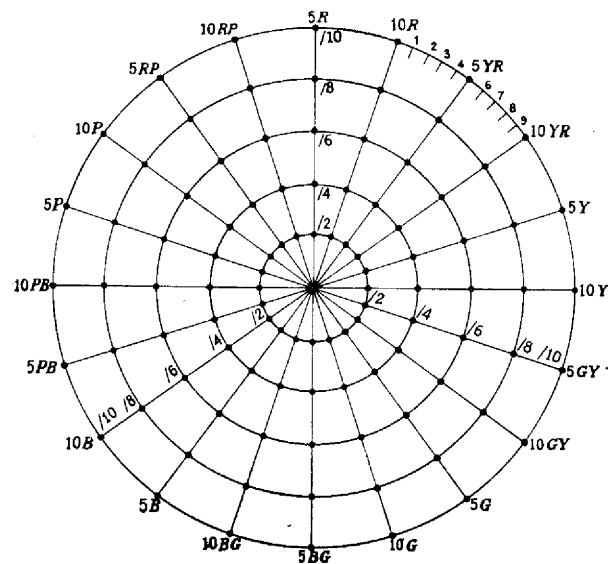


Рис. 2.59. Расположение в атласе Манселла цветов с одинаковой светлотой по Манселлу.

радиального метода. В атласе Манселла представлены не все 100 цветовых тонов в соответствии с рис. 2.59, а только 40 из них: 2,5YR, 5YR, 7,5YR, 10YR, 2,5Y, . . . , 10R.

На рис. 2.60 показана наклонная проекция цветового тела Манселла, иллюстрирующая расположение плоскостей постоянного цветового тона и светлоты по Манселлу. Постоянная насыщенность по Манселлу представлена цилиндрическими поверхностями, осью которых является серая шкала. Подобие между этой моделью и моделью, показанной на рис. 2.57, б, очевидно.

Колориметрические показатели образцов цвета атласа Манселла очень близки к определенным в Заключительном докладе Подкомитета Американского оптического общества по цветовому пространству Манселла [487]. В докладе 1943 г. дано пересмотренное цветовое пространство системы Манселла, представленное в ранних изданиях его атласа. На эту систему обычно ссылаются как на *Систему ренотации Манселла*. Издания атласа Манселла, вы-

пускаемые в настоящее время фирмой «Манселл калор» или Японским исследовательским институтом по цвету, соответствуют системе ренотации 1943 г.

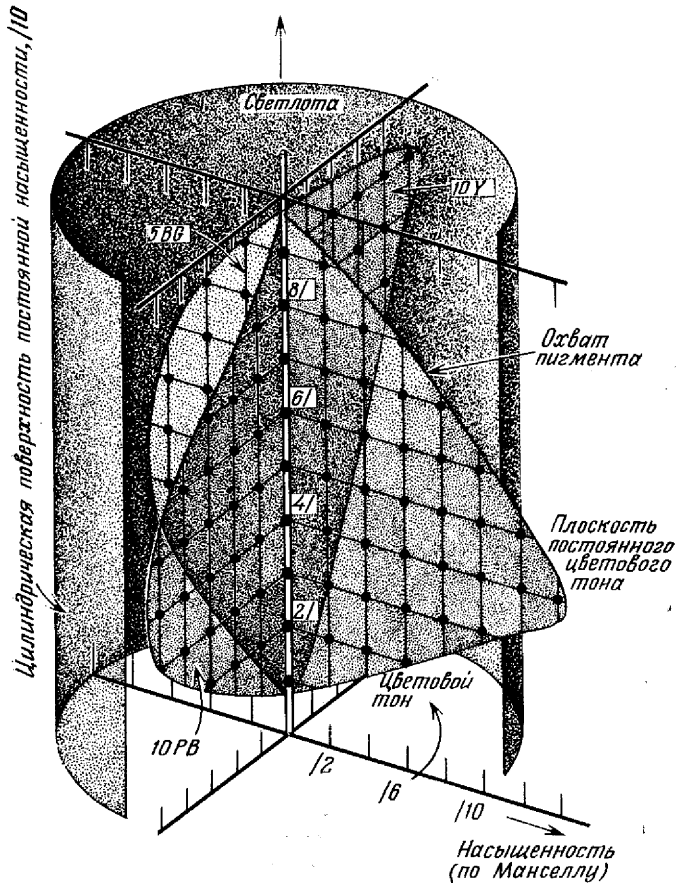


Рис. 2.60. Схема цветового тела Манселла, иллюстрирующая наличие четырех плоскостей постоянной светлоты по Манселлу (5R, 10Y, 5BG, 10PB) и цилиндра постоянной насыщенности по Манселлу (/10).

Плоскости постоянного цветового тона пересекаются вдоль оси светлоты по Манселлу, которая является также общей осью всех цилиндров постоянной насыщенности по Манселлу. Плоскости постоянной светлоты по Манселлу пересекают ось под прямым углом

На рис. 2.61 представлены шкалы цветового тона и насыщенности по Манселлу для значения светлоты 5/ (равном коэффициенту яркости $Y = 19,8$), определенные в координатах цветности x, y при стандартном источнике света С в системе МКО 1931 г. Анало-

гичные графики для значений светлоты по Манселлу от 1/ до 9/ приведены в статье Ньюхолла, Никкерсон и Джадда [487]. Полностью таблицы и графики приведены в книге Вышедки и Стайлса *Наука о цвете* [736]. Эти данные представлены не только для цветностей образцов атласа Манселла, но и для всего охвата теоретически возможных цветностей цветовых стимулов предметов.

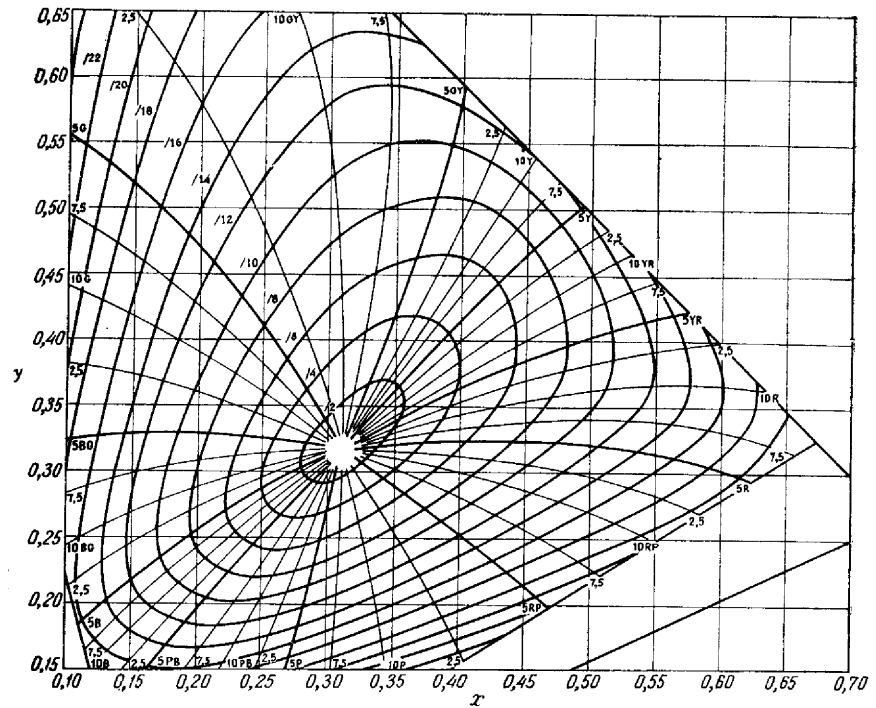


Рис. 2.61. Часть цветового графика МКО 1931 г., показывающая линии постоянного цветового тона и насыщенности по Манселлу для цветов с постоянным значением светлоты 5/(Никкерсон, из частного сообщения).

Теоретический предел имеет место для оптимальных цветовых стимулов. Иногда линию цветности оптимальных стимулов называют *границами Мак Адама* [396, 559, 588, 736].

Оптимальным цветовым стимулом является такой цветовой стимул предмета, который для данного коэффициента яркости и доминирующей (или дополнительной) длины волны имеет максимально возможную условную чистоту цвета.

Спектральные коэффициенты отражения такого предмета могут равняться только нулю или единице и в пределах видимого спектра иметь не более двух переходов. Следует отметить, что практиче-

ски таких предметов не существует, однако они представляют значительный теоретический интерес.

На рис. 2.62 показаны линии постоянной насыщенности для девяти значений светлоты по Манселлу на цветовом графике МКО

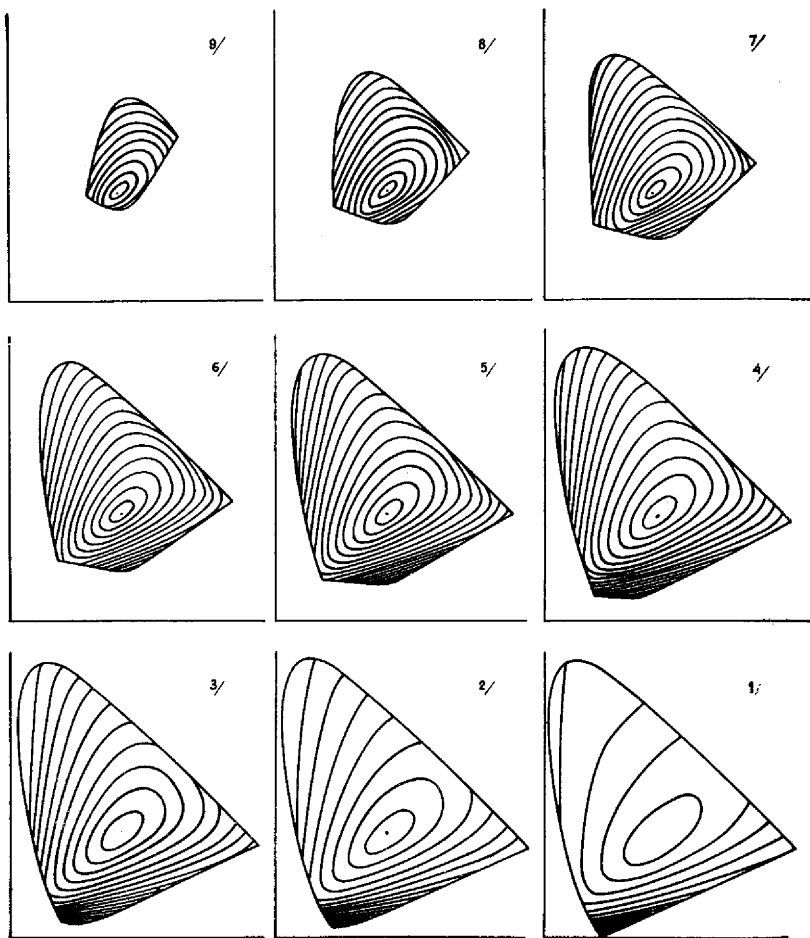


Рис. 2.62. Цветовые графики x, y МКО 1931 г. с линиями постоянной насыщенности по Манселлу для светлоты по Манселлу от 1/ до 9/. Внешние границы представляют собой теоретические пределы для цветовых стимулов предметов [487].

1931 г. вплоть до теоретических границ, налагаемых оптимальными цветовыми стимулами. По мере перехода от высоких к средним значениям светлоты по Манселлу (от 9/ до 5/) контуры линий рав-

ной насыщенности (1/2, 1/4, 1/6 и т. д.) увеличиваются в размерах незначительно. Основное различие линий равной насыщенности для этой части шкалы светлоты заключается в том, что при значении светлоты 5/ они охватывают большую часть цветового графика, чем при значении 9/. Линия цветности оптимальных цветовых стимулов при значениях светлоты 9/ ($Y = 79$) показывает, что нельзя воспроизвести образцы цвета с высоким значением коэффициента яркости Y , которые значительно бы отличались от эквивалентного серого ($N9/$), особенно в синей, пурпурной и красной областях. Однако для значений светлоты 5/ ($Y = 20$) линии равной насыщенности занимают уже более двух третей цветового графика. На рис. 2.62 видно, что при переходе от значения светлоты 5/ к 1/ размеры каждой линии одинаковой цветности по Манселлу быстро увеличиваются с уменьшением светлоты, так что при значении светлоты 1/ линия насыщенности 1/2 уже охватывает почти такую же часть цветового графика, как и все возможные цветности при значении светлоты по Манселлу 9/.

Линии одинаковой насыщенности по Манселлу могут быть рассчитаны путем интерполяции для любого промежуточного значения светлоты между 1/ и 9/ (рис. 2.62). Между значениями светлоты 9/ и 10/ (идеальный белый) линии насыщенности можно достоверно определить методом экстраполяции. Следует отметить, что для значений светлоты 7/, 8/ и 9/ различие между линиями насыщенности по Манселлу невелико. Линии цветности тщательно выверены для всего интервала светлоты от значения 9/ до 10/. Основное различие между ними заключается в непрерывном сокращении линии цветности для оптимальных цветовых стимулов по мере приближения к значению светлоты 10/ ($Y = 100$). Для совершенного отражающего рассеивателя возможна только одна цветность — цветность самого источника, так что линия оптимальных цветов при светлоте по Манселлу, равной 10/, сводится к одной точке цветности (представляющей стандартное излучение С МКО).

Для значений светлоты по Манселлу между 0/ и 1/ интерполяция не является надежной, так как линии насыщенности для значения светлоты по Манселлу 0/ полностью лежат вне цветового графика. Однако Джаддом и Вышецким была сделана экстраполяция линий насыщенности в интервале светлот по Манселлу от значения 1/ до 0,2 с шагом в 0,2 [353]. На рис. 2.63 представлены линии равного цветового тона и насыщенности по Манселлу для значения светлоты 0,2/.

Очевидно, что образцы цвета с коэффициентом яркости, несколько большим нуля (светлота по Манселлу также приближается к нулю), можно, по крайней мере теоретически, воспроизвести с цветностями, соответствующими всем спектральным цветностям. Необходимо лишь представить себе образец цвета, у которого спектральные коэффициенты отражения равны нулю для

всего спектра, кроме одной узкой спектральной полосы. Затем если ширина этой полосы уменьшается, то у этого воображаемого образца цвета коэффициент яркости приближается к нулю, в то время как координаты цветности остаются постоянными. Следует отметить, что все такие цвета должны иметь насыщенность по Манселлу, близкую к нулю, поскольку все они не должны отличаться

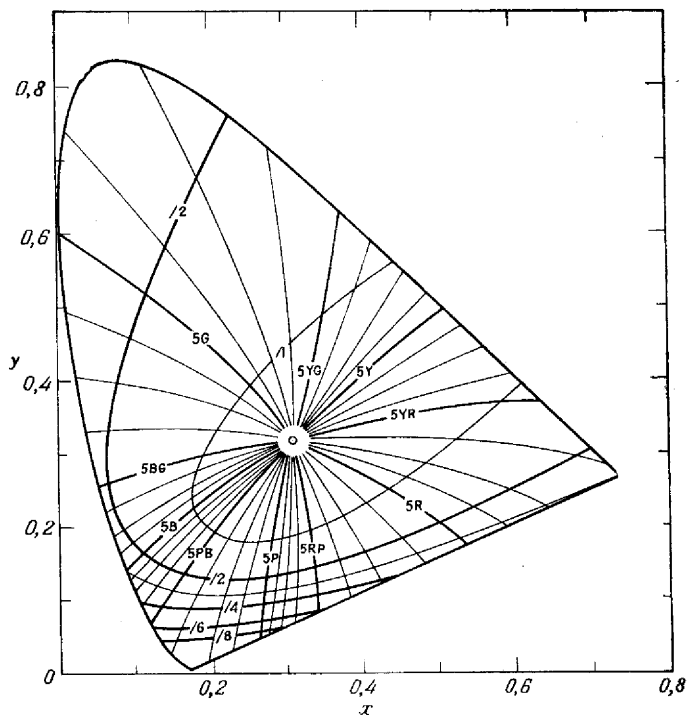


Рис. 2.63. Цветовой график x, y МКО 1931 г. с линиями цветового тона и насыщенности по Манселлу для значения светлоты по Манселлу 0,2/ [353].

от черного цвета. Таким образом, линия постоянной насыщенности при $/2, /1, /0,2$ или любой другой, достаточно малой, должна охватывать весь цветовой график для значения светлоты по Манселлу, приближающейся к предельному нулевому значению. Можно задаться вопросом о том, почему спектральный цвет нельзя отличить от эквивалентного темно-серого. Ответ состоит в том, что эти линии цветности относятся к наблюдению образцов цвета, расположенных на сером фоне (от средне-серого до белого) и слепящее действие относительно высокой яркости окружения не позволяет заметить даже больших различий в цветности между очень

темными образцами цвета. Шкалы насыщенности и светлоты по Манселлу являются выражением восприятия цветового пространства наблюдателем, глаза которого адаптированы к наблюдению объектов в обычных условиях. Для наблюдателя, адаптированного к темноте, линии насыщенности не должны, таким образом, расширяться с уменьшением светлоты по Манселлу.

На рис. 2.64 показаны пять вертикальных поперечных сечений цветового тела Манселла, построенных Никкерсон и Ньюхоллом [499]. На каждом поперечном сечении значения светлоты по Манселлу отложены вдоль вертикальной оси, соединяющей черный (внизу) и белый (вверху) цвета. Насыщенность по Манселлу увеличивается с расстоянием от черно-белой оси. Внутренняя граница представляет собой предел охвата смещения красок, вплоть до которого воспроизведены образцы цвета Манселла с матовой поверхностью. Внешняя граница представляет теоретический предел для цветовых стимулов предметов. Сравнение этих двух границ показывает, что для каждого цветового тона по Манселлу возможно улучшение цветового охвата. Кроме того, выражение в характеристиках светлоты и насыщенности по Манселлу позволяет оценить улучшение этого охвата с точки зрения потребителя.

За исключением одного цветового тона (10Y) в желтой области и одного (между 5P и 7,5P) в пурпурной, линии постоянного цветового тона по Манселлу на цветовых графиках x, y МКО 1931 г. являются кривыми. Кривизна этих линий отмечена в других экспериментальных работах [404, 555] и является хорошо установленной, по крайней мере качественно. Более тщательное сопоставление линий цветовых тонов при различных уровнях светлоты по Манселлу показало, что большинство линий не сохраняет своего положения на цветном графике [487]. Эффект изменения цветового тона для большинства цветовых стимулов в зависимости от яркости был отмечен давно и носит название явления Бецольда — Брюкке [45, 540]. Среди немногих исключений имеются все тот же цветовой тон 10Y и тон между 5P и 7,5P. Эти линии цветовых тонов сохраняют одно и то же положение на цветном графике при всех уровнях светлоты.

Цветовая карта ДИН. Цветовая карта ДИН, разработанная Рихтером и его сотрудниками [544, 546], является официальным немецким стандартом. Цветовое тело этой системы построено в соответствии с геометрической моделью, представленной на рис. 2.57, а. Каждый цвет определяется тремя характеристиками: цветовым тоном (цветовой тон по ДИН), насыщенностью (насыщенность по ДИН) и относительной светлотой (степень темноты по ДИН). Цвета одного цветового тона по ДИН имеют одинаковую доминирующую (или дополнительную) длину волны; другими словами, геометрическое место точек построенных цветовых тонов

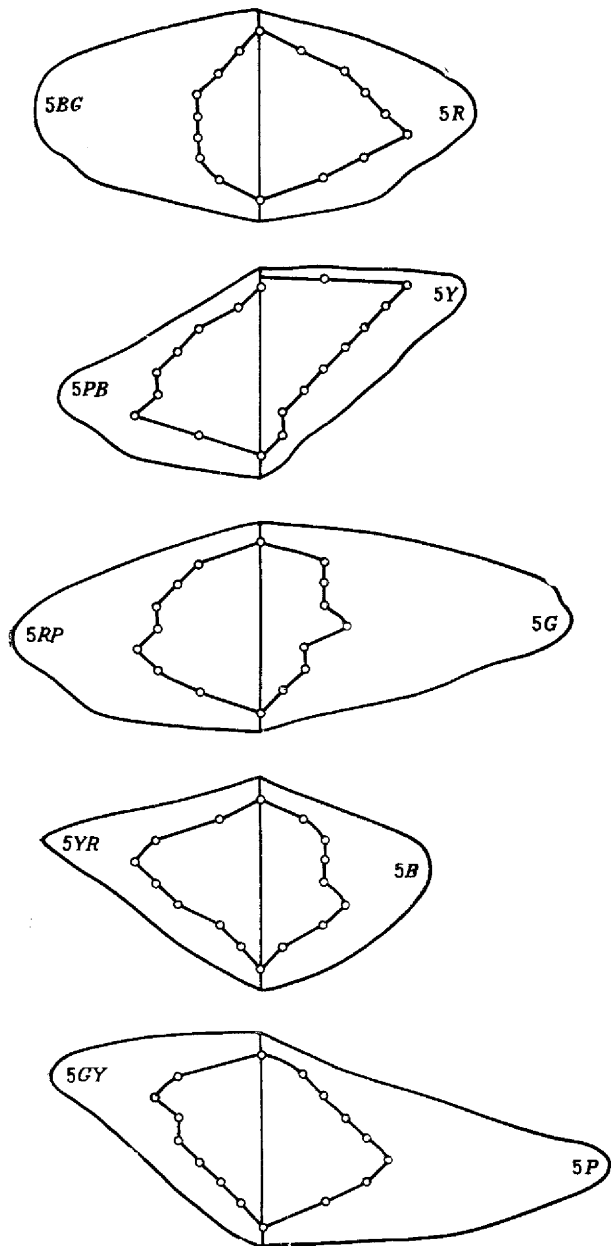


Рис. 2.64. Вертикальные сечения цветового тела Манселла.

Внутренняя граница представляет собой предел цветового охвата в атласе Манселла; внешняя граница показывает теоретический предел для цветовых стимулов предметов [499].

по ДИН на цветовом графике МКО представляет собой прямые, исходящие из нейтральной точки (стандартное излучение С МКО) (рис. 2.65). Цветовой круг разделен на 24 ступени с одинаковым различием цветового тона по ДИН. Геометрическим местом точек

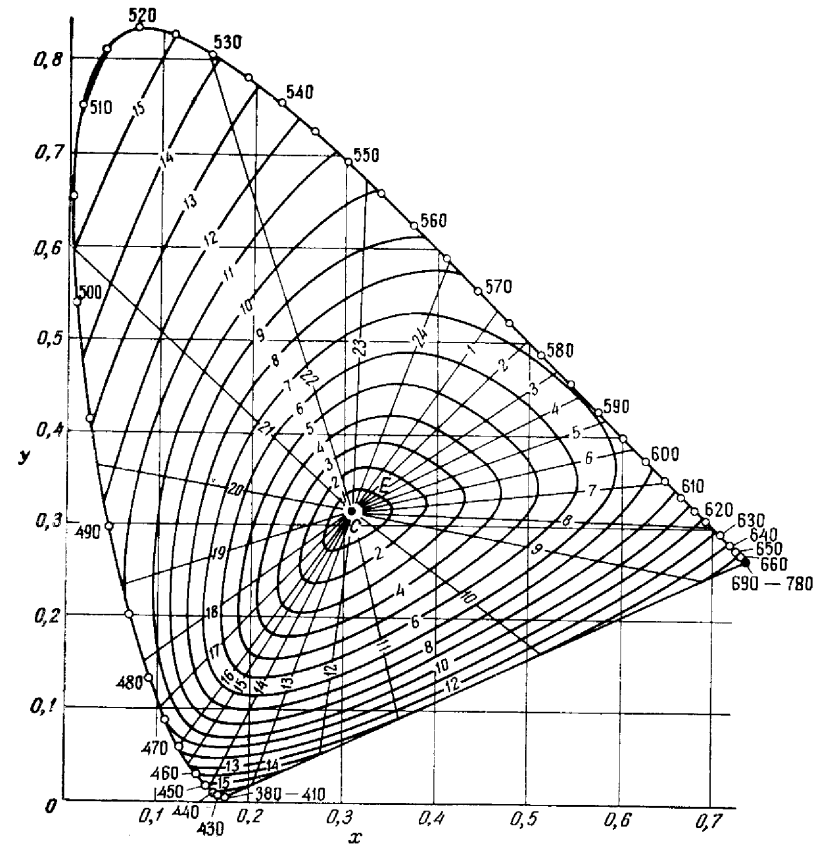


Рис. 2.65. Цветовой график x, y МКО 1931 г., представляющий прямые цветовых тонов по ДИН и овальные линии насыщенности по ДИН. Данная совокупность линий действительна для всех значений степени темноты по ДИН [546].

постоянной насыщенности по ДИН являются concentрические замкнутые кривые с центром в нейтральной точке. Для всех уровней светлоты линии одинаковой насыщенности остаются неизменными. Степень темноты по ДИН определяется логарифмической зависимостью от относительной светлоты $h = Y/Y_0$, где Y — коэффициент яркости образца, а Y_0 — коэффициент яркости оптималь-

ного цветового стимула, имеющего ту же цветность, что и образец. Постоянное значение степени темноты соответствует постоянной относительной светлоте h , а не воспринимаемой светлоте [722]. Считают, что введение относительной светлоты (вместо абсолютной) обеспечивает контуру цветового тона по ДИН психологически уравновешенное восприятие. Поэтому неудивительно, что линии постоянной насыщенности по ДИН не соответствуют линиям постоянной насыщенности по Манселлу. В действительности соотношение между этими двумя системами довольно сложное [379].

Первоначально цветовая карта ДИН была выполнена в виде ряда желатиновых светофильтров, однако сравнительно недавно были изготовлены отражающие образцы. Они представляют собой накраски на бумаге прямоугольной формы с матовой поверхностью и размером приблизительно $2,3 \times 2,8$ см. Образцы с одинаковым цветовым тоном по ДИН помещены на отдельном листе. Всего имеется 24 таких листа (по одному на каждый цветовой тон). На листе образцы располагаются от светлых в верхней части листа до темных в нижней части с равным интервалом по степени темноты (D от 1 до 8). Цвет образцов меняется от близких к ахроматическим ($S = 1$) в левой части каждого листа до насыщенных в правой части с равным интервалом по насыщенности вплоть до границы охвата используемых пигментов. Образцы вставляются в небольшие прорезы на листе и могут легко выниматься для проведения цветовых сравнений. Для каждого образца даны обозначения в системе ДИН и координаты x , y , Y относительно стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. и стандартного излучения С. Кроме того, приведены значения доминирующей (или дополнительной) длины волны и чистоты, а также обозначения в системе Манселла [82] и Оствальда [548].

Шведская система естественных цветов. Эта система является примером системы восприятия цвета, основанной на шести психологически уникальных восприятиях черного, белого, красного, зеленого, желтого, синего цветов [216]. Геометрическая модель, относящаяся к такой системе описания цветовых восприятий, показана на рис. 2.57, в.

Честь разработки основы этой модели цветового восприятия принадлежит немецкому физиологу Герингу (вторая половина XIX в.). свое дальнейшее развитие она получила в работах шведского физика Иоганссона (первая половина XX в.). В Шведском центре по цвету под руководством Харда была проделана работа по практическому воплощению идей о систематизации цветовых восприятий Геринга — Иоганссона в виде атласа цветов.

Основной задачей этой системы является описание качества цветового восприятия; однородно воспринимаемое цветовое пространство, которому уделяется большое внимание, например, в си-

стеме Манселла, здесь рассматривается во вторую очередь. Соответствующие качественные характеристики цветового восприятия являются психологически уникальные восприятия черного, белого, красного, зеленого, желтого, синего цветов. Данное цветовое восприятие может быть определено оценкой их сходства с основными (иногда называемыми *элементарными*) восприятиями, а не оценкой отличия от них. Это сходство выражается степенью белизны, черноты, желтизны, красноты, синевы и зелени.

По-видимому, между степенями белизны, черноты, желтизны и т. д., приведенными в качестве примера в *Шведской системе естественных цветов*, и характеристиками цветового восприятия (цветовой тон, насыщенность и светлота), приведенными в системе Манселла, имеется функциональная зависимость. Однако их взаимосвязь еще не полностью понята, и требуется дальнейшее изучение данного вопроса. Это станет возможным, когда будет издан цветовой атлас, основанный на *Шведской системе естественных цветов*.

Правильная ромбоэдрическая решетка в качестве цветового пространства. Если при построении системы восприятия цвета основная цель состоит в том, чтобы получить равноконтрастное расположение цветов, то следует искать структуру, в которой не используются шкалы цветового тона или насыщенности, такие, как в системе Манселла или цветовой карте ДИН. Использование таких шкал неизбежно приведет к полярной системе координат, в которой, как это было видно из рис. 2.59, вблизи ахроматической оси расположено больше образцов, чем вдали от нее. Шкалы цветового тона и насыщенности являются равноконтрастными, но интервалы между соседними цветами увеличиваются по мере удаления цветов от серого цвета.

В этом плане непригодна и система координат, полностью основанная на психологически основанных восприятиях, как в *Шведской системе естественных цветов*. В ней расстояния между двумя соседними цветами не являются одинаковыми. Например, если принять различие между основным желтым и основным красным за 10 равных ступеней цветового тона, поддерживая постоянными яркость и насыщенность, то различие между основным красным и основным синим будет находиться в пределах 20—50 ступеней того же размера. Истинное число требуемых ступеней зависит от уровня яркости и насыщенности, поддерживаемых постоянными во время эксперимента.

Для того чтобы построить систему восприятия цвета с одинаково равномерным расположением цветов во всех областях цветового пространства, следует обратиться к пространственным решеткам. Наиболее подходящей для этой цели является *правильная ромбоэдрическая решетка*. Рассмотрим ее структуру.

Если сферы равного диаметра плотно уложить на плоскости, то их центры образуют непрерывную триангулярную последовательность точек. Каждая точка окружена шестью равноудаленными точками, образующими вершины правильного шестиугольника. Сверху этих сфер, центры которых образуют этот шестиугольник, можно аккуратно уложить еще три другие сферы в каждом из двух положений, отличающихся одно от другого поворотом на 60° относительно вертикальной оси, проходящей через центр шестиугольника. Добавляя сферы в том или другом положении, можно уложить второй слой сфер на первый. Центры сфер этого второго слоя образуют однородную триангулярную последовательность точек с тем же расстоянием между ними, как в первом слое. Аналогичным способом можно добавить третий слой, однако в зависимости от выбора его положения в структуре могут быть различия. Мы можем выбрать такое положение, в котором каждая сфера третьего слоя находится точно над сферой первого слоя, либо можно выбрать другое положение. Если каждый следующий слой шестиугольной последовательности точно повторяет предыдущий, то такая упаковка называется двухслойной. Когда каждый третий слой повторяет первый, упаковка называется трехслойной. При этой упаковке центры сфер точно совпадают с узлами правильной ромбоэдрической решетки. Такая решетка может быть получена последовательным сдвигом правильного ромбоэдра таким образом, чтобы только четыре из восьми углов дали новые узлы решетки. Кратчайшее расстояние между двумя соседними точками называется минимальным расстоянием решетки и является ее характеристическим параметром. Среди всех пространственных решеток с тем же минимальным расстоянием правильная ромбоэдрическая решетка имеет максимальную плотность. Это значит, что в пределах достаточно широкой последовательности такая решетка содержит очень большое число узлов. Каждый узел решетки окружен 12 ближайшими соседними узлами, равноудаленными от него (рис. 2.66). Многогранник, образованный 12 узлами, называется кубическим октаэдром, поскольку его можно получить отсечением восьми углов куба посередине каждого из 12 ребер.

Заполнение цветового пространства в соответствии с правильной ромбоэдрической решеткой имеет преимущество не только потому, что получается наиболее правильная последовательность цветов, но и потому, что она обеспечивает самое плотное их расположение. Более того, такую решетку можно разделить на семь различных групп параллельных плоскостей. Четыре группы содержат плоские решетки, образованные равносторонними треугольниками, соответствующими самой плотной упаковке окружностей на плоскости. Три остальные представляют собой плоские решетки, образованные квадратами [713].

Разработку набора образцов цвета, смоделированных на основе максимально возможного соответствия порядку правильной ромбоэдрической решетки, можно проводить в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.67. В качестве исходного цвета выбирается средне-серый (N), такой, как $N5/$ Манселла. Это довольно

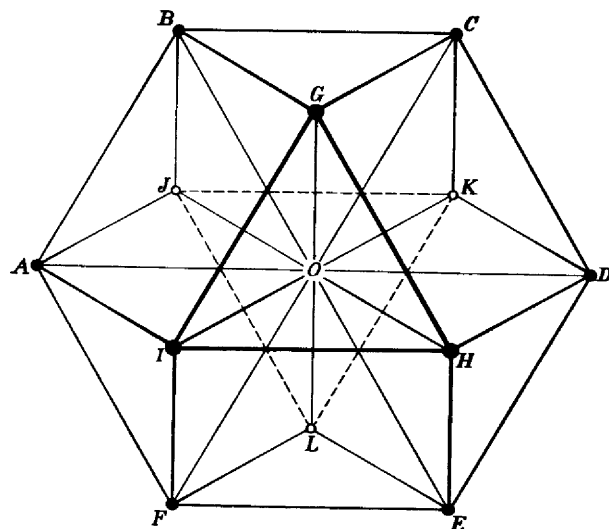


Рис. 2.66. Двенадцать ближайших соседних точек правильной ромбоэдрической решетки, окружающих точку O и отстоящих от нее на равные расстояния.

Многогранник, образованный 12-ю узлами (от A до L), называется кубическим октаэдром.

просто. Затем выбирается желтый цвет той же светлоты, что и серый, и отличающийся от него на определенную величину, например на две ступени насыщенности по Манселлу. Это чуть сложнее, так как затрагивает оценку равенства по светлоте двух цветов разной цветности. Однако можно воспользоваться атласом Манселла, в котором имеются ряды цветов равной светлоты, и выбрать соответствующий с обозначением по Манселлу, например $5Y 5/2$. Эти шаги представлены на рис. 2.67, $a, б$. Затем выбирается цвет той же светлоты, что и первые два, но красновато-желтого цветового тона. Это еще сложнее, так как включает оценку относительной величины различий в двух разных цветовых направлениях, однако и это может быть сделано с некоторой точностью [726, 734]. Таким образом, мы получаем цвет YR (рис. 2.67, $в$).

На следующем этапе r мы получаем красный цвет R , равным образом сопоставимый с нейтральным серым N и с цветом YR . Это продолжается до тех пор, пока мы не подходим к зеленому

цвету G (рис. 2.67, *ж*). В этой точке может возникнуть геометрическая трудность, связанная с цветовым восприятием.

Цвет G должен быть выбран таким образом, чтобы в равной степени отличался от серого N и синеватого цвета B . Вместе с тем мы рассчитываем, что он в такой же мере отличается и от желтоватого цвета Y . Однако эксперименты, проведенные до сих пор, показывают, что обычно это не осуществляется. Величина цветового

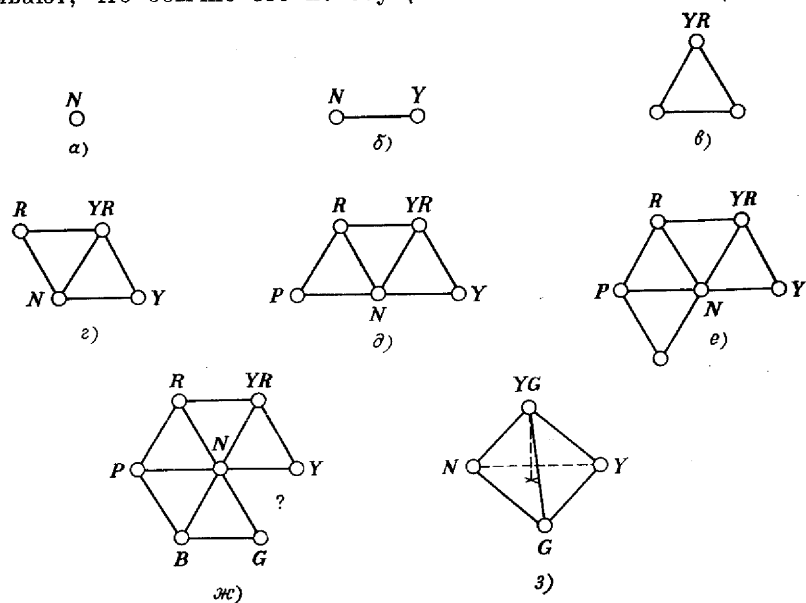


Рис. 2.67. Последовательность составления набора образцов, построенного в соответствии с правильной ромбоэдрической решеткой.

различия YG кажется большей, чем остальные цветовые различия (NY , NR , PB , BG), оцененные как одинаковые. Это доказывает, что геометрия пространства цветового восприятия является неэвклидовой [602]. В пространстве цветового восприятия отношение длин окружности круга цветового тона к ее диаметру больше, чем $\pi = 3,14\dots$ Таким образом, видно, что нелегко создать набор образцов цвета, в котором бы цветовые различия между ближайшими образцами воспринимались одинаково.

Вероятнее всего такой идеальный набор образцов нельзя воспроизвести. Однако возможно достичь гораздо лучшего к нему приближения, чем это было показано выше. Итак, оставляя в стороне желание уклониться от римановой геометрии и искривленного пространства, поступаем следующим образом. Каждый из интервалов BG , BP , PR и т. д. должен быть несколько удлинен, чтобы все они оказались равными интервалу GY . Поэтому они

становятся чуть больше, чем радиальные расстояния NR , NP , NY и т. д. Таким методом рассматривается весь охват цветов данной светлоты, воспроизводимых пигментами, имеющимися в нашем распоряжении. Теперь мы подошли к этапу $З$. Мы должны выбрать цвет более светлый, чем предыдущие цвета, но в равной степени контрастный по отношению к цветам N , Y и G . Эти цвета расположены в вершинах правильного тетраэдра. Затем следует подобрать более светлый образец, равно отличающийся от N , P и B (этап $и$). Аналогично определяется цвет, одинаково отличающийся от цветов N , R и YR (этап $к$). Таким образом, чередующиеся треугольники основного слоя служат для подбора цветов следующего слоя. В соответствии со строением правильной ромбоэдрической решетки треугольники основного слоя, не используемые для определения светлых цветов, должны служить для выбора более темных цветов. Распространяя этот процесс дальше, весь охват пигментов, имеющихся в нашем распоряжении, может быть представлен образцами, расположенными приблизительно равномерно. Это относится ко всему охвату, за исключением внешней оболочки толщиной менее одного интервала.

В продаже еще нет наборов цвета, созданных на основе правильной ромбоэдрической решетки, однако некоторые успехи в этом направлении уже сделаны Комитетом по равноконтрастным цветовым шкалам Американского оптического общества [341]. В 1973 г. решение этого вопроса находилось в следующем состоянии: считалось, что комитет нашел удовлетворительное приближение к набору образцов, основанному на правильной ромбоэдрической решетке, и что были предприняты усилия по изготовлению накрасок, иллюстрирующих последовательность цветов в решетке. Предполагается, что в ближайшее время Американское оптическое общество сделает все возможное, чтобы наборы таких образцов были выпущены в продажу.

Дискуссии относительно достоинств различных наборов образцов цвета для разных целей растянулись на годы. Примерно вплоть до 1940 г. эти дискуссии были резкие и содержали несправедливые выпады. Со временем они стали более сдержанными, так как в общем было признано, что различные наборы образцов служат различным целям и в значительной степени дополняют друг друга. Эти наборы являются важным средством при решении многих цветовых проблем. Каждый может их купить, важно лишь знать, для какой цели их использовать.

ДВУМЕРНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ ШКАЛЫ

Каждая отдельная карта из рассмотренных выше цветовых атласов, пособий и систем представляет собой двумерную последовательность цветов. Иногда одна карта предназначена для огра-

ниченной цели и используется отдельно. Например, многие карты постоянного цветового тона из атласа Манселла для таких целей продаются по отдельности.

В качестве другого примера можно привести фотометрическую карту Манселла для оценки коэффициентов яркости (отражения) цветовых стимулов предметов. Эта карта разработана как средство определения степени изменения коэффициента яркости образца цвета, которое можно ожидать при смене освещения.

В общей сложности имеется 156 образцов цвета с матовой поверхностью, расположенных по краям 11 карт. Одна из карт представляет 16-ступенчатую серую шкалу и 10 шкал, показывающих малонасыщенные и высоконасыщенные цвета 10 основных цветовых тонов по Манвеллу (от $5R$ до $5RP$) для светлот от $3'$ до $9'$.

Для каждого образца представлены коэффициенты яркости (называемые *коэффициентами отражения*) для стандартных излучений МКО А и С и нестандартного излучения S , предназначенного для моделирования света ясного синего неба.

ОДНОМЕРНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ ШКАЛЫ

Известны многочисленные методы испытаний, аналогичные методу определения неизвестной концентрации путем сравнения раствора неизвестной концентрации с серией тщательно приготовленных стандартных растворов. При таком сравнении цвет неизвестных веществ проявляет одномерное изменение в зависимости от концентрации. Неизвестная концентрация определяется непосредственно сличением с одним из образцов такой серии стандартных растворов или нахождением промежуточного положения цвета данного раствора между двумя стандартными. Часто говорят, что такая серия стандартных образцов образует цветовую шкалу. Идеальным веществом для изготовления стандартных образцов является вещество, концентрацию которого в дальнейшем предполагается определять по данной шкале. Таким образом гарантируется не только возможность установления точного цветового равенства в некоторой точке вдоль шкалы, но и спектральное равенство, так что смена излучения или переход от одного наблюдателя к другому не будут оказывать существенного влияния на оценку цветового равенства.

Однако, если цвет неизвестного вещества изменяется со временем, необходимо попытаться продублировать желаемые цвета в виде более стойкой среды. Так как кровь быстро обесцвечивается при взаимодействии с кислородом, то цветовые шкалы гемоглобина, представляющие образцы крови на фильтровальной бумаге, следует воспроизвести в другой среде, например на краске. Наиболее часто для цветовых шкал используют стекло, вследствие его высокой стабильности. Почти в каждом случае допускается неко-

торая степень метамеризма, поскольку спектральные характеристики стойких красителей, вводимых в стандартный образец, лишь в редких случаях соответствуют характеристикам неизвестного неустойчивого вещества. Также редки случаи, чтобы задача точного согласования цвета решалась для любого стандартного источника света и наблюдателя.

Наблюдателю трудно, а подчас и невозможно, установить цветовое равенство. В его задачу входит определение места неизвестного цвета на данной шкале, однако часто ему будет казаться, что этот цвет не соответствует ни одному из стандартных цветов или не может занять промежуточного положения между ними. Кроме того, определенную роль играют понятия, которыми оперирует наблюдатель, оценивающий эти цветовые различия. Наблюдатель видит, что два освещенных поля компаратора различаются по цвету. Если он должен оценивать цветовое различие, пользуясь общепринятыми терминами цветового тона, яркости и насыщенности, то он может оценить положение неизвестного цвета по шкале, воспроизводящей тот же цветовой тон, ту же яркость или насыщенность, либо он может попробовать определить место неизвестного цвета на шкале по его цветности. Оценка базируется на том критерии соответствия, который используется наблюдателем и зависит от его психологического настроения и в той степени, которую трудно определить. Несмотря на эти недостатки, хорошая цветовая шкала весьма полезна с точки зрения экономии времени до тех пор, пока ее не пытаются приспособить для решения многомерных проблем. Можно предположить, что оценка положения цвета на шкале, согласно равенству по светлоте, соответствуют коэффициенту пропускания светопропускающего образца или коэффициенту яркости светорассеивающего (в зависимости от условий).

Имеется также возможность достаточно точного предсказания результатов оценок, сделанных на основе равенства по цветовому тону, насыщенности или по цветности. Ниже обсуждается основа таких предположений. Однако если цвета шкалы значительно изменяются как по светлоте, так и по цветности, а наблюдатель дает результаты на основе ближайшего цветового равенства, то нет надежного пути предсказания результата.

Одномерные цветовые шкалы могут быть однозначно определены в системе МКО. Осборном и Кенионом были составлены подробные инструкции по этому вопросу [515].

Возможно, что наиболее широко использующимися одномерными цветовыми шкалами являются шкалы цветовых температур или коррелированных цветовых температур для классификации источников света. Об этом уже упоминалось в предыдущем разделе, достаточно вспомнить рис. 2.24—2.26.

Стекла Ловибонда, обсуждавшиеся выше в связи с тинтометром Ловибонда (рис. 2.37), использовались главным образом для

сортировки растительных масел в США. Изучив спектры пропускания характерных образцов очищенных хлопкового, кунжутного, соевого, кукурузного, сурепкового, оливкового масел, а также масла из земляных орехов, Мак Николас показал, что их цвет определяется соотношением двух групп красящих веществ, присутствующих в растениях [434]. Это группа коричневых и зеленых (составляющих хлорофилл) пигментов. Для торговых целей цвета этих масел обозначаются числом, соответствующим количеству единиц красного стекла Ловибонда, которые в сочетании с 35-м желтым

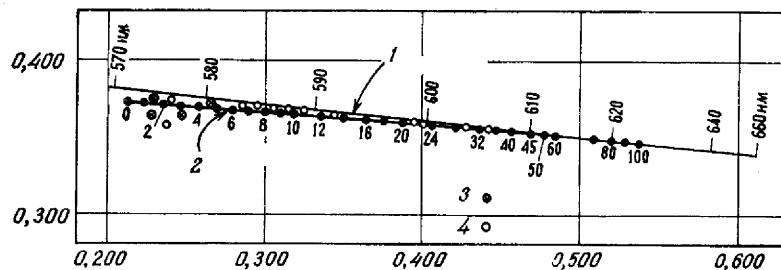


Рис. 2.68. Часть равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г., на котором представлены цветности (u , v) некоторых типичных растительных масел по сравнению с цветностями комбинаций стекол Ловибонда, используемых для их сортировки.

1 — линия спектральных цветностей; 2 — линия цветности стекол Ловибонда 35Y и R; 3 — хлопковые масла; 4 — другие растительные масла.

стеклом Ловибонда показывают цветовое равенство со слоем масла толщиной в 13,3 см. Спектры пропускания комбинаций стекол Ловибонда и масел различны. Это означает, что, в лучшем случае, комбинации стекол Ловибонда обеспечивают только метамерные равенства с маслами. Поэтому для сравнения необходим стандартный источник света, однако некоторое различие в оценках, получаемое при сортировке масел этим способом, будет обусловлено индивидуальными особенностями зрения наблюдателей. Так как эти масла содержат две основные группы пигментов, можно предположить, что одномерная цветовая шкала, подобная комбинациям 35-го желтого стекла с красным, не будет обеспечивать идеального цветового равенства. При нанесении на цветовой график координат цветности, рассчитанных по кривым спектрального пропускания, выяснилось, что точки цветности масел не лежат на одной прямой, а разбросаны на некотором участке плоскости (рис. 2.68). В связи с этим возникает проблема, какому же сорту по шкале Ловибонда соответствует данное масло. Согласно Мак Николасу, этот вопрос можно решить, определяя ближайшее равенство по цветности и используя равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г., к обсуждению которого мы приступим позже. Из точки

цветности масла следует восстановить перпендикуляр к линии цветностей сочетаний стекол Ловибонда 35Y и R. В точке пересечения этого перпендикуляра с линией цветности стекол Ловибонда находится тот образец шкалы Ловибонда, который обеспечивает ближайшее равенство по цветности с маслом. Несмотря на эти трудности, данный метод годится для определения качества и спроса на растительные масла, он используется уже в течение нескольких десятилетий. Однако из-за трудностей и неудобств, связанных, в частности, с закупкой стандартных стекол за границей, для сортировки масел был предложен другой метод [656]. В 1950 г. экспериментально был введен спектрофотометрический метод, который основан на измерении коэффициентов пропускания в четырех длинах волн (460, 550, 620 и 670 нм) при помощи спектрофотометра «Колеман юниор». Вместе с тем цветовая шкала Ловибонда (35Y и R) настолько глубоко укоренилась при покупке и продаже растительных масел, что упомянутый спектрофотометрический метод был выбран для того, чтобы обеспечить по возможности лучшее соответствие с результатами по шкале Ловибонда.

Цвет смазочных масел и нефти определяется сравнением с 16 стеклянными стандартными образцами, разработанными фирмой «Хеллинг» в соответствии со спецификациями, упомянутыми в [351]. Этот метод принят Американским обществом по испытанию и материалам, как ASTM D 1500-64 (1968). Неочищенная нефть имеет черный цвет, она почти непрозрачная, однако по мере очистки цвет нефти меняется от красновато-черного, темно красновато-коричневого, коричневатого-оранжевого, оранжевого, темного, бледно зеленовато-желтого до кристально прозрачного оттенка. Покупатель частично очищенной нефти может достаточно четко судить по ее цвету о стоимости ее очистки до такой степени, которая будет соответствовать его требованиям. Он чувствует себя обманутым (и не без основания), если поставляемая нефть по цвету темнее представленной в качестве образца. Таким образом, колориметр ASTM (ASTM D 1500-64 (1968)) с 16 стеклянными стандартными образцами цвета играет важную роль при покупке и продаже нефтепродуктов.

На рис. 2.69 представлена линия цветности 16 стеклянных стандартных образцов цвета ASTM, обозначенных числами 1,0; 1,5; 2,0; . . . , 8,0. Считается, что визуально воспринимаемые различия между этими цветами одинаковы.

В течение многих десятилетий каучуковая смола также сортируется по цвету. Вплоть до 1914 г. стандартные образцы цвета изготавливались из самой смолы, несмотря на относительное непостоянство ее цвета. С 1914 по 1936 г. использовались стандартные образцы, составленные из комбинаций стекол Ловибонда. Брайсом описан метод выбора 12 официальных стандартных образцов

на основе двух сортов окрашенного и одного слоя бесцветного стекла, склеенных при помощи канадского бальзама [61]. Различным комбинациям этих стекол были присвоены буквенные индексы, обозначающие сорта смолы, определяемые с их помощью. Этот набор узаконен на основе акта о снабжении ВМС США. Склеиваемая поверхность бесцветного стекла в каждой комбинации

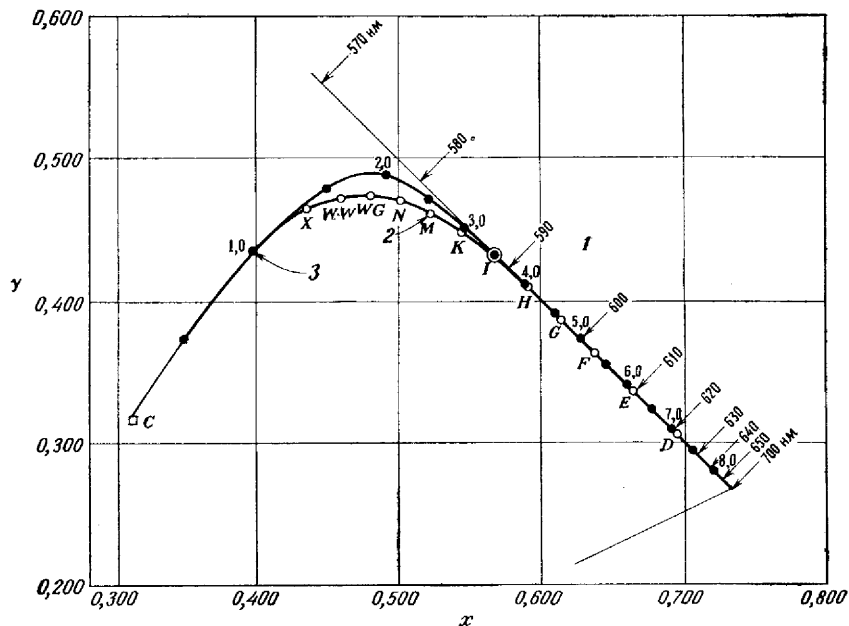


Рис. 2.69. Часть цветового графика x, y МКО 1931 г., на котором представлены цветности 16 цветных стандартных стекол ASTM (точки от 1,0 до 8,0), используемые для сортировки нефтепродуктов, и цветности 12 стандартных цветов США для смолы (кружочки X, WW, WG, N, M, K, ..., D).

1 — линия спектральных цветностей; 2 — стандарты США для смолы; 3 — стандарты ASTM для нефтепродуктов.

слегка матирована, чтобы воспроизвести некоторую мутность, характерную для расплавленных смол, обычно содержащих мелкие примеси. Цветности этих стекол представлены на рис. 2.69. Следует указать, что они находятся в тех же пределах по цветности, что и цветовая шкала ASTM. Как и для цветовой шкалы ASTM, расположение цветностей было выверено с помощью равноконтрастного цветового графика так, чтобы был равномерный переход от малых интервалов для желтых смол до интервалов приблизительно в четыре раза больших для красновато-оранжевых смол.

Вместо буквенного обозначения (X, WW, WG, N, M, K, ..., E, D) для различных сортов смол иногда используют названия. Высший сорт (X) называется «сверхбелым», низший сорт называется Долли, иногда носит наименование Дилли.

Имеются еще другие многочисленные одномерные цветовые шкалы, предназначенные для специальных целей сортировки [436]. Среди них имеются стандартные образцы цвета из стекла для классификации сахара [62] и лаков [175], а также цветные растворы неорганических солей для определения цвета жиров животного происхождения [662].

В многочисленных химических анализах конечным продуктом реакции является цветной раствор. Наиболее важное значение для промышленности имеет метод определения кислотности или щелочности (рН) раствора с помощью красителя, служащего индикатором. С этой целью широко используются стеклянные стандартные образцы цвета вместе с 18 индикаторами, охватывающие диапазон рН от 0,2 до 13,6 и выпускаемые фирмой «Хеллиг». Кроме таких химических анализов, имеется несколько тестов, важных с точки зрения торговли, которые требуют использования одномерной цветовой шкалы, составленной на основе светоотражающих образцов.

Классическим примером такой шкалы является шкала Рингельманна для классификации плотности дыма, выходящего из дымовых труб. Она состоит из четырех прямоугольных черных образцов, размером 14×21 см, используемых в качестве цветового стандарта. При наблюдении с расстояния в 15 м они соответствуют 20, 40, 60 и 80% содержания черного цвета соответственно.

Целью данной книги не является представление исчерпывающего перечня одномерных цветовых шкал, используемых в настоящее время. Однако информацию о большинстве существующих одно-, двух- и трехмерных цветовых шкал можно получить в Межотраслевом совете по цвету, подкомитет которого по проблеме № 7 готовит новый список Американских спецификаций по цвету. Последний такой перечень датируется 1955 г. [292].

НЕСИСТЕМНЫЙ И НЕПОЛНЫЙ ВЫБОР ОБРАЗЦОВ ЦВЕТОВОГО ТЕЛА

Имеются тысячи наборов образцов тканей, красок, пластмасс и других материалов, в которых выбор цветов ни в коей мере не связан с их распределением в цветовом теле. Эти наборы представляют материалы тех цветов, которые собирается продавать изготовитель, либо тех, которые он уже подготовил и может предложить немедленно. Это могут быть цвета для особых целей и т. д.

Ежегодно появляются сотни таких наборов. Государственные агентства сами постоянно разрабатывают и выпускают новые наборы стандартных образцов цвета в связи с закупкой необходимых товаров и материалов, требуемых для выполнения их заказов.

Некоторые из наиболее важных и постоянно выпускаемых наборов таких стандартов цвета описаны ниже.

Типичными примерами являются *Федеральная цветовая карта красок* в США (Федеральная спецификация TT-C-595) и *Стандартные цвета красок*, выпускаемые Канадским государственным управлением по спецификациям (I-GP-12C, 1965).

Федеральная цветовая карта красок, выпущенная в 1956 г., представляет собой набор 358 красок, размером $7,6 \times 12,7$ см, помещенных в отдельные конверты. Каждый образец определен пятизначным числом и координатами x , y , Y в системе МКО 1931 г. Для справочных целей используют близкие по цвету образцы меньшего размера ($1,3 \times 1,9$ см), наклеенные на листы бумаги, скрепленные разъемным держателем так, что каждый отдельный лист по желанию может быть вынут. Все образцы разделены на глянцевые, полуглянцевые и матовые.

Канадские стандартные цвета красок представлены 692 красками размером $7,6 \times 12,7$ см, помещенными в отдельные конверты, и определены шестизначным числом. Цвета разделены на 6 групп в зависимости от области применения: материалы для внутренней окраски (414 цветов), масляные краски для наружной окраски домов (26 цветов), эмали для окраски полов и балконов (9 цветов), латекс для наружных работ (26 цветов), цвета для идентификации кодов и отделки промышленных изделий (212 шт) и флуоресцентные цвета (5 шт). Многие цвета представлены образцами с разной поверхностью: глянцевой, полуглянцевой и матовой. Для всех образцов определены координаты x , y , Y в системе МКО 1931 г. при стандартном излучении С. Для справочных целей используют образцы размером $2,5 \times 1,6$ см, наклеенные на отдельные листы бумаги, скрепленные разъемным держателем. Образцы представлены по порядку в соответствии с делением цветов на 6 групп.

Различные наборы цветов можно получить у фирмы «Манселл калор». Для обозначения опасности и идентификации оборудования в соответствии с Американским национальным стандартом Z53.1 — 1967 выпущен набор, состоящий из 8 стандартных образцов красок, воспроизводящих *стандартные сигнальные цвета США*. Образцы представляют красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, пурпурный, черный и белый цвета. Поверхность покрытий глянцевая, размер образцов $7,6 \times 7,6$ см.

В течение многих лет электронной промышленностью и государственными агентствами используются *цветовые карты Манселла* для кодирования цвета проводов и изоляции кабелей. Они

приняты Ассоциацией предприятий электронной промышленности (EIA) в качестве стандартных цветов для электронных компонент (стандарт STD RS-359). Стандартизованы десять цветов: красный, оранжевый, коричневый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый, белый, серый и черный. Для каждого цвета изготовлена отдельная карта, показывающая номинальный (центральный) цвет и допустимые отклонения от него.

Цветовые карты Манселла для почв были разработаны при участии Службы мелиорации и сохранения почв США. Кроме классификации цвета различных почв, они используются для оценки цвета камней, археологических находок, меха животных и прочих природных материалов. Набор охватывает 190 образцов размером $1,3 \times 1,6$ см с матовой поверхностью, размещенных на 7 картах различных цветовых тонов по Манселлу (от 10R до 5Y). Для удобства сравнения между образцами сделаны прорези. Карты размером $10,7 \times 18,3$ см с образцами размером $1,2 \times 1,5$ см скрепляются при помощи разъемного держателя.

Подобный набор, содержащий 8 карт постоянных цветовых тонов с 280 образцами цвета, предлагается для классификации цвета кожи, волос и глаз.

Карта цвета камней изготовлена Комитетом по разработке карты цветов горных пород, представляющим Геологическое управление США, Американское геологическое общество, Американскую ассоциацию геологов-нефтяников, Общество прикладной геологии, Ассоциацию руководителей геологических изысканий в США. Ее можно приобрести в Национальном научно-исследовательском совете в Вашингтоне. Карта представляет 115 образцов цвета прямоугольной формы размером $1,3 \times 1,6$ см с почти матовой поверхностью. Цветам присвоены обозначения по системе Манселла и системе обозначения цвета ISCC — NBS, которая будет описана ниже. В карте представлены цвета почти всех видов камней, исключая очень редкие с высокой насыщенностью по Манселлу.

В текстильной промышленности, где наблюдается ожесточенная конкуренция, выбор цветов меняется почти ежегодно в соответствии с требованиями моды. Поэтому трудно сказать, какие стандартные образцы цвета используются при изготовлении и продаже тканей более чем одним изготовителем одновременно. Ассоциация по цвету США выпускает различные наборы карт стандартных цветов для текстильных изделий, некоторые из которых широко используются в текстильной и смежных отраслях. Таким образом, продукция различных фабрик может быть скоординирована по цвету. Карты стандартных цветов используются также при классификации цвета государственными агентствами и различными отраслями промышленности, не имеющими отношения к вопросам моды.

РАВНОКОНТРАСТНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ ШКАЛЫ

Воспринимаемая равноконтрастной трехмерная цветовая шкала явилась бы не только большим научным достижением, но и оказалась бы полезной с точки зрения торговли. Ее применение упростило бы определение цвета и установление цветовых допусков, внесло бы ясность в вопрос интерпретации одномерных цветовых шкал для идентификации несколько отличающихся цветов, служило бы руководством при изготовлении стандартных образцов цвета и оказала бы помощь в выборе гармоничных цветовых сочетаний. К сожалению, попытки создать такую шкалу до сих пор не привели к успеху. Скорее наоборот, они подтвердили предположение, что такую строго равноконтрастную трехмерную шкалу вообще невозможно создать. Однако эти попытки по крайней мере указывают на то, что возможны достаточно хорошие аппроксимации идеального равноконтрастного цветового пространства. Как уже упоминалось в предыдущем разделе, посвященном системам восприятия цвета, в этом направлении проводится много работ, имеющих практическое значение. В этом разделе будет продолжено обсуждение равноконтрастных цветовых шкал, причем особое внимание будет уделено выводу численных выражений для таких шкал.

РАВНОКОНТРАСТНЫЕ ШКАЛЫ СВЕЛОТЫ

Если наблюдателю предложить белый, черный и группу серых образцов цветов и попросить его выбрать из них такой, который в равной степени отличается и от белого, и от черного, он столкнется с небольшой трудностью, поскольку оценка относительной величины двух больших цветовых различий в конечном счете основана только на субъективном впечатлении. Это является частным случаем определения цветовых различий, который Ньюхолл назвал методом отношений цветовых различий; в данном случае отношение составляет 1 : 1 [484]. Однако нужный серый цвет можно определить, исходя из усредненной оценки нескольких наблюдателей, причем желаемая точность зависит только от количества наблюдателей и числа сделанных ими оценок. Затем цветовой интервал между черным и средне-серым можно поделить пополам, аналогично можно поступить с интервалом между белым и средне-серым цветами. Таким образом, диапазон от черного до белого образует равноконтрастную шкалу светлоты, состоящую из пяти равноудаленных по субъективному ощущению цветов. Это был один из методов, используемых для определения шкалы серых цветов по Манселлу [468].

Другой метод создания равноконтрастной шкалы светлоты (начиная с черного цвета) состоит в выборе чуть более светлого

серого цвета, затем чуть более светлого, чем этот выбранный цвет, и так до тех пор, пока мы не подойдем к белому или близкому к белому цвету.

Эти же два метода могут использоваться для установления равноконтрастной шкалы светлоты в интервале от любого светлого до любого темного цветов, при условии наличия образцов промежуточных цветов, незначительно отличающихся друг от друга. Результаты таких экспериментов можно сопоставить с помощью графика, откладывая по оси ординат число ступеней светлоты V от черного до данного серого цвета, а по оси абсцисс значение его коэффициента яркости Y . Кроме того, результаты можно представить в виде формулы, описывающей зависимость V от Y .

В первоначальной системе Манселла [339] для 10-ступенной шкалы ахроматических цветов от черного до белого использовалось выражение

$$V = Y^{1/2}, \quad (2.48)$$

где $0 \leq V \leq 10$, а $0 \leq Y \leq 100$. В этом уравнении, как и во всех остальных, представленных ниже, в соответствии с практикой современной колориметрии, коэффициент яркости Y изменяется от 0 до 100 (2.11—2.13). В первых публикациях вместо коэффициента яркости использовался коэффициент отражения, обозначаемый буквой R . Интервал изменения R от 0 до 1.

В последующих экспериментальных работах было показано, что формула квадратного корня (уравнение 2.48) наилучшим образом соответствует наблюдениям при белом фоне [181, 468]. Для уточнения формулы в нее следует включить коэффициент яркости фона, а также самих серых образцов. Для средне-серого фона с коэффициентом яркости $Y_{\phi} = 19,1$ хорошее согласие с экспериментальными данными дало выражение

$$V = (1,474Y - 0,00474Y^2)^{1/2}. \quad (2.49)$$

Последние исследования подкомитета Американского оптического общества, основанные на более точном измерении коэффициентов яркости образцов, представленных в атласе Манселла 1929 г. издания, показали, что уравнение (2.49) в свою очередь требует уточнения. Подкомитет рекомендует определять светлоту по Манселлу зависимостью Y от V в виде полинома пятой степени:

$$\frac{100Y}{Y_{MgO}} = 1,2219V - 0,23111V^2 + 0,23951V^3 - 00,021009V^4 + 0,0008404V^5. \quad (2.50)$$

Эта функция была использована Ньюхоллом для определения ренотации значения светлоты по Манселлу. Десятая ступень шкалы ($V = 10$) представлена совершенным отражающим рассеивате-

лем. Вместе с тем все значения Y этой шкалы получены по отношению к окиси магния (MgO), коэффициент яркости которой принимается за 100. С учетом того, что коэффициент яркости MgO в действительности $\sim 97,5$, коэффициент яркости идеального отражающего рассеивателя Y_0 принимает значение 102,57.

Считали, что уточненная шкала светлоты по Манселлу в соответствии с уравнением (2.50) лучше всего описывает результаты наблюдений при фоне от средне-серого до белого.

Полином пятой степени является достаточно сложным, и им трудно пользоваться. В связи с этим были предприняты попытки аппроксимировать его более простыми выражениями. В 1964 г. МКО была принята формула кубичного корня, предложенная Вышецким [724]. Формула имеет вид

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17; \quad (2.51)$$

она подобна формулам, ранее предложенным Лэддом и Пинни [383], а также Глассером и согр. [480]. Величины $W^*/10$ хорошо согласуются с ренотациями светлоты по Манселлу V (2.50) для значений коэффициентов яркости Y в диапазоне от 1 до 100.

Недавно комитетом по колориметрии МКО была предложена незначительная модификация функции W^* [732]. Она выражается как

$$L^* = 25 \left(\frac{100Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16. \quad (2.51a)$$

В это выражение был введен в явном виде коэффициент яркости белого цветового стимула Y_0 . В уравнении (2.51) подразумевалось, что Y_0 всегда должен быть равен 100. В уравнении (2.51a) Y_0 в большинстве случаев будет равен 100, поскольку совершенный отражающий рассеиватель включен в белый цветовой стимул. Постоянная 17 в (2.51) была заменена на 16 для того, чтобы приблизить значение L^* к 100, когда белый цветовой стимул включает в себя совершенный отражающий рассеиватель ($Y_0 = 100$).

В 1872 г. Плато впервые предложил использовать степенной закон для описания субъективных свойств ощущения, таких, как светлота, цветовой тон и насыщенность [538], однако более строгое обоснование этот степенной закон получил лишь в последние годы [372]. В нескольких экспериментальных работах было показано, что степенной закон пригоден не только для зрительных, но и для других субъективных шкал, предложенных для описания таких свойств ощущения, как громкость или тяжесть [624].

Шкала серых цветов в *Руководстве по цветовой гармонии* основана на законе Вебера, который формулируется следующим образом: чтобы одна половина фотометрического поля была едва заметнее другой половины, ее яркость должна быть больше на постоянную часть от заданной величины. Это приводит к логариф-

мической зависимости

$$\lg Y = \frac{4V-1}{20}, \quad (2.52)$$

где $V = 0$ соответствует не идеальному черному цвету ($Y = 0$), а хорошему черному пигменту ($Y = 0,89$), а $V = 10$ соответствует не идеальному отражающему рассеивателю ($Y = 100$), а хорошему белому пигменту ($Y = 89,1$). Считают, что это выражение наилучшим образом описывает шкалу светлоты, если наблюдатель, проводящий оценку малых различий, полностью адаптирован к промежуточной яркости двух серых цветов, определяющих ступень. В этом случае, когда наблюдатель рассматривает шкалу серых цветов *Руководства по цветовой гармонии*, расположенную на белом фоне, то он адаптируется к яркости самого светлого образца этой шкалы и будет воспринимать равномерно расположенными только несколько первых образцов близких к белому. При этих условиях наблюдения темно-серые цвета кажутся чрезмерно стесненными.

Серая шкала цветовой карты ДИН, рассмотренной выше, основана на модифицированной формуле Дельбоффа [544]

$$D = 10 - 6,1723 \lg \left(40,7 \frac{Y}{Y_{\text{опт}}} + 1 \right). \quad (2.53)$$

D называется степенью темноты по ДИН. Чтобы привести ее в соответствие с принятым нами определением V , следует положить $V = 10 - D$. Отношение $Y/Y_{\text{опт}} = h$ называется относительной «светлотой». В нем Y соответствует коэффициенту яркости образца, а $Y_{\text{опт}}$ — коэффициенту яркости соответствующего оптимального цвета, который в случае серых цветов создается совершенным отражающим рассеивателем, освещаемым стандартным излучением МКО С. Таким образом, $Y_{\text{опт}} = Y_0 = 100$. Предполагается, что наблюдатель является стандартным наблюдателем МКО 1931 г. Постоянные в уравнении (2.53) подобраны таким образом, чтобы соответствовать условиям наблюдения на светло-сером фоне при уровне яркости 250 кд·м⁻².

На рис. 2.70 представлены зависимости коэффициента яркости Y и показателя светлоты V , описываемые уравнениями (2.48—2.53). Между некоторыми из этих кривых имеются существенные различия. Это означает, что в шкалах светлоты, соответствующих этим кривым, образцы расположены по-разному. Например, коэффициент яркости средне-серого цвета ($V = 5$), согласно уравнению (2.52), соответствует коэффициенту яркости для третьей ступени шкалы светлоты по Манселлу ($V = 3$) согласно уравнению (2.48). Это в основном обусловлено отличиями в условиях наблюдения, при которых предполагается использовать различные шкалы светлоты. В частности, в качестве наиболее важного параметра,

влияющего на распределение шкалы светлоты, рассматривают коэффициент яркости фона. По существу, состояние адаптации глаз наблюдателя определяется фоном, в особенности когда образцы шкалы сравнительно малы.

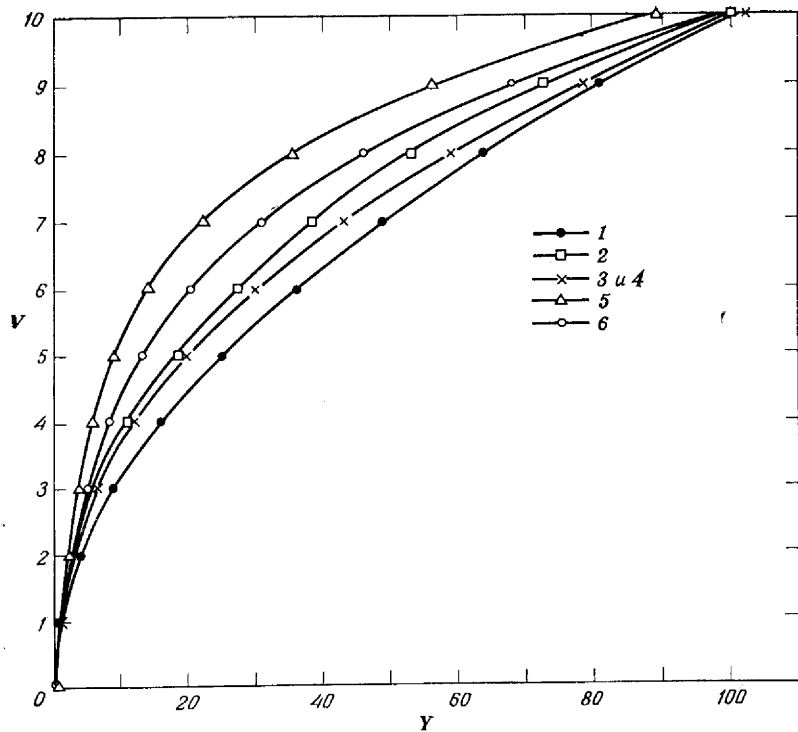


Рис. 2.70. Графики соотношений между значением шкалы светлоты V и коэффициентом яркости Y , полученных в соответствии с различными формулами. 1 — формула квадратного корня [уравнение (2.48)]; 2 — модифицированная формула квадратного корня [уравнение (2.49)]; 3 — формула ренотации светлоты по Манселлу, представляющая собой полином пятой степени [уравнение (2.50)]; 4 — формула кубического корня для показателя светлоты МКО 1964 г. W^* [уравнение (2.51)], $V = W^*/10$; 5 — серая шкала *Руководства по цветовой гармонии* [антилогарифм уравнения (2.52)]; 6 — серая шкала ДИН [уравнение (2.53)], $V = 10 - D$.

Исследования влияния состояния адаптации глаз наблюдателя на восприятие светлоты (и яркости) и равномерного распределения цветов в шкалах светлоты сделаны сравнительно недавно.

Наиболее значительными среди ранних работ являются исследования Адамса и Кобба [5], а также Джадда [38]. Однако только в последние годы возникла более ясная картина. Особый интерес представляют исследования Канэко [357], Такасаки [649] и Семельрофа [597, 598].

Канэко экспериментальным путем создал шкалы светлоты для черного, серого и белого фона и образцов разного размера [357]. Как и следовало ожидать, он обнаружил, что коэффициент яркости фона в значительной степени влияет на интервалы шкалы светлоты. Он также нашел, что влияние фона более заметно для образцов небольшого размера. Однако особый интерес представляют выводы Канэко, что серый фон усиливает чувствительность наблюдателя к различиям по светлоте серых образцов, коэффициент яркости которых приблизительно такой же, как и у фона. Это явление наблюдалось и раньше, например [5], но считалось, что оно относится только к очень малым различиям порядка пороговых. Экспериментальные данные Канэко показали, что это явление может наблюдаться и при относительно больших различиях по светлоте, таких, как различия между соседними образцами 10-ступенной шкалы светлоты от черного до белого.

Пытаясь описать свои экспериментальные результаты, Канэко вывел формулу для показателя светлоты, основанную на формуле Адамса и Кобба [5] и модифицированную Джаддом [325]. Формула Канэко объединяет два уравнения:

$$K = \frac{Y}{Y+a},$$

$$K = \frac{a^2 + Y_{\phi} a - (1-p) q Y_{\phi}}{pq(Y_{\phi} + a)}. \quad (2.54)$$

Здесь K обозначает показатель светлоты, а Y и Y_{ϕ} — коэффициенты яркости образца и фона соответственно. Параметр p обозначает размер образца, малые значения p соответствуют небольшим образцам. Параметр q обозначает уровень освещенности в плоскости поля наблюдения фона и образца. Параметр a обозначает состояние адаптации глаза наблюдателя. Уравнения (2.54) можно рассматривать как слишком сложные для практического использования, однако они учитывают, по крайней мере приблизительно, важные факторы, влияющие на восприятие светлоты и различий по светлоте серых образцов, рассматриваемых на сером фоне (от черного до белого).

Такасаки предложил своим наблюдателям оценить светлоту двух образцов в условиях, схематически представленных на рис. 2.71 [649]. Перед наблюдателем расположены два фона Φ_1 и Φ_2 с коэффициентами яркости $Y_{\phi 1}$ и $Y_{\phi 2}$ соответственно. В центре каждого фона располагаются серые образцы O_1 и O_2 с коэффициентами яркости Y_1 и Y_2 соответственно. Для любого данного образца O_1 и фона Φ_1 , расположенных слева, наблюдатель для данного фона Φ_2 справа должен подобрать образец O_2 такой же светлоты, как образец O_1 .

Типичные результаты этого эксперимента представлены на рис. 2.72, где по оси абсцисс расположены логарифмы коэффи-

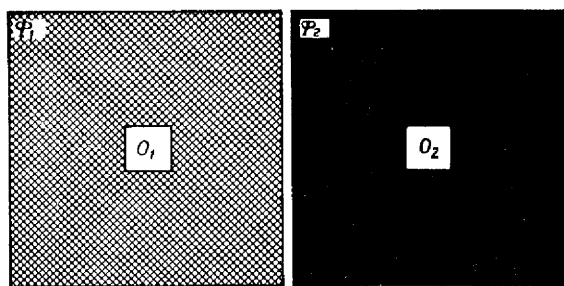


Рис. 2.71. Схема поля зрения, представленного наблюдателю в эксперименте Такасаки.

Φ_1 и Φ_2 — два серых фона с разными коэффициентами яркости; O_1 и O_2 — два серых образца. Наблюдателю предлагается уравнивать светлоту образцов O_1 и O_2 подбором образца O_2 с соответствующим коэффициентом яркости.

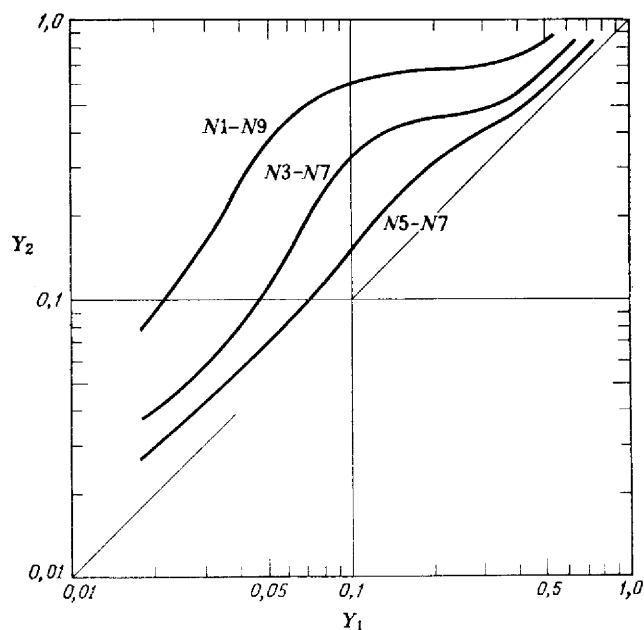


Рис. 2.72. Типичные результаты, полученные для наблюдателя, проводящего сравнение светлоты образцов по типу, представленному на рис. 2.71 [649]. Коэффициенты яркости Y_1 и Y_2 относятся к образцам O_1 и O_2 соответственно. Фоны Φ_1 и Φ_2 представляют собой серые образцы со значениями светлоты по Манселлу $N \dots /$. Представлены результаты для трех различных пар фонов ($\Phi_1 - \Phi_2$): ($N 1 / - N 9 /$); ($N 3 / - N 7 /$); ($N 5 / - N 7 /$).

коэффициентов яркости Y_1 образца O_1 , а по оси ординат — логарифмы коэффициентов яркости Y_2 образца O_2 . Когда оба фона одинаковы, различий между Y_1 и Y_2 не ожидают, что и отмечает наблюдатель. Этот хорошо известный результат на рис. 2.72 представлен диагональю 45° . Если фон Φ_2 светлее Φ_1 , то коэффициент яркости Y_2 выбираемого образца O_2 всегда больше коэффициента яркости Y_1 образца O_1 . Также очевидно, если фон Φ_2 темнее Φ_1 , то коэффициент яркости Y_2 выбираемого образца O_2 всегда меньше коэффициента яркости Y_1 образца O_1 . Эти результаты находятся в согласии с хорошо известным эффектом контраста, в соответствии с которым относительно небольшой серый образец воспринимается светлее (темнее), когда его наблюдают на более темном (светлом) фоне.

Как свидетельствует рис. 2.72, полученный по данным Такасаки, линия изменения светлоты, которая должна бы следовать параллельно диагонали 45° , является кривой со значительной выпуклостью. Появление выпуклости обусловлено тем фактом, что при Y_2 , близком к Y_{Φ_2} фона Φ_2 , наблюдатель обнаруживает быстрое изменение светлоты образца O_2 . Такасаки назвал это явление *эффектом волны*. Это тот же эффект Канэко, о котором упоминалось в рассмотренной выше работе [358]; серый фон усиливает чувствительность наблюдателя к различиям по светлоте двух серых образцов с почти таким же коэффициентом яркости, как и у фона.

Анализируя свои экспериментальные данные, Такасаки приходит к эмпирической формуле для показателя светлоты, которая очень хорошо описывает как основной эффект контраста, так и эффект волны, когда изменение светлоты наблюдают в широком диапазоне условий наблюдения. Его формула имеет следующий вид:

$$T_i = V_i - c_1 V_{\Phi i} + c_2 \bar{V}_{\Phi} \left[\frac{V_i - V_{\Phi i}}{c_3} \right] \exp \left[\frac{-|V_i - V_{\Phi i}|}{c_3} \right]. \quad (2.55)$$

При $i = 1$ имеем показатель светлоты T_1 для образца O_1 на фоне Φ_1 , при $i = 2$ имеем T_2 для O_2 и Φ_2 . В формуле используются не коэффициенты яркости Y_1 и Y_2 , $Y_{\Phi 1}$ и $Y_{\Phi 2}$, а уточненные значения светлоты по Манселлу V_1 , V_2 , $V_{\Phi 1}$, $V_{\Phi 2}$ соответственно, которые определяются по коэффициентам яркости при помощи уравнения (2.50). Величина V_{Φ} является средним уточненным значением Манселла для двух фонов, так что $\bar{V}_{\Phi} = (V_{\Phi 1} + V_{\Phi 2})/2$. Существуют три постоянные c_1 , c_2 , c_3 , которые изменяются от одного наблюдателя к другому и зависят от условий наблюдения, таких, как размер образца, а также, вероятно, уровень освещенности в его плоскости.

Основной эффект контраста учитывается первыми двумя членами уравнения (2.55). Это соответствует теории индукции (см.,

например, [302]), которая утверждает, что некоторая часть зрительного возбуждения от фона индуцируется обратно на поверхность образца и изменяет его светлоту. Таким образом, постоянная c_1 контролирует величину индукции.

Оставшийся член уравнения (2.55), представляющий экспоненциальную функцию, учитывает эффект волны. Постоянная c_2 контролирует величину этого эффекта, а c_3 контролирует крутизну волны.

Семмельрот предлагает модель для описания работы зрительного механизма, ответственного за восприятие светлоты [597]. Он постулирует, что зрительный механизм одновременно реагирует на два сигнала поля стимула. Во-первых, существует реакция (α) на яркость стимула. Для связи величины реакции с уровнем яркости предлагается использовать степенной закон. Во-вторых, имеется реакция (β) на различие в яркости между рассматриваемым образцом, яркость или светлоту которого необходимо оценить, и фоном. В этом случае также предлагается использовать степенной закон для связи величины реакции с различием по яркости. Предполагается, что β -реакция складывается с α -реакцией, когда яркость образца выше яркости фона, и вычитается из α -реакции, когда яркость образца ниже яркости фона. Таким образом, мы получаем

$$\begin{aligned} S &= L^m + k |L - L_\phi|^n \text{ для } L \geq L_\phi, \\ S &= L^m - k |L - L_\phi|^n \text{ для } L \leq L_\phi. \end{aligned} \quad (2.56)$$

S обозначает показатель светлоты, L и L_ϕ — яркость образца и фона соответственно, а постоянная k определяет пропорциональный вклад α - в β -реакций в суммарную реакцию S . Показатели степени m и n управляют α - и β -реакциями соответственно.

Семмельрот показал, что при $m = n = k = 0,2$ уравнение (2.56) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные Такасаки, представленные на рис. 2.72. Яркости L и L_ϕ заменяются коэффициентами яркости Y и Y_ϕ . При выборе соответствующих значений для m , n и k наблюдается некоторая гибкость. Когда кроме результатов Такасаки принимаются во внимание и другие экспериментальные данные, оказывается, что наиболее подходящими являются значения $m = 0,4$, $n = 0,2$ и $k = 0,65$.

Исследования Канэко, Такасаки и Семмельрота показывают, что необходимо пересмотреть предложенные ранее функции для показателя светлоты, представленные уравнениями (2.48—2.53) [357, 597, 598, 649]. Хотя эти функции предназначались для использования в определенных условиях наблюдения, в настоящее время имеются доказательства, которые заставляют усомниться в правильности этих функций. Например, предполагали, что шкала светлоты по Манселлу будет наиболее подходящей при приме-

нением с средне-серым или белым фоном, тем не менее функция, заданная уравнением (2.48), нигде не проявляет эффекта волны. Если серая шкала Манселла относится к фиксированному серому фону, то она должна иметь локальное расширение вблизи этого серого фона. При отсутствии расширения возникает вопрос, должна ли шкала серых цветов Манселла в действительности относиться к оценке различий по светлоте на сером фоне с промежуточным значением светлоты между двумя сравниваемыми серыми образцами. Такой фон с изменяющимся коэффициентом яркости предполагает, что, например, два образца со значениями светлоты по Манселлу 1/ и 2/, рассматриваемые на фоне со значениями светлоты 1,5/, должны восприниматься точно также отличающимися по светлоте, как два других образца со светлотой по Манселлу 8/ и 9/, рассматриваемые на фоне со значением светлоты по Манселлу 8,5/.

Семмельрот проверил эту возможность, вводя в уравнение (2.56) значения $m = 0,4$, $n = 0,2$, $k = 0,65$ [598]. Во-первых, он обнаружил, что для фона с фиксированным коэффициентом яркости шкала светлоты по Манселлу [уравнение (2.50)] обнаруживает неравномерности в распределении светлоты с коэффициентом, превышающим 3,0. После того как он ввел фон с изменяющимся коэффициентом яркости, т. е. величина Y_ϕ занимала промежуточное положение между коэффициентами яркости двух сравниваемых по светлоте серых образцов, его формула стала лучше описывать шкалу светлоты Манселла. Однако еще остались неравномерности с коэффициентом порядка 1,5. Дальнейшее улучшение, приводящее к коэффициентам менее 1,3, достигается при сохранении коэффициента яркости фона не более промежуточного значения коэффициента яркости двух серых образцов. Остаточные ошибки возникают из-за того, что в уравнении (2.56) учитывается наблюдаемый эффект волны, в то время как в уравнении (2.50) он не учитывается.

Семмельрот подготовил таблицу, которую можно использовать для расчета поправок к шкале светлоты по Манселлу, чтобы более точно применить ее к равномерным шкалам светлоты для фонов с различными коэффициентами яркости [598]. Эта же таблица может использоваться для введения соответствующих поправок в шкалу W^* [уравнение (2.51)], учитывая, что значение светлоты по Манселлу V приблизительно соответствует $0,1 W^*$.

График, построенный на основе таблицы Семмельрота, приведен на рис. 2.73. Абсцисса V_s обозначает светлоту по Манселлу серых образцов, определенную в соответствии с формулой уточнения светлоты [уравнение (2.50)]. Можно назвать V_s номинальным значением светлоты по Манселлу. Ордината V_a обозначает уточненное значение светлоты фона по Манселлу, так чтобы более точно соответствовать показателю светлоты S Семмельрота в урав-

нении (2.56). В самом деле, Семмельрот приводит соотношение

$$V_a = 0,575421S - 0,658646. \quad (2.57)$$

Значение V_a фона, являющееся функцией номинального значения светлоты образца V_S , зависит, разумеется, от фона. Вот

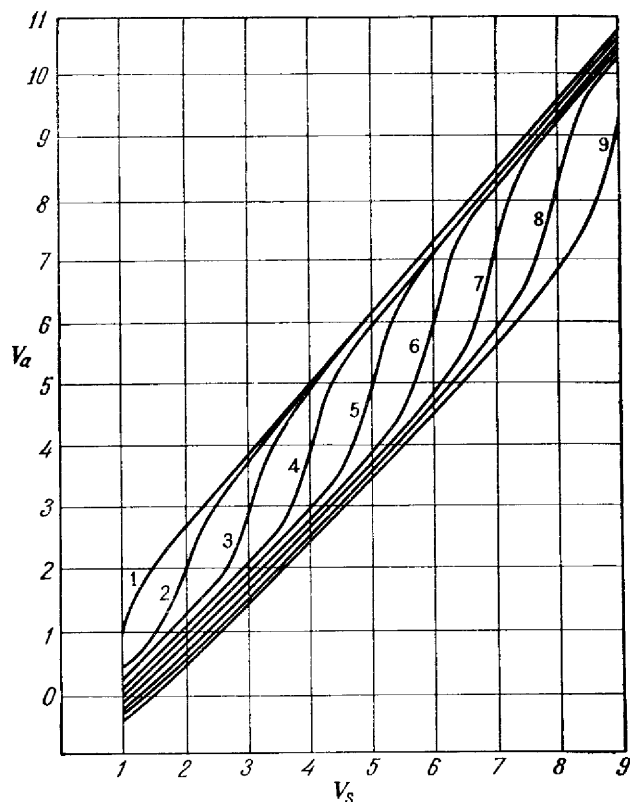


Рис. 2.73. Зависимость уточненных значений светлоты по Манселлу V_a от номинальных значений светлоты по Манселлу V_s для фона с номинальной светлотой по Манселлу 1/, 2/ . . . 9/ (данные представлены из таблицы [598]).

почему на рис. 2.73 представлен ряд кривых, относящихся к каждому из девяти различных фонав. Каждый фон определен его номинальной светлотой по Манселлу, обозначенной на рис. 2.73 числами от 1 до 9. Единицы V_a выбраны такими, чтобы соответствовать единицам, приблизительно равным светлоте (по Манселлу) относительно фона с изменяющимся коэффициентом яркости. Таким образом, мы отмечаем, что для $V_s = 1, 2, 3, \dots$, имеем $V_a \approx 1, 2, 3, \dots$ для соответствующих фонав 1, 2, 3, . . .

Ниже приведены примеры, иллюстрирующие использование рис. 2.73.

Пример 1. Различие светлоты двух образцов с $V_S = 2$ и $V_S = 3$ на фоне со светлотой 7/ приблизительно равняется $\Delta V_a = = 1,65 - 0,7 = 0,95$. Соответствующее различие тех же образцов, рассматриваемых на фоне со светлотой 3/, равно $\Delta V_a = 3,0 - 1,2 = = 1,8$. Это почти вдвое больше, чем для фона со светлотой 7/.

Пример 2. Образец со значением светлоты по Манселлу $V_S = 3$, рассматриваемый на фоне со светлотой 5/, имеет показатель светлоты $V_a \approx 2$. Такой же показатель светлоты $V_S = 2$ получается для образца со значением $V_S = 2$ на фоне с светлотой 2/.

Пример 3. Эффект волны явственно наблюдается в области, где V_S приблизительно соответствует светлоте фона; в этой области каждая кривая имеет точку перегиба. Например, при увеличении V_S на половину ступени от 5/ для фона 5/ V_a увеличивается на 1,35 ступени ($6,35 - 5,0 = 1,35$). Это более чем вдвое превышает увеличение, вызванное увеличением V_S от 8/ до 8,5/ при той же светлоте фона 5/ ($9,9 - 9,4 = 0,5$).

РАВНОКОНТРАСТНЫЕ ШКАЛЫ ЦВЕТНОСТИ

Ощущение цветности цветового восприятия определяется одновременно цветовым тоном и насыщенностью при постоянной светлоте. В психологическом цветовом теле изменения в одном ощущении цветности представлены горизонтальными плоскостями постоянной яркости. Таким образом, равноконтрастная шкала цветности представляет собой двумерную последовательность цветов равной светлоты, каждый из которых воспринимается одинаково отличающимся от своих ближайших соседей. Если в наличии имеется большое количество цветных образцов одинаковой светлоты, то можно отобрать образцы, следующие этому критерию на основе метода, представленного на рис. 2.67 этапами от *a* до *ж*. Хорошим приближением к такой равноконтрастной шкале является метод отбора образцов цветового тела в соответствии с правильной ромбоэдрической решеткой. Такой набор вскоре будет выпущен Американским оптическим обществом.

Создать такую двумерную последовательность равноконтрастно распределенных цветов одной и той же светлоты можно по-другому, используя шкалы цветового тона и насыщенности по Манселлу. Как было показано ранее на рис. 2.59, они образуют полярную систему координат для каждой плоскости постоянной светлоты по Манселлу. Постоянная светлота по Манселлу не соответствует постоянной светлоте, однако если мы примем, что эти два термина приблизительно одинаковы, то можно продолжить

рассмотрение дальше. Все, что мы должны сделать, заключается в наложении на сетку полярных координат Манселла решетки из равносторонних треугольников (рис. 2.74). Такие решетки являются плоскостями поперечных сечений правильной ромбоэдрической решетки, которую мы ввели выше. В таком случае каждый узел треугольной решетки однозначно соответствует цвету в системе Манселла и может быть записан с использованием обозначений Манселла. Такой отбор образцов в системе Манселла в соответствии

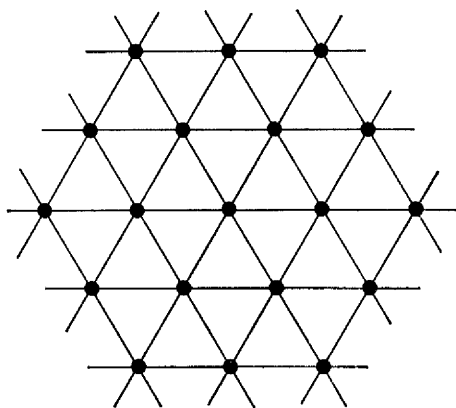


Рис. 2.74. Треугольная решетка для равноконтрастного шкалирования цветности.

с решеткой был рассчитан Вышецким [711—713]. Результаты, полученные для цветов со значением светлоты по Манселлу $5/$, представлены на рис. 2.75.

Подобные образцы решетки можно получить для других плоскостей постоянной светлоты по Манселлу. Девять треугольных решеток, составленных определенным образом, образуют правильную ромбоэдрическую решетку, полностью охватывающую пространство Манселла.

Конечно, равноконтрастное цветовое пространство, а тем самым и двумерную шкалу ощущения цветности равносветлых цветов можно получить только в случае евклидовой геометрии цветового пространства. Если геометрия цветового пространства неевклидова, любая шкала ощущения цветности в лучшем случае будет лишь приблизительно равноконтрастной.

Очевидно, что система Манселла, как, возможно, и любая другая из существующих систем восприятия цвета, не является совершенно равноконтрастной. Однако работа комитета по равноконтрастным цветовым шкалам Американского оптического общества,

по-видимому, свидетельствует о возможности хорошей аппроксимации идеального равноконтрастного цветового пространства в евклидовом пространстве.

Было предпринято несколько попыток найти путем нелинейного преобразования систему координат для стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г., которая по существу

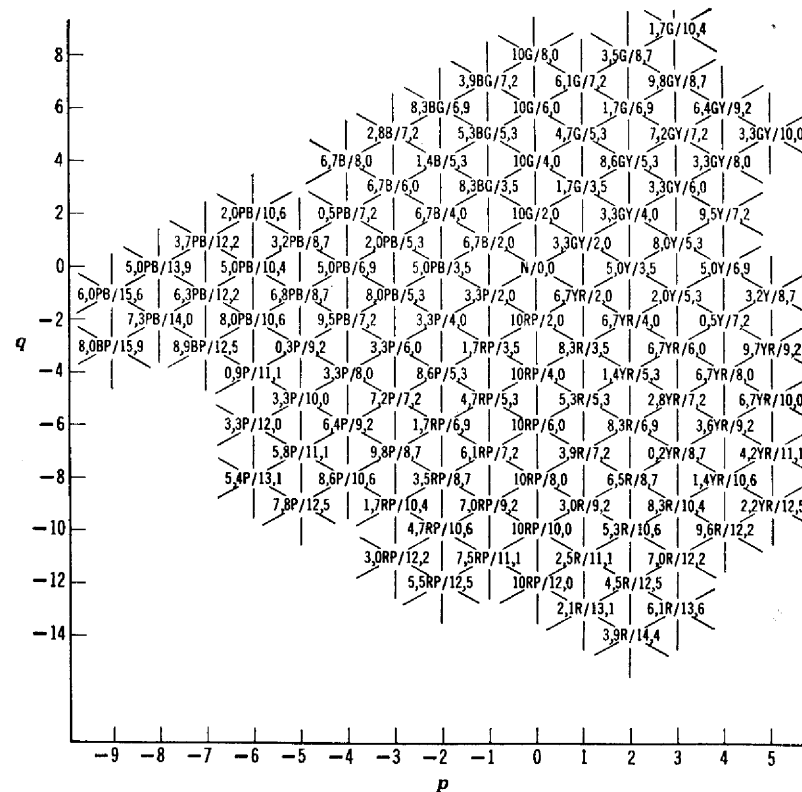


Рис. 2.75. Заполнение треугольной решетки цветами при светлоте по Манселлу $5/$ [713].

Для каждого узла решетки с координатами (p, q) дано соответствующее обозначение.

приводила бы к такому же расположению ощущений цветности, как и в системе Манселла [7, 149, 151, 168, 180, 357, 442, 498, 576, 577, 647]. Многие из этих попыток привели к достаточно хорошим приближениям, но за счет довольно сложных формул нелинейного преобразования. По-видимому, сложным арифметическим расчетом не обращаются к технологу по цвету, если существует более простой, но, возможно, несколько менее точный метод. Однако

нелинейное преобразование, известное как «график Адамса» является одним из наиболее широко используемых для оценки значимости цветовых измерений и будет рассмотрено в дальнейшем в связи с расчетом цветовых различий [7]. Другим хорошим приближением к расположению цветов в пространстве Манселла является система координат, включающая функцию кубического корня, которая также довольно проста [480]. Позже у нас будет возможность детально обсудить эту систему и ее дальнейшие разработки.

Равноконтрастные цветовые графики. Другой способ построения равноконтрастной двумерной шкалы цветности состоит в том, чтобы использовать надежные данные по распределению цветности вместо данных, получаемых с помощью шкал цветового тона и насыщенности в системе Манселла.

Джадд нашел, что данные такого рода, полученные до 1935 г., находятся в хорошем соответствии (с точностью до множителя, равного 2) с их представлением на плоском графике [317]. Он предложил проективное преобразование типа

$$\begin{aligned} x' &= \frac{c_{11}x + c_{12}y + c_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}}, \\ y' &= \frac{c_{21}x + c_{22}y + c_{23}}{c_{31}x + c_{32}y + c_{33}}, \end{aligned} \quad (2.58)$$

которое переводит цветовой график (x, y) МКО 1931 г. в новый цветовой график (x', y') .

Новый график называется равноконтрастным цветовым графиком (UCS), потому что он получен в соответствии с данными по распределению цветов с приблизительно одинаковым расстоянием между парами точек, соответствующих цветностям, найденным экспериментально, и визуально одинаково отличающихся друг от друга.

Равноконтрастный цветовой график Джадда в течение многих лет использовался в качестве руководства по расположению цветности ряда важных с практической точки зрения цветов и стандартных образцов цвета [61, 351, 434, 435]. В дальнейшем он использовался для определения изотемпературных линий при расчете коррелированной цветовой температуры нечерных тел [351]. Изотемпературные линии представляют собой кратчайшие расстояния между линией черного тела и точкой, представляющей цветность рассматриваемого нечерного тела. Равноконтрастный цветовой график использовался также при разработке метода определения цветопередающих свойств источников света и при определении белизны бумаги [53, 319, 320].

Важность равноконтрастного цветового графика охотно признается, она побудила других исследователей заняться его улучшением или разработкой новых равноконтрастных графиков, осно-

ванных на различных экспериментальных данных [57, 150, 266, 266, 397, 482, 643]. Стало привычным определять равноконтрастный цветовой график как проективное преобразование цветового графика (x, y) МКО 1931 г. или цветового графика (x_{10}, y_{10}) МКО 1964 г. Другими словами, равноконтрастные цветовые графики часто определяются системой уравнений, например вышеприведенной системой уравнений (2.58). Однако, как будет показано ниже, термин равноконтрастный цветовой график применим не только к проективным преобразованиям, но и к другим нелинейным преобразованиям.

Равноконтрастные цветовые графики, основанные на различных проективных преобразованиях, характеризуются различными наборами коэффициентов преобразования $(c_{11}, c_{12}, \dots, c_{33})$. В табл. 2.18 представлены коэффициенты для ряда равноконтрастных цветовых графиков, приведенных различными авторами. Особое внимание следует уделить равноконтрастному цветовому графику, разработанному Мак Адамом [397]. В 1960 г. этот график был принят МКО в качестве временного стандартного равноконтрастного цветового графика [101]. Его называют равноконтрастным цветовым графиком МКО 1960 г. В соответствии с табл. 2.18 уравнения преобразования, приводящие к этому графику, записываются в виде

$$\begin{aligned} u &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \\ v &= \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \end{aligned} \quad (2.59)$$

Этот же график определяется уравнениями

$$\begin{aligned} u &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \\ v &= \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}, \end{aligned} \quad (2.60)$$

где вместо координат цветности x, y уравнения (2.59) использованы координаты цвета X, Y, Z .

На рис. 2.76 представлен равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г., определяемый уравнением (2.59) или (2.60). На рис. 2.77 показан тот же график с линиями постоянных значений x и y , наложенными на прямоугольную сетку координат u, v . Они иллюстрируют искажение сетки x, y , необходимое для получения более равноконтрастного распределения цветности.

Значительным успехом МКО является тот факт, что после многолетних дискуссий удалось достичь соглашения по вопросу стандартного равноконтрастного цветового графика. Трудность при достижении соглашения заключалась не только в том, что каждый

Коэффициенты проективного преобразования [уравнение (2.58)], приводящие к приблизительно равноконтрастному распределению цветности

Коэффициент	(1) Джадд [317]	(2) Брекенридж и Шауб [57]	(3) Фарисворт [150]	(4) Хантер [265]	(5) Мак Адам [39], МКО [97]	(6) Нойгбауэр [482]	(8) Американское оптическое об- щество [314]	(8) Сугиэма и Фукуда [643]
c_{11}	2,7760	-0,74803	0,6600	2,4266	4,0	4,4240	0,4661	0,230
c_{12}	2,1543	-1,35203	0	-1,3631	0	-2,5263	0,1593	0
c_{13}	-0,4192	0,70001	0	-0,3214	0	-0,6316	0	0
c_{21}	-2,9446	3,19700	0	0,5710	0	0,6316	0	0
c_{22}	5,0323	-4,55045	1,2666	1,2447	6,0	2,2105	0,6581	0,600
c_{23}	0,8283	-0,54884	0	-0,5708	0	0,9473	0	0
c_{31}	-1,0000	1,00000	0	1,0000	-2,0	-2,0000	-0,1574	-0,038
c_{32}	6,3553	-7,05336	1,0000	2,2633	12,0	12,0000	1,0000	1,000
c_{33}	1,5405	-1,64023	0,2666	1,1054	3,0	3,0000	0,2424	0,163

Примечания к системам равноконтрастных цветовых графиков (1) — (8):

- (1) Система координат представлена равносторонним треугольником.
 (2) Выведена непосредственно из системы Джадда. Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы график можно было построить в прямоугольных координатах. Это равноконтрастный цветовой график. В начале системы называют RUCS-графиком (прямоугольный равноконтрастный цветовой график). В начале системы координат помещена цветность равноэнергетического источника. Приведенные здесь коэффициенты преобразования отличаются от предложенных первоначально Бреккенриджем и Шаубом [57], однако приводят к идентичному графику. Первоначальное преобразование выводится в два этапа, проективное преобразование провоздилось после простого смещения начала координат. Эти два этапа были объединены в один.
 (3) Разработана для минимальных отклонений от кругообразных линий цветовых тонов по Манселлу при насыщенности 1/10 и светлоте 5/ со стандартным источником С в центре.
 (4) Разработана с тем, чтобы распределение цветности на графике Джадда находилось в более тесном соответствии с распределением по Манселлу. В начале этой системы помещена цветность стандартного источника С. Иногда она называется графиком «альфа-бета».
 (5) Выведена непосредственно из системы Джадда. Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы график можно было построить в прямоугольной системе координат. Система (5) специально предназначена для ввода простых коэффициентов. Эта система принята МКО в качестве временного стандартного равноконтрастного цветового графика.
 (6) Идентичен графику Мак Адама (5), но с началом координат, сдвинутым в точку, представляющую цветность равноэнергетического источника.
 (8) Разработана с тем, чтобы соответствовать распределению цветности как в системе Манселла, так и в системе Мак Адама, построенной в соответствии с его эллипсами по различению цвета [398].

стремился выдвинуть используемую им систему, но и в том, что на результаты существенное влияние оказывали условия наблюдения. Принятие равноконтрастного цветового графика Мак Адама не было связано с его преимуществом по сравнению с другими графиками. Действительно, в то время, когда этот график был выбран в качестве стандартного, только предполагалось, что он

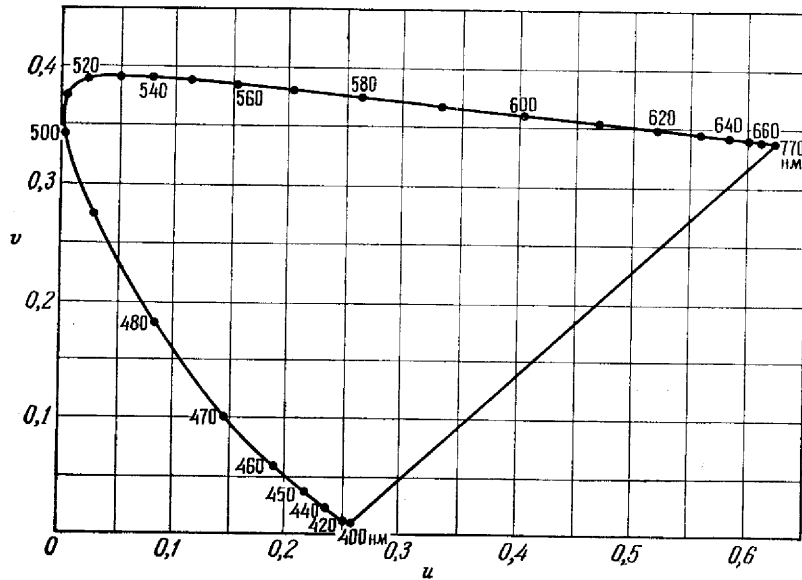


Рис. 2.76. Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г., представляющий проективное преобразование цветового графика x, y МКО 1931 г.

дает распределение цветности примерно такое же равноконтрастное, как и в других системах, другими словами, график Мак Адама рассматривался в качестве характерного графика подобного типа. Возможно, что решающим фактором, определившим окончательный выбор этого графика, явился тот факт, что коэффициенты преобразования, приводившие к этому графику, являются простыми целыми числами и таким образом удобными в применении [уравнение (2.59)].

В одной из своих последних теоретических работ Джадд и Ионемур [354] нашли тесную взаимосвязь между вторым этапом теории зрения Мюллера и равноконтрастным цветовым графиком МКО 1960 г. Рассматривая нормальное зрение как комбинацию протанопии и тританопии, в соответствии со вторым этапом теории Мюллера можно разработать более общую меру воспринимаемой величины различия в цветности по сравнению с длиной линии,

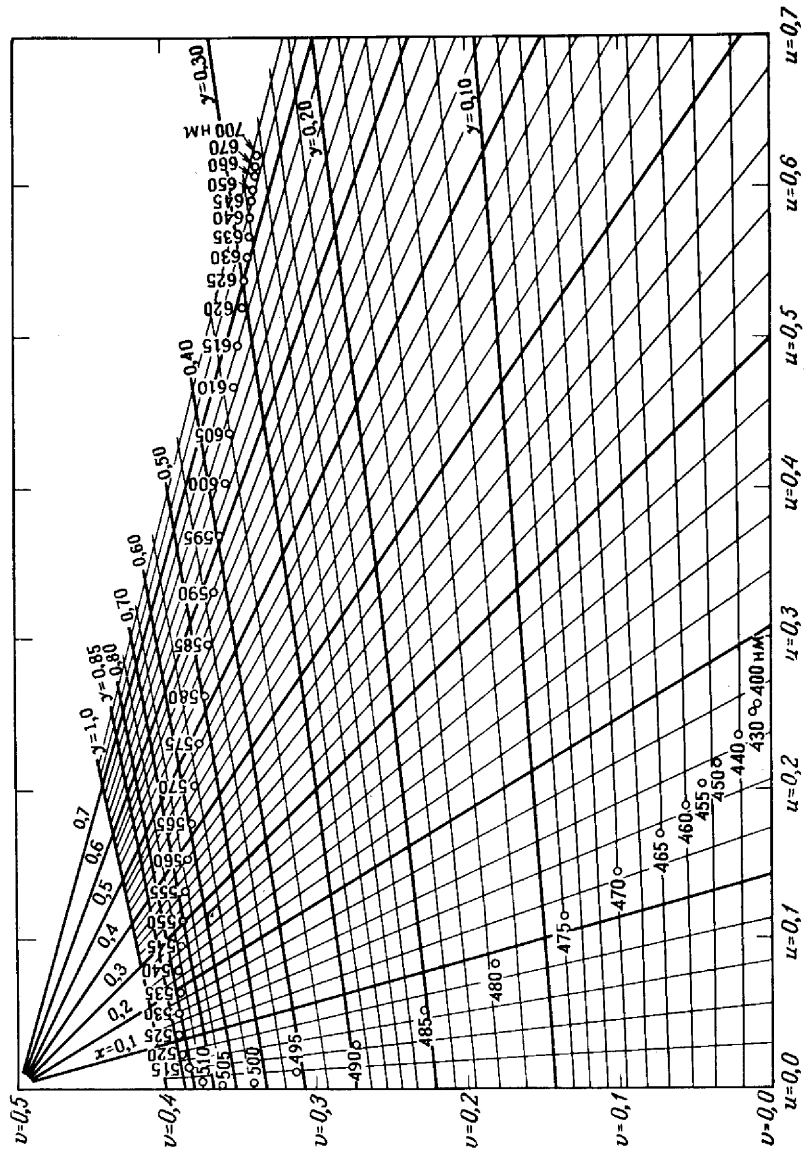


Рис. 2.77. Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г.

На прямоугольную сетку координат u и v нанесена сетка линий с постоянными значениями x и y в соответствии с [уравнением (2.50)] [397].

соединяющей две точки цветности. Общей мерой, предложенной Джаддом и Ионемурой, является квадратный корень из суммы квадратов углов, образованных прямыми цветностей, не различаемых протанопами (рис. 2.14, а) и тританопами (рис. 2.14, б).

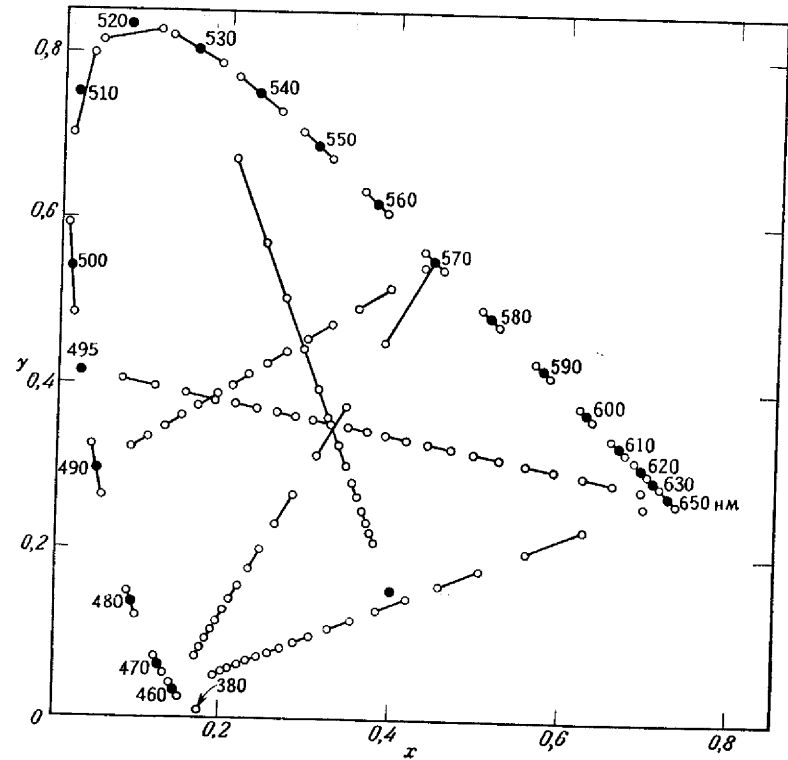


Рис. 2.78. Цветовой график x , y МКО 1931 г.

Отрезки прямых представляют собой интервалы цветности, соответствующие одинаковым зрительным ощущениям [705].

С помощью этой меры дается количественное объяснение экспериментальных данных по различению длины волны не только для протанопов и тританопов, но и для наблюдателей с нормальным зрением.

Возможность восприятия различий в цветности лучше всего иллюстрируется экспериментальными данными, полученными Райтом [705, 706], Мак Адамом [398] и Стайлсом [626].

Первую совокупность данных, связанных с восприятием различий цветности вдоль линий спектральных цветностей и, большого числа линий, образованных аддитивными смесями монохроматических цветовых стимулов, получил Райт [705, 706]. На рис. 2.78 представлен цветовой график (x , y) МКО 1931 г. с неко-

торыми типичными результатами измерений Райта. Интервал цветности, определенный каждым штрихом на пунктирных линиях, по Райту соответствует цветовому различию, воспринимаемому одинаковым для всех штрихов. Из рис. 2.78 совершенно очевидно, что

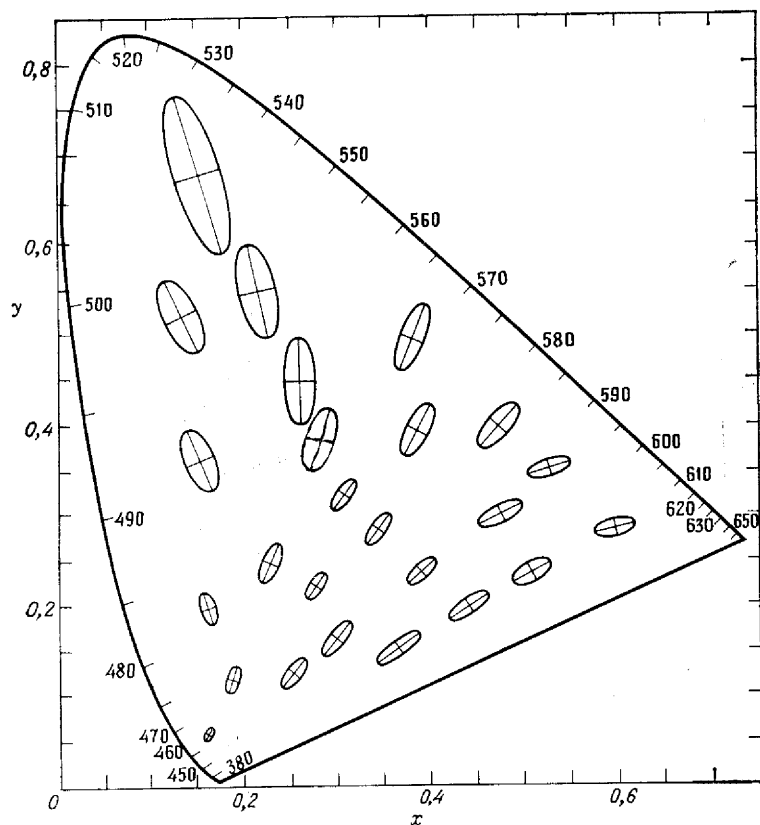


Рис. 2.79. Статистические отклонения уравниваний по цветности в различных частях цветового графика x, y МКО 1931 г. [398].

Линии эллипсов соответствуют цветностям, отстоящим от центральной точки на величину стандартного отклонения при установке равенства по цветности. Для наглядности оси каждого эллипса увеличены в 10 раз

цветовой график (x, y) МКО 1931 г. далек от равноконтрастного; область зеленых цветов (верхняя часть графика) слишком растянута, а синевато-пурпурных (нижняя часть графика) — очень сжата.

Вторая совокупность данных, касающихся в основном подпороговых различий цветности, была опубликована Мак Адамом

[398]. Представляющая интерес величина различий в цветности определялась степенью ошибок, сделанных наблюдателем при установке равенства по цветности. Наблюдаемое поле в 2° имело яркость $48 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ (или ~ 15 миллиламберт). Расположенное вокруг него поле в 21° имело яркость около $24 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Поле окружения воспроизводит дневной свет (стандартное излучение С МКО). Результаты Мак Адама представлены на рис. 2.79. Каждая исследуемая точка цветности окружена эллипсом, представляющим собой геометрическое место точек, соответствующих различиям в цветности относительно центра и равных стандартному отклонению при уравнивании цветности. Для наглядности оси эллипсов на рис. 2.79 увеличены в 10 раз. Вновь мы отмечаем, что область зеленых цветов на цветовом графике (x, y) выглядит сильно растянутой, а синевато-пурпурных — сжатой.

С помощью дополнительных экспериментов Мак Адам определил, что едва заметное различие в цветности должно быть почти втрое выше рассчитанного стандартного отклонения при уравнивании цветов [398]. Это означает, что геометрическими местами точек, соответствующих едва заметным различиям в цветности относительно данной точки цветности, являются эллипсы с осями, примерно втрое длиннее осей эллипсов стандартных отклонений.

Используя данные экспериментов, касающихся заметных изменений цвета, вызванных добавлением излучения одной цветности к излучению другой, Стайлс построил тело расположения цветностей [626]. Поэтому сравниваемые поля отличались как по цветности, так и по яркости [625]. Чтобы учесть увеличение в яркости, вызванное добавлением одного светового потока другим, Стайлс использовал трехкомпонентную теорию зрения Гельмгольца. В этом изящном методе уменьшения, по-видимому, учтена хроматическая адаптация и в результатах (рис. 2.80) не содержится локальных неравномерностей, обнаруженных Мак Адамом (рис. 2.79) у своего единственного наблюдателя. Следует отметить, что данные Стайлса подтверждают основные тенденции результатов Мак Адама.

Статистическое непостоянство уравнивания цветов также широко исследовалось Брауном и Мак Адамом [69], Брауном [70—73], а совсем недавно Вышецким и Филдером [733]. Результаты этих исследователей в целом согласуются с эллипсами, полученными Мак Адамом [398] и Стайлсом [626]. Однако абсолютного согласия нет и в ряде случаев отмечены систематические расхождения. В связи с этим следует обратить особое внимание на выводы, сделанные Вышецким и Филдером в [733]. Эти авторы подчеркивают, что данные по визуальному уравниванию цветов, полученные одним и тем же наблюдателем в различных случаях, но при одинаковых условиях наблюдения, по-видимому, гораздо менее воспроизводимы, чем это устанавливается обычным статистическим

анализом. Вероятно, на функционирование зрительного механизма, который контролирует уравнивание цветов, влияют параметры, зависящие от времени, а возможно, и от других обстоятельств, не

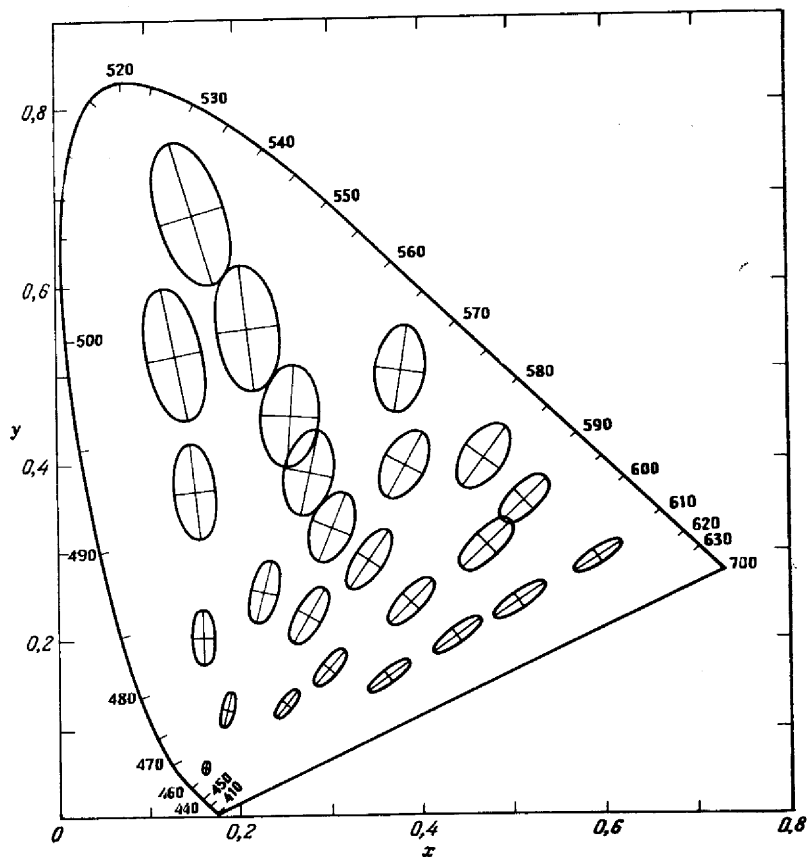


Рис. 2.80. Статистические отклонения уравниваний по цветности, предсказанные Стайлсом, в соответствии с преобразованным линейным элементом Гельмгольца в различных частях цветового графика x, y , МКО 1931 г. [626].
Размер эллипсов увеличен в три раза.

контролируемых обычными статистическими методами. Этим можно объяснить иногда довольно значительные отклонения по форме, размерам и ориентации некоторых эллипсов относительно других. Однако, если даже сделать допуск на несовместимость эллипсов отдельных наблюдателей, следует отметить некоторые систематические расхождения между рядами эллипсов различных наблюда-

телей. В частности, были обнаружены систематические расхождения между некоторыми из эллипсов, приведенных Мак Адамом [398], и соответствующими эллипсами, приведенными Брауном и Мак Адамом [69], Брауном [73], Вышецким и Филдером [733]. В основном несоответствия наблюдаются в красной и пурпурной областях цветового графика. Причина их не совсем ясна.

Конечно, следует учитывать также возможность влияния на ориентацию, размер и форму эллипсов различных условий наблюдения, используемых различными исследователями, однако с некоторой достоверностью по несоответствию между различными совокупностями эллипсов можно выявить лишь влияние величины поля зрения на абсолютный размер эллипсов. С уменьшением размера поля зрения эллипсы увеличиваются. В связи с этим wspomним приведенный ранее рис. 2.19.

Следует также ожидать изменения эллипсов при изменении яркости наблюдаемых цветовых стимулов в различных пределах. Более того, предполагается, что яркость, так же как и цветность окружения, оказывает некоторое влияние на непостоянство уравнивания цветов. Однако условия наблюдений, на которых базируются различные совокупности имеющихся данных, касающихся уравнивания цветов, не настолько отличаются друг от друга, чтобы было возможно количественно оценить их предполагаемое влияние на ориентацию, форму и размер эллипсов. Необходимы дальнейшие эксперименты по изучению влияния условий наблюдения.

Данные по воспринимаемости различий в цветности и связанными с ними эллипсами могут быть использованы для проверки равноконтрастности цветового графика МКО 1960 г. Для этого необходимо перенести пунктирные линии на рис. 2.78 и эллипсы на рис. 2.79 и 2.80 на равноконтрастный график МКО 1960 г. при помощи уравнения (2.59). Результаты такого переноса приведены на рис. 2.81—2.83. Следует отметить, что в отношении однородности интервала цветности график МКО 1931 г. несколько уступает равноконтрастному цветовому графику. Однако равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. не согласуется полностью с экспериментальными данными. Ни одна из трех совокупностей данных по экспериментально определенному распределению цветности точно не согласуется с распределением цветности на равноконтрастном цветовом графике. Штрихи Райта не всегда имеют одну и ту же длину, а эллипсы Мак Адама и Стайлса не являются идеальными окружностями и не равны по величине. Аналогичные результаты имеют место и для эллипсов уравнивания цветов, полученных упомянутыми выше Брауном и Мак Адамом [69], Брауном [73], Вышецким и Филдером [733].

Мак Адам провел тщательный анализ своих данных и доказал, что ни линейным или даже нелинейным преобразованием цвето-

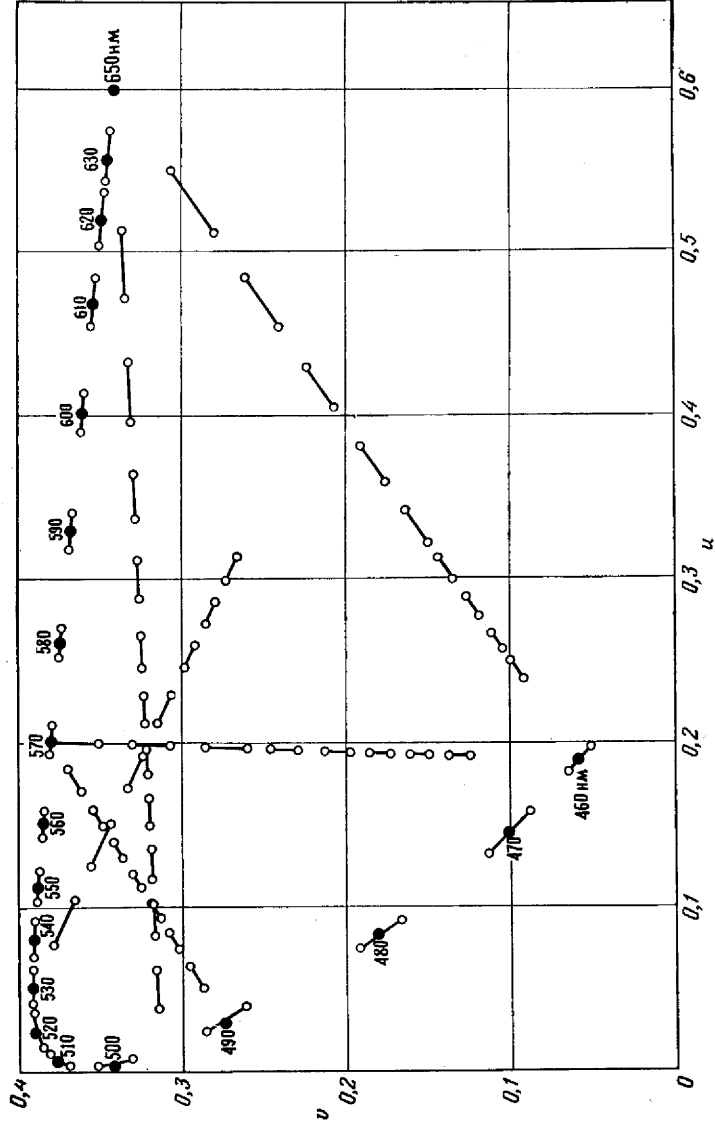


Рис. 2.81. Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. с отрезками прямых в соответствии с рис. 2.78 [705]

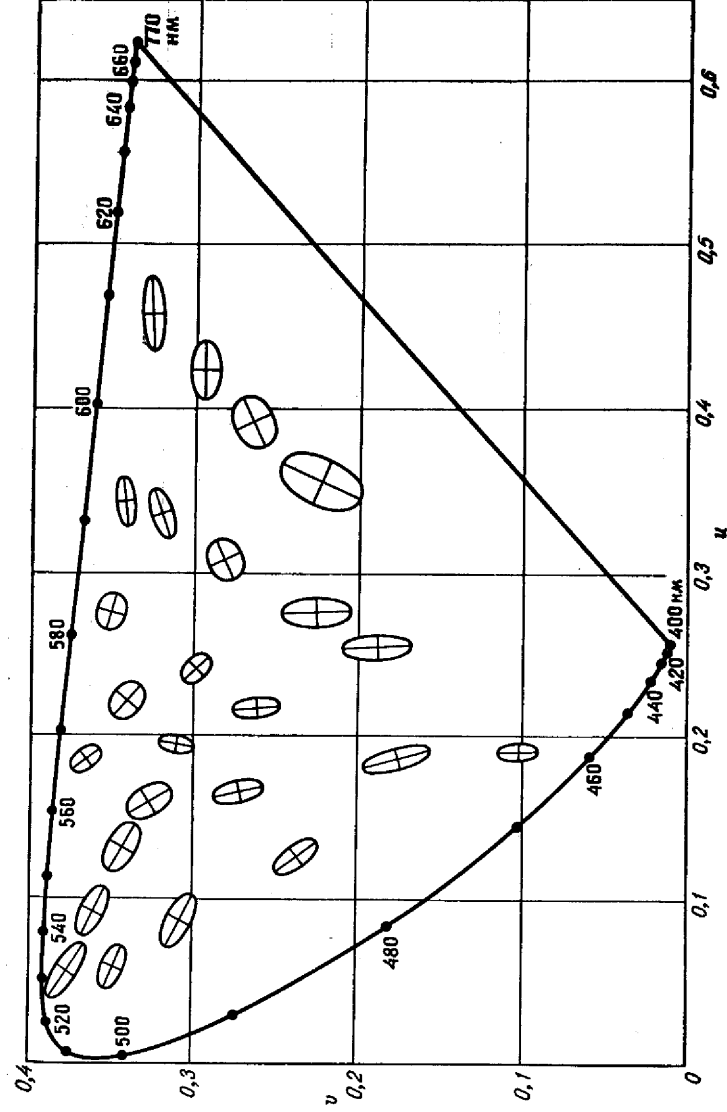


Рис. 2.82. Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. с эллипсами Мак-Адама [398], представленными на рис. 2.79.

Оси эллипсов Мак Адама увеличены в 10 раз по сравнению с их фактической длиной

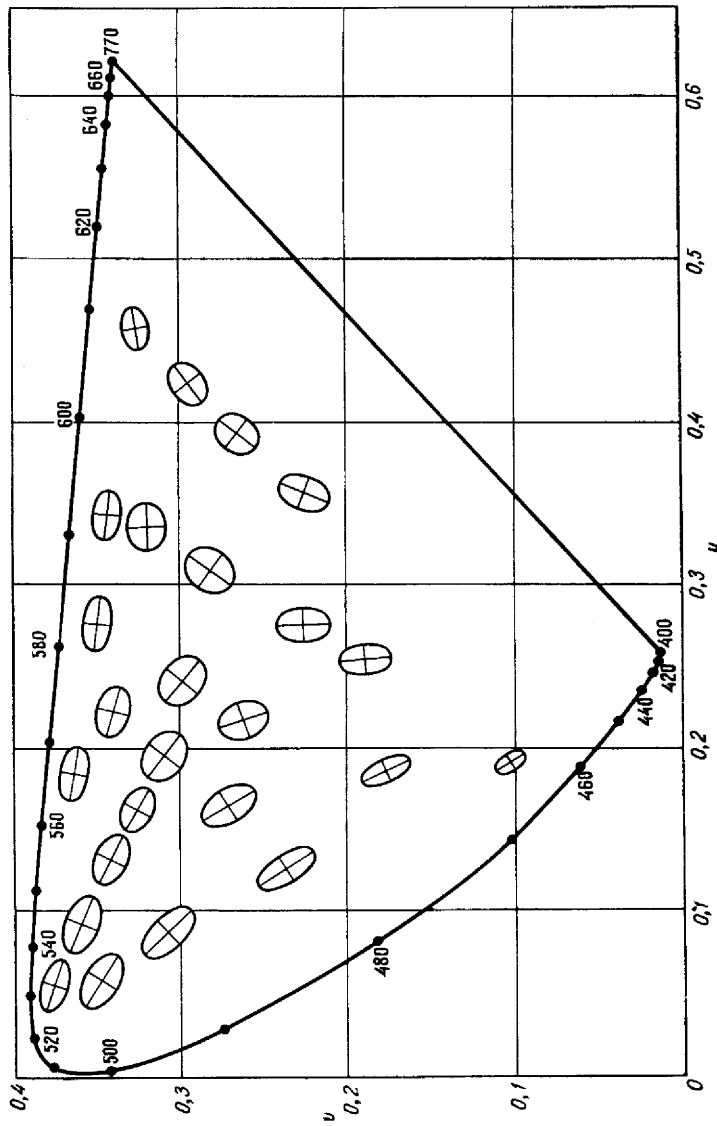


Рис. 2.83. Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. с эллипсами Стайлса [626], представленными на рис. 2.80.

Оси эллипсов увеличены в 2,5 раза по сравнению с их фактической длиной.

вого графика (x, y) нельзя добиться преобразования эллипсов в идеальные окружности равного диаметра [399, 400]. Чтобы получить идеальные окружности, необходимо использовать не плоскость, а искривленную поверхность [401, 403]. Эта поверхность напоминает смятую фетровую шляпу с выпуклостью посередине, гофрированную по краям, неровную и кривую на остальных участках. Из рис. 2.82 можно увидеть, с какими трудностями сталкиваются при попытке представить эллипсы Мак Адама на плоском графике. В центре графика эллипсы имеют тенденцию уменьшаться по размеру и больше напоминают окружности, чем эллипсы на периферии. Для того чтобы на двумерной поверхности различия по цветности, оцененные наблюдателем как одинаково заметные, представить линиями равной длины, поверхность должна быть куполообразной. Для этого средние части графика должны быть меньше, чем показано на рис. 2.82. Если стянуть по окружности центральную часть ($x = y = 0,3$), то она станет выпуклой, т. е. образует поверхность положительной кривизны.

При дальнейшем рассмотрении рис. 2.82 открывается следующая закономерность: главные оси эллипсов на периферии графика в основном имеют тенденцию указывать в направлении к центру. Чтобы на двумерном графике одинаково воспринимаемые различия по цветности представить линиями равной длины, необходимо сжать радиальные отрезки и растянуть периферийные. Это снова заставляет отказаться от плоскости, однако при куполообразной форме поверхности в центральной части радиальные расстояния увеличиваются по сравнению с периферийными, что совершенно противоположно требуемому типу поверхности, т. е. необходима поверхность не положительной, а отрицательной кривизны типа седлообразной поверхности. Это объясняет обнаруженную Мак Адамом волнистость по краям двумерной поверхности, представляющей распределение цветности в соответствии с наблюдениями.

Однако следует указать, что как выпуклость в центре, так и волнистость по краям этой поверхности связаны со свойствами глаза, хорошо известными по другим данным. При обсуждении равноконтрастных шкал светлоты мы уже встречались с эффектом волны. Этот же эффект наблюдается в экспериментах по уравниванию или различению цветов [585, 650]. Наиболее благоприятное условие для обнаружения различий по цветности достигается тогда, когда у поля окружения почти такая же цветность, как и у двух сравниваемых стимулов. Адаптация наблюдателя в эксперименте Мак Адама определяется в основном полем окружения, представляющим дневной свет. В связи с этим линии постоянных различий в цветности на рис. 2.82 должны быть меньше вблизи центра ($x = y = 0,3$), чем на периферии. Этим объясняется наличие выпуклости (положительной кривизны) в центре двумерной поверхности. Что касается отклонений в цветности, значительно отли-

чающихся от отклонений в условиях дневного света, следует отметить, что наблюдатель, адаптированный к дневному свету, будет воспринимать радиальные отклонения как различия в насыщенности по Манселлу, а отклонения на периферии как различия по цветовому тону.

Когда наблюдатель фиксирует одну из двух цветностей, вызывающих восприятие различия по насыщенности, то из-за локальной адаптации тут же начинает уменьшаться воспринимаемая насыщенность по Манселлу. Это продолжается до тех пор, пока при мигании не изменяется точка фиксации. Ньюхоллу удалось определить величину локальной цветовой адаптации между миганиями [483]. Понижение насыщенности (по Манселлу) за счет локальной цветовой адаптации очень велико. Оно может быть в 10 раз больше, чем едва заметное различие в насыщенности (по Манселлу). Когда наблюдатель смотрит сначала на одну, потом на другую половину поля, чтобы решить различаются ли две половины поля между собой, сперва одна половина поля, затем другая рассматриваются парафовеальной частью сетчатки, адаптированной к дневному свету поля окружения. Поэтому каждая половина поля по очереди выглядит более насыщенной, чем другая, и различие в насыщенности (по Манселлу), соответствующее сравнению двух половин поля одинаково адаптированными участками сетчатки, является нечетким. Это — анализ и объяснение почему поле окружения по возможности должно приближаться к сравниваемым цветам. Если две цветности различаются на периферии, а не в радиальном направлении, влияние помех дневного света окружающего поля становится меньше. Фиксированная половина поля воспринимается менее насыщенной, чем другая. Однако, по мере того как желтое пятно и парафовеальная область все более адаптируются в средней из сравниваемых цветностей, различия по цветовому тону становятся более явными. Это происходит до тех пор, пока при полной локальной адаптации цветовые тона не станут фактически дополнительными. Следует ожидать точно такой же результат, какой показывает большинство эллипсов на периферии рис. 2.82. Радиальные различия не могут быть описаны точно так же, как различия, представленные векторами, перпендикулярными к радиусу. Как и следовало ожидать, линии одинаково воспринимаемых различий в цветности относительно любой фиксированной цветности вблизи периферии представлены эллипсами с главными осями, вытянутыми в направлении цветности, к которой адаптирован наблюдатель. Это объясняет волнистость по краю двумерной поверхности, построенной Мак Адамом.

Изучение эллипсов Стайлса (рис. 2.80 и 2.83) также приводит к заключению, что на плоскости эти эллипсы нельзя представить идеальными окружностями одинакового диаметра. Вновь требуется искривленная поверхность. Однако, как показал Стайлс, его

поверхность существенно отличается от равноконтрастного расположения цветностей, предложенного Мак Адамом [626]. Было рассчитано, что поверхность Стайлса везде обладает отрицательной кривизной, в то время как кривизна поверхности Мак Адама положительна в одних областях и отрицательна в других. По данным [736] между изображениями этих двух поверхностей обнаруживаются поразительные расхождения. Однако более внимательное сопоставление эллипсов Мак Адама [398] и Стайлса [626] дает возможность предположить удивительное согласие, в особенности если сделать поправку на несогласованность данных наблюдений, на которых основаны эти эллипсы. Действительно, по сравнению с эллипсами, определенными другими исследователями, эллипсы Мак Адама лучше всего согласуются с эллипсами, предсказанными Стайлсом. Это интересное, хотя и удивительное, соответствие недавно было отмечено Вышецким и Филдером [733]. Оно означает, что, вероятно, не следует придавать слишком большого значения форме (кривизне) поверхности, на которой совокупность эллипсов, полученных на основе экспериментов по уравниванию цветов, выглядит как совокупность идеальных окружностей равного диаметра. Очевидно возможны самые различные формы искривленных поверхностей, которые почти одинаково хорошо годятся для одной и той же совокупности эллипсов, особенно если сделаны приемлемые допущения на несогласованность данных наблюдений.

В связи с этим представляет интерес работа Фарнсворта [151], в которой он описал криволинейные варианты цветового графика (x, y) МКО 1931 г., соответствующие распределению цветностей по Райту (рис. 2.78), Мак Адаму (рис. 2.79), Ньюхоллу, Никкерсон и Джадду (см. рис. 2.61, показывающий распределение ренотации Манселла). Каждый криволинейный график является плоским. Таким образом, кажется, что Фарнсворту удалось доказать возможность превращения эллипсов Мак Адама в окружности равного диаметра, не обращаясь к пространству частично отрицательной и частично положительной кривизны. Однако это можно сделать только в предположении, что по своей природе экспериментальные данные наблюдателя изменялись до 20%. Как можно определить по рис. 2.84, этот предел изменений является разумным.

В дальнейшем Фарнсворт показал, что пространства Райта, Мак Адама и Манселла отличаются главным образом различным растяжением по оси от фиолетового до зелено-желтого. Следовательно, три соответствующих криволинейных графика не могут совпасть благодаря простым линейным преобразованиям. Предполагалось, что за различия ответственны различные условия наблюдения, используемые в этих трех работах.

Самым последним достижением в этой области являются криволинейные цветовые графики Мак Адама [413—415]. На рис. 2.85

представлено нелинейное преобразование цветового графика (x, y) МКО 1931 г., выведенное из статистического непостоянства уравнивания по цвету по данным 14 наблюдателей. Усредненные стандартные отклонения цветовых равенств представлены одной единицей

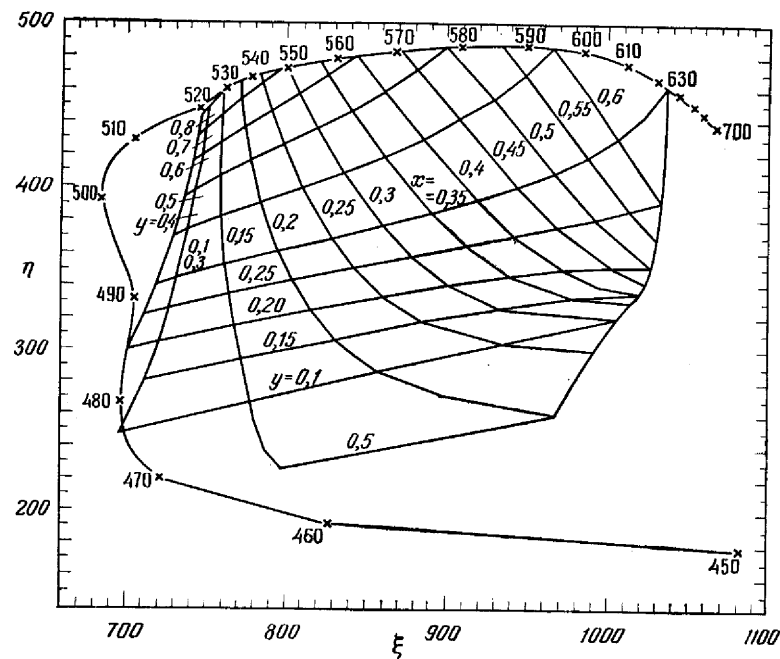
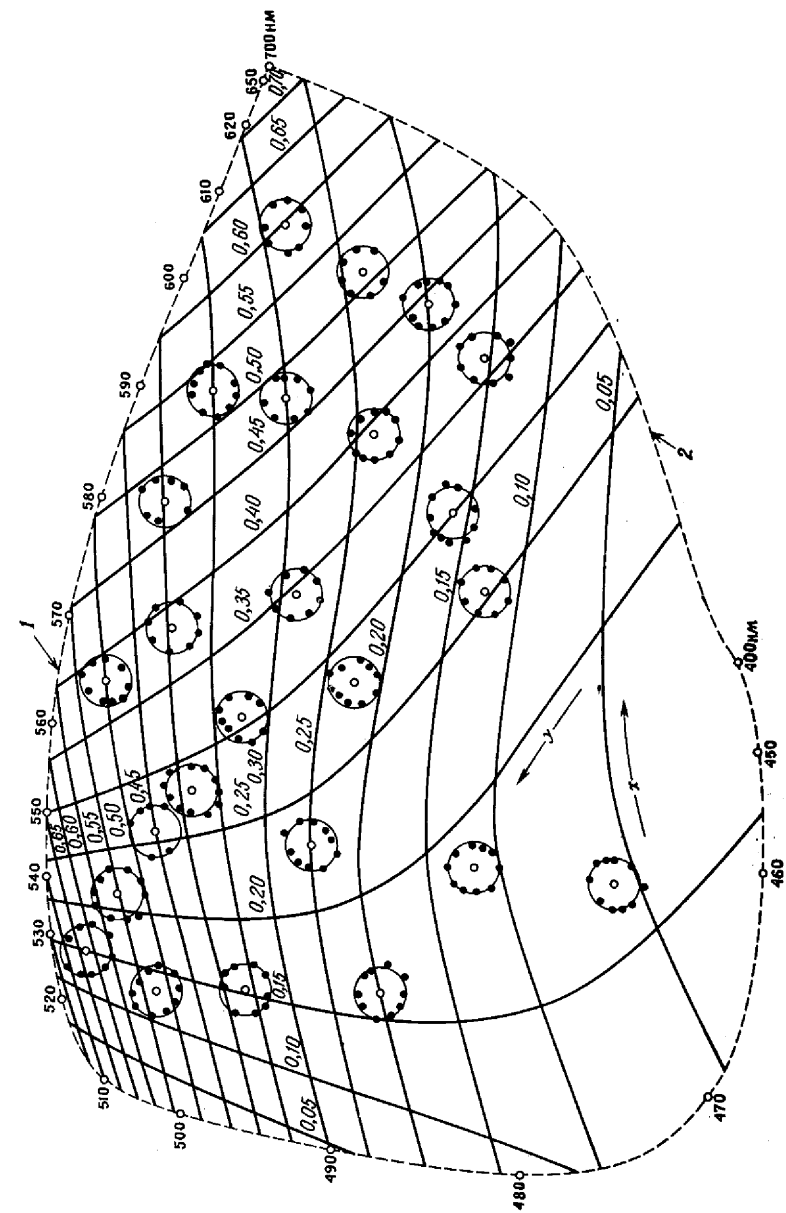


Рис. 2.85. Нелинейное преобразование цветового графика x, y МКО 1931 г., на котором преобразованные эллипсы из экспериментов по уравниванию цвета по данным 14 наблюдателей [69, 73, 398] близки окружностям равного диаметра [415].

по шкалам ξ и η с ошибкой менее 24%. На этом криволинейном цветовом графике усредненные эллипсы уравнивания по цвету, определенные Мак Адамом [398], Брауном и Мак Адамом [69] и Брауном [73], приближаются к окружностям приблизительно одного и того же диаметра (не показанным на рис. 2.85). Не удалось полностью исключить остаточных различий между преобразованными эллипсами и идеальными окружностями одинакового диаметра. Вместе с тем для этих различий не обнаруживается каких-либо систематических тенденций. Это дает возможность предположить, что при использовании данного типа нелинейного преобразования был достигнут оптимум.

Рис. 2.84. Нелинейное преобразование цветового графика x, y МКО 1931 г., на котором эллипсы Мак Адама [398] близки окружностям равного диаметра [151].

1 — линии спектральных цветностей; 2 — линии пурпурных цветностей.



Мак Адам в [415] вывел выражение для преобразования следующего вида:

$$\begin{aligned} \xi &= 3751a_1^2 - 10a_1^4 - 520b_1^2 + 13295b_1^3 + 32327a_1b_1 - \\ &\quad - 25491a_1^2b_1 - 41672a_1b_1^2 + 10a_1^3b_1 - 5227a_1^{1/2} + 2952a_1^{1/4}, \\ \eta &= 404b_2 - 185b_2^2 + 52b_2^3 + 69a_2(1 - b_2^2) - 3a_2^2b_2 + 30a_2b_2^3, \quad (2.61) \end{aligned}$$

где

$$a_1 = \frac{10x}{2,4x + 34y + 1}$$

$$b_1 = \frac{10y}{2,4x + 34y + 1}$$

$$a_2 = \frac{10x}{4,2y - x + 1}$$

$$b_2 = \frac{10y}{4,2y - x + 1}$$

В этом преобразовании имеется большое число коэффициентов, отмечается наличие показателей степени для четырех параметров a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , принимающих значения от $1/4$ до 4, в результате преобразование сводится к довольно сложному численному выражению. Однако в наш век вычислительной техники на степень сложности численных выражений смотрят по-разному.

Криволинейный характер преобразования обуславливается показателями степени, отличными от единицы. Это также показано на рис. 2.85, на котором линии постоянных значений x и y искривлены. Между графиком Фарнворта на рис. 2.84 и графиком Мак Адама на рис. 2.85 наблюдается очевидное сходство. Фарнворт не выводил уравнений преобразования для своего графика, а построил его непосредственно.

Равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. и все другие проективные преобразования цветового графика МКО 1931 г. предназначены для прогнозирования воспринимаемых различий в цветности между парами равновесных стимулов. Как было показано выше, с помощью таких графиков это можно сделать только приблизительно. Другие нелинейные преобразования цветных графиков (x , y) МКО 1931 г., приводящие к криволинейным равноконтрастным цветовым графикам, в основном лучше проективных преобразований, однако менее удобны в работе, в то же время оба типа равноконтрастных цветных графиков применимы только к стимулам с равной светлотой и относительно высоким уровнем яркости, рассматриваемым в полях зрения не менее 1° .

Известно, что если стимулы очень слабы или малы по площади, то нормальный глаз может путать цвета, подобно лицам страдающим тританоопией в форме, представленной на рис. 2.14, г [4,

225, 333, 367, 438, 673]. Недавно значительное внимание было привлечено к объяснению того факта, почему нормальный глаз, возбужденный недостаточным по яркости или размеру стимулом, проявляет свойства, характерные для наблюдателя с частичной цветовой слепотой [680, 709].

Среди стимулов низкой интенсивности (например, сигнальные огни, воспринимаемые в виде точечных источников) нормальный глаз может только обнаружить разницу между красным и зеленым, а также между светлым и темным и перепутать дневной свет, представленный стандартным излучением D_{65} , с монохроматическим стимулом при длине волны 568 нм. Разумно предположить, что для малых неточечных полей из всех других монохроматических стимулов более всего похоже на дневной свет излучение стимула с длиной волны 568 нм. Это следует из равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г. (рис. 2.76) при нанесении на него цветности данного излучения, а также подтверждается результатами ранних работ Гилда [204] и Холмса [251]. Если мы захотим построить равноконтрастный цветовой график, пригодный для оценки различий в цветности темных стимулов и (или) их малых угловых размеров, необходимо главным образом сжать фиолетово-зелено-желтую ось равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г. В этом отношении представляет интерес работа Кларка, в которой он фактически предложил семейство равноконтрастных цветных графиков, применимых для предсказания различий по цветности при различных размерах полей [103].

КОМБИНИРОВАННЫЕ ШКАЛЫ СВЕЛОТЫ И ЦВЕТНОСТИ

Большинство из имеющих практическую ценность цветных различий включают в себя комбинацию различий по цветности и по светлоте. Таким образом, если цвету ткани гарантируется прочность при освещении солнечным светом в течение определенного времени, это означает, что ее цвет не изменится настолько, чтобы вызвать недовольство покупателя. Обычно при обесцвечивании ткань становится светлее и серее (так называемое однотонное обесцвечивание). Для того чтобы оценить значения комбинированных цветных различий, необходима трехмерная шкала. Под этим подразумевается набор образцов цвета, образующих такую трехмерную последовательность, в которой различия каждого цвета с его ближайшими соседями воспринимались бы одинаковыми. Мы знаем, как, удовлетворяя аналогичному требованию, расположить точки в пространстве. Такое расположение в виде правильной ромбоэдрической решетки показано на рис. 2.67. Но у нас еще нет набора образцов цвета, воспроизводящих равноконтрастную трехмерную цветовую шкалу. И действительно, мы уже рассматривали влияние различных факторов, таких, как

эффект волны. Этого достаточно, чтобы признать, что ни один набор цветов, охватывающих всю гамму, не будет восприниматься равномерно распределенным, за исключением, может быть, отдельных случаев в строго определенных условиях наблюдения. Количество точных решений, необходимых для установления равноконтрастности цветового пространства в трех измерениях для всего охвата цветов, не определено. Имеется около 10 миллионов определено различаемых цветов. Для проверки интервалов во всех направлениях цветового тела для разумного выбора образцов необходимо применять масштабный метод, используемый Комитетом по равноконтрастным цветовым шкалам Американского оптического общества [341, 344], или метод уравнивания цветовых различий, используемый Вышецким и Филдером [726, 734]. Следует порознь определять влияние многих параметров, связанных с условиями наблюдения, а именно: размера поля, яркости поля, коэффициента отношения яркостей поля и окружения, цветности окружения, индивидуальных особенностей наблюдателя, способа восприятия и т. д. Сложность этой проблемы обескураживает даже очень энергичного исследователя. Тем не менее исследования в этой области должны продолжаться, даже если в течение многих лет нельзя ожидать определенного ответа для всех возможных цветовых различий.

Тем временем продолжают возникать вопросы, касающиеся стойкости к свету данной ткани (пластмассы или бумаги) по сравнению с другой, принятой в качестве стандарта или соответствия поставляемой пластмассы стандартному образцу. В большинстве практических случаев избегают давать какой-либо определенный ответ. Просто контролеру приходится вспоминать, какая величина цветовых различий была приемлемой в его практике ранее, и использовать этот воображаемый стандарт. Не удивительно, что два контролера могут дать разные оценки, даже если они оба стараются быть беспристрастными.

Первым шагом в нужном направлении является стандартное различие, которое помогает обновить память контролера. Таким образом, при испытании на воздействие света, климатических условий, морской воды, стирки и т. д. как испытуемый, так и стандартный образцы делятся на две части. Затем одна часть испытуемого и стандартного образца проходит соответствующую проверку на воздействие климатических условий и стирки. Контролер сравнивает четыре части: по одной части испытуемого и стандартного до проверки и по одной части образца и стандарта после нее. Он должен решить о наличии большего или меньшего цветового различия между двумя частями стандартного образца (до проверки и после) по сравнению с различием между двумя частями испытуемого образца (до проверки и после). Это легче, чем проводить сравнение с чисто воображаемым стандартом, однако все же остается

возможность для различия во мнениях. Стандартный образец может не соответствовать испытуемому образцу по цвету, так что контролер должен еще решить: отличаются ли два синих по цвету так же, как два красных. Кроме того, образец и стандарт могут по-разному обесцвечиваться. Так, красный стандартный образец в основном может стать более светлым и менее насыщенным в соответствии с исчезновением части красителя, вызывающего красный цвет («однотоповое» обесцвечивание), в то время как синий образец может стать более красным и сероватым. Нахождение действительно правильного ответа на вопрос о том, различие какого цвета легче обнаружить, является небольшой исследовательской проблемой. Для ее решения необходимы несколько беспристрастных наблюдателей, а также необходимо обратить особое внимание на соблюдение предварительно согласованных стандартных условий наблюдения. Очевидно, что набор образцов, охватывающих все цвета, интервалы между которыми во всех направлениях будут восприниматься одинаковыми, должен обеспечить готовый ответ на эти практически важные вопросы. Даже если мы должны были смириться только с аппроксимацией идеальной трехмерной цветовой шкалы, состоящей из такого набора образцов, подобная аппроксимация окажется весьма полезной, обеспечив основу для принятия и занесения в контракт единого мнения продавца и покупателя по вопросу требований к цвету. Чтобы сформулировать такую аппроксимацию, необходимы ясные технические приемы. Следует подобрать некоторый цветовой график с приблизительно равноконтрастным распределением цветности и некоторую функцию коэффициента яркости, дающую приблизительно равноступенное распределение светлоты. Затем мы делаем своего рода предположение, каким образом их следует объединить, чтобы определить единицу цветового различия. Любое такое предположение может стать основой для соглашений по включению в контракт цветового допуска.

Первое подобное предположение было сделано Никкерсон при определении его показателя обесцвечивания [490]. В качестве исходного ею было принято пространство Манселла в том виде, каким оно было известно в те годы. Она рассчитала относительное значение одной ступени светлоты, одной ступени насыщенности и одной ступени цветового тона по Манселлу при насыщенности $1/5$ и сделала предположение, что воспринимаемость цветовых различий достаточно хорошо определяется взвешенной суммой составляющих (ΔH , ΔV , ΔC) по этим параметрам:

$$I_N = (C/5) (2\Delta H) + 6\Delta V + 3\Delta C. \quad (2.62)$$

Видно, что в этом определении одна ступень светлоты по Манселлу принимается равной по величине восприятия двум ступеням насыщенности по Манселлу и трем ступеням цветового тона по

Манселлу при насыщенности 5/. Основным преимуществом этой формулы для расчета величины воспринимаемого цветового различия является ее простота. Если для двух цветов известны обозначения в системе Манселла, то различия по цветовому тону, насыщенности и светлоте находят простым вычитанием и непосредственным расчетом значения I . Однако эта формула определяет сложную неэвклидову геометрию. Для цветов равной светлоты ($\Delta V = 0$) 100-ступенный цветовой круг Манселла ($\Delta H = 100$) при насыщенности $1/3$ ($\Delta C = 0$) соответствует $(2 \times 100)/(3 \times 5) = 40/3 = 13,3$ ступени обесцвечивания. Так как этот цветовой круг представляет лишь одну ступень изменения цвета ($\Delta C = 1/3$) от нейтрального, то количество ступеней цветового тона более чем вдвое превышает число ($2\pi = 6,28\dots$), представляющее количество равномерных интервалов на плоскости. Это требует для их представления использовать двумерную волнистую поверхность, несколько подобную предложенной Мак Адамом [401], о которой уже упоминалось ранее.

Строгая, но довольно сложная формула для элемента длины в эвклидовом пространстве, выраженная в цилиндрических координатах, использовалась Годловым при исследовании 350 красителей [186]. Недавно Джаддом [727] был преобразован показатель обесцвечивания по Годлову и выведена следующая формула цветовых различий:

$$\Delta E_{GM} = f_s \{ 2f_h C_1 C_2 [1 - \cos 3,6 (H_1 - H_2)] + (C_1 - C_2)^2 + 16 (V_1 - V_2)^2 \}^{1/2}, \quad (2.63)$$

где H , V и C — значения ренотации Манселла цветового тона, светлоты и насыщенности; $(H_1 - H_2)$ — различие по цветовому тону, выраженное в процентах по отношению ко всему цветовому кругу; $3,6 (H_1 - H_2)$ выражает тот же угол в градусах; f_h — весовой коэффициент и f_s — коэффициент, определяемый полем окружения. Для цвета поля окружения, равного приблизительно среднему из двух сравниваемых цветов, $f_h = 1$, $f_s = 3$. Для полей окружения от белого до средне-серого

$$f_h = \left\{ \frac{4}{[3 - \cos 3,6 (H_1 - H_2)]} \right\}^2, \\ f_s = \frac{15 + [\bar{C}^2 + 16 (\bar{V} - V_s)^2]^{1/2}}{5 + [\bar{C}^2 + 16 (\bar{V} - V_s)^2]^{1/2}},$$

где $\bar{V} = (V_1 + V_2)/2$, $\bar{C} = (C_1 + C_2)/2$ и V_s представляет светлоту по Манселлу серого или белого окружения. При $f_h = 1$, выражение переходит в формулу Годлова [186]. При изменении окружения от белого до средне-серого f_h увеличивает различия по цветовому тону вдвое по сравнению с значениями, определенными по фор-

муле Годлова. Коэффициент f_s выражает уменьшение воспринимаемой величины цветового различия, вызванного использованием окружения, отличающегося по цвету от среднего между двумя сравниваемыми цветами.

Применение формулы ΔE_{GM} (Годлова — Манселла) в соответствии с уравнением (2.60) на практике затрудняется тем фактом, что ренотацию Манселла необходимо определять по значениям координат цвета МКО с помощью пространственных таблиц или графиков и интерполяции. Для упрощения этой задачи были составлены программы для вычислительных машин. Однако, чтобы выполнить задачу достаточно быстро и точно, необходимы относительно обширные вычислительные средства.

При расчете приближительной величины воспринимаемых цветовых различий по другим формулам, в которых не используются цилиндрические координаты, имеется возможность обойти эту трудность. Формула Джадда основана на его треугольном равноконтрастном цветовом графике (табл. 2.18), объединенном со шкалой светлоты, в которой коэффициенты яркости распределены по закону квадратного корня (2.48).

Впоследствии формула цветовых различий Джадда была пересмотрена Хантером [267] на цветовом графике «альфа-бета» (табл. 2.12). Эта формула определяла единицу НБС цветового различия ΔE_{HBS} , она записывается в виде

$$\Delta E_{HBS} = f_s \{ [221\bar{Y}^{1/4} [(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2]^{1/2}]^2 + [k(\Delta Y^{1/2})]^2 \}^{1/2}, \quad (2.64)$$

где

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2}{2}, \\ \Delta Y^{1/2} = Y_1^{1/2} - Y_2^{1/2}, \\ \Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \\ \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2.$$

Параметры α и β определяются из табл. 2.18(4), а коэффициент k устанавливает взаимосвязь шкал светлоты и цветности.

Если сравнение производится через очень узкую линию раздела цветов (как в случае сравнения двух капель краски, расположенных рядом под предметным стеклом, или перекрывающихся полосок бумаги), то коэффициент светлоты k должен быть порядка 12. Если имеется узкая полоска раздела контрастирующего цвета (как в случае сравнения двух металлических пластинок с эмалевым покрытием), то уравнение (2.61) дает лучшее согласие с визуальной оценкой при k , равном 9 или 10. Чтобы получить хорошее согласие с визуальной оценкой при разделении сравниваемых

участков широкой полосой, необходимо уменьшить значение k до 3 или 4.

Коэффициент f_g учитывает маскирующее влияние глянцевой поверхности при обнаружении цветовых различий. Если определение коэффициента яркости Y координат цветности α, β проводится при освещении под углом 45° и наблюдениях перпендикулярно к поверхности, а визуальная оценка величины цветовых различий производится, как обычно, в комнате вблизи окна, то введение коэффициента f_g повышает корреляцию благодаря учету света, посылаемого в направлении глаза наблюдателя обоими образцами при зеркальном отражении от потолка и верхней части стен комнаты. Эти незначительные по величине отражения имеют тенденцию маскировать цветовое различие между образцами и уменьшают возможность его визуальной оценки. Коэффициент f_g (показатель глянца) определяется как $Y/(Y+K)$. Для обычной комнаты, в которой производится контроль, K необходимо положить равным примерно 2,5. Постоянная 221 является масштабным коэффициентом, устанавливая соответствие между величиной единицы НБС и коэффициентами яркости Y_1 и Y_2 , выраженными в процентах (т. е. по шкале от 0 до 100). Одна единица НБС соответствует приблизительно 0,10 ступени светлоты по Манселлу, 0,15 ступени насыщенности по Манселлу или $\sim 2,5$ ступеням цветового тона по Манселлу при насыщенности $/1$. Практически различия в 1 единицу НБС или меньше в расчет не принимаются. Единица НБС в течение многих лет являлась широко распространенной мерой оценки цветовых различий. Однако в последние годы в большинстве отраслей промышленности в качестве руководства используют предложения, сделанные МКО. Вскоре мы перейдем к этим предложениям.

Уравнение (2.64) не соответствует евклидову пространству, даже если величина $\Delta E_{\text{НБС}}$ рассчитывается как квадратный корень из суммы квадратов. Это происходит из-за наличия члена $\bar{Y}^{1/4}$, благодаря которому взвешивается длина отрезка на цветовом графике для оценки хроматической компоненты цветового различия. Если сравниваемые цвета близки по яркости ($\Delta Y \rightarrow 0$), то упомянутое уравнение приближается к евклидовой форме.

В 1943 г. Скофилд предложил модификацию уравнения (2.64) для оценки величины цветовых различий [593]:

$$\Delta E_s = [(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]^{1/2}, \quad (2.65)$$

где

$$\begin{aligned} L_1 &= 10Y_1^{1/2}, & L_2 &= 10Y_2^{1/2}, \\ a_1 &= 7L_1\alpha_1, & a_2 &= 7L_2\alpha_2, \\ b_1 &= 7L_1\beta_1, & b_2 &= 7L_2\beta_2. \end{aligned}$$

Эта формула проще уравнения (2.64), и для малых $L_1 - L_2$ она отличается от него лишь при оценке меньших значений различий в цветности темных цветов на величину $Y^{1/4}$. Однако для цветов, значительно различающихся по коэффициенту яркости Y , уравнения (2.64) и (2.65) в корне отличаются друг от друга.

В 50-е годы Хантер разработал фотоэлектрический прибор определения величины цветовых различий, который позволяет непосредственно с помощью электронных аналоговых устройств считать эту величину [268, 273]. Одна из формул Хантера имеет вид

$$E_x = [(\Delta L_x)^2 + (\Delta a_x)^2 + (\Delta b_x)^2]^{1/2}, \quad (2.66)$$

где

$$\begin{aligned} L_x &= 10Y^{1/2}, \\ a_x &= 17,5 \frac{1,02X - Y}{Y^{1/2}}, \\ b_x &= 7,0 \frac{Y - 0,847Z}{Y^{1/2}}, \end{aligned}$$

X, Y, Z являются координатами цвета в системе МКО исследуемых цветовых стимулов предмета.

Основное применение формулы Хантера осуществлялось совместно с измерителем цветовых различий Хантера, используемого для контроля цвета в процессе производства в различных отраслях промышленности.

В 1944 г. Никкерсон и Штульц исследовали несколько формул расчета цветовых различий [500]. Одна из них базировалась на цветовом графике Адамса [7] в совокупности со шкалой светлоты Манселла [уравнение (2.50)]. К первоначальному виду формулы предложенной Никкерсон и Штульцом [500], были подобраны различные масштабные коэффициенты [431—482]. Комитетом Международной организации по стандартизации, ответственным за измерение цвета в текстильной промышленности, экспериментально была рекомендована следующая формула [433]:

$$\Delta E_i(\text{АН40}) = [(\Delta L_{\text{АН}})^2 + (\Delta A)^2 + (\Delta B)^2]^{1/2}, \quad (2.67)$$

где

$$\begin{aligned} L_{\text{АН}} &= 9,2V_y, \\ A &= 40(V_x - V_y), \\ B &= 15(V_y - V_z), \end{aligned}$$

где V_y — функция ренотации светлоты по Манселлу, определяемая уравнением (2.50); V_x — ренотация светлоты по Манселлу,

определяемая тем же уравнением при замене Y/Y_{MgO} на X/X_{MgO} ; V_z — ренотация светлоты по Манселлу, определяемая аналогично при замене Y/Y_{MgO} на Z/Z_{MgO} . Когда измерения проводятся относительно окиси магния, принимая $Y_{MgO} = 100$, и относительно стандартного излучения С МКО, координаты цвета X_{MgO} , Y_{MgO} , Z_{MgO} являются координатами цвета стандартного излучения С МКО, т. е. $X_{MgO} = X_C = 98,071$, $Y_{MgO} = Y_C = 100$ и $Z_{MgO} = Z_C = 118,225$ (рассчитанных при значении интервалов длин волн 5 нм). Верхний конец шкал светлоты по Манселлу достигается при значениях $V_x = V_y = V_z = 10$ для белого цвета, представленного совершенным отражающим рассеивателем, координаты цвета которого (исходя из окиси магния) приблизительно равны $X_0 = 100,56$; $Y_0 = 102,57$; $Z_0 = 121,14$. В таблице В, помещенной в Приложении, приводятся значения X , Y , Z исходя из величин V_x , V_y , V_z в диапазоне от 0 до 10 с интервалом 0,01.

Необходимость громоздких таблиц для перевода координат цвета в значения V_x , V_y , V_z составляет некоторое неудобство при определении ΔE (АН 40), однако эту трудность вновь можно преодолеть, используя цифровую вычислительную машину.

Цветовой график Адамса, определяемый координатами A , B , явно исходит из нелинейного преобразования координат цвета X , Y , Z системы МКО 1931 г. Преобразование основано на теории зрения Адамса [6—8]. Имеется сомнение относительно того, привлечет ли эта теория внимание со стороны промышленности, хотя она находится среди самых перспективных из современных теорий зрения. То, что произвело впечатление на колориметристов, использующих цветовой график Адамса в промышленности, так это простота его определения и хорошее соответствие между распределением цветности на графике и в системе Манселла [492, 493].

Польза от уравнения (2.67), по крайней мере для частных случаев, неоднократно подтверждалась результатами исследований как в прошлом [182, 185, 186, 668], так и сравнительно недавно [297, 430, 459, 460].

Как было показано ранее при обсуждении равноконтрастных шкал светлоты, функция кубического корня довольно хорошо аппроксимирует полином пятой степени, определяющий ренотацию светлоты по Манселлу. Таким образом, можно надеяться, что цветовые различия, определенные с помощью одного из вариантов уравнения (2.67), использующего функцию кубического корня, будут очень близки цветовым различиям, полученным с помощью первоначального уравнения (2.67).

Формула с использованием кубического корня имеет следующий вид:

$$\Delta E (L^*a^*b^*) = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}, \quad (2.68)$$

где

$$L^* = 25 \left(\frac{100Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad (1 \leq Y \leq 100),$$

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

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

В этих уравнениях координаты цвета X_0 , Y_0 , Z_0 определяют цвет номинально белого цветового стимула. Обычно он задается спектральным распределением лучистой энергии одного из стандартных излучений МКО, например D_{55} или A , отраженной от совершенного отражающего рассеивателя и попадающей в глаз наблюдателя. При этих условиях X_0 , Y_0 , Z_0 тождественны координатам цвета используемого стандартного излучения с Y_0 , равным 100.

Следует отметить, что выражение для L^* [уравнение (2.68)] соответствует L^* из уравнения (2.51а), которое является небольшой модификацией уравнения (2.51) для W^* . В выражении для W^* константа 17 уменьшена до 16. Как уже отмечалось выше, это сделано для того, чтобы при $Y_0 = 100$ еще больше приблизить значение L^* к 100. Конечно, это незначительное изменение не влияет на вычисление цветовых различий.

Цветовые различия $\Delta E_1(L^*a^*b^*)$, рассчитанные для данных пар цветовых стимулов посредством уравнения (2.68), довольно хорошо соответствуют (в пределах нескольких процентов) цветовым различиям ΔE (АН40), рассчитанным для тех же пар цветовых стимулов с помощью уравнения (2.67), когда $\Delta E(L^*a^*b^*)$ постепенно уменьшается с постоянным коэффициентом 0,9.

Комитет по колориметрии МКО рекомендовал для изучения уравнение (2.68) [732]. Имеются некоторые признаки, что в недалеком будущем эта формула официально будет принята МКО, в частности, для определения цветовых различий больших, чем пороговые, но меньших, чем цветовые различия, приведенные в атласе Манселла.

Ранее комбинированные шкалы светлоты и цветности, использующие функции кубических корней, были предложены Глассером с сотр. [180], Фукуда с Фужи [168]. Относительная простота этих функций и определенный успех в предсказании равноконтрастных цветовых шкал способствовали их популярности. Несколько измененный вариант формулы цветовых различий, первоначально предложенной Глассером [180], одно время обсуждался в Комитете по колориметрии МКО [727]. Хотя эту формулу теперь можно заменить уравнением (2.68), приведенным выше, ее уместно привести здесь для читателей, желающих продолжить изучение этой проб-

лемы. Формула записывается в виде

$$\Delta E_{\text{КК}} = [(a'_1 - a'_2)^2 + (b'_1 - b'_2)^2 + (L'_1 - L'_2)^2]^{1/2}, \quad (2.69)$$

где

$$\begin{aligned} L' &= 25,29G^{1/3} - 18,38, \\ a' &= 106,0 (R^{1/3} - G^{1/3}), \\ b' &= 42,34 (G^{1/3} - B^{1/3}), \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} R &= 1,1084X + 0,0852Y - 0,1454Z, \\ G &= -0,0010X + 1,0005Y + 0,0004Z, \\ B &= -0,0062X + 0,0394Y + 0,8192Z. \end{aligned}$$

Координаты цвета R , G , B являются линейными преобразованиями координат цвета X , Y , Z . Они относятся к системе основных цветов \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} , которые можно интерпретировать как фундаментальные основные цвета, управляющие цветовым зрением (см. более раннее обсуждение теорий цветового зрения в гл. 1).

Работа Фриля [163, 164], в дальнейшем развитая Мак-Адамом [412] и Чиккерингом [92], привела к другой формуле цветовых различий, которую Комитет по колориметрии МКО также включил в свою рабочую программу [727].

Построена теория цветового зрения, в соответствии с которой обсужденные выше стандартные отклонения уравнивания по цвету могут быть адекватно описаны при условии, что дифференциальная чувствительность в визуальных процессах подчиняется закону Вебера — Фехнера. Предполагается, что рассматриваемые визуальные процессы содержат один процесс суммирования (светлота) и два противодействующих хроматических процесса (красное — зеленое и желтое — синее).

Когда слабый сигнал от одного рецепторного механизма оказывает сопротивление большему по величине сигналу от другого рецепторного механизма, то эффективный порог первого механизма ограничен «шумом» второго механизма. Пороги различных механизмов нельзя складывать, как независимые величины. Трехэтапная теория цветового зрения Мюллера [463] тесно связана с идеями Фриля [163].

На данную формулу расчета цветовых различий ссылаются как на формулу ФМЧ II (по первым буквам фамилий ее создателей Фриля, Мак Адама, Чиккеринга).

$$\Delta E (\text{ФМЧ II}) = [(\Delta C)^2 + (\Delta L)^2]^{1/2}, \quad (2.70)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta C &= K_1 \Delta C_1 & \text{и} & \Delta L = K_2 \Delta L_2, \\ \Delta C_1 &= \left[\left(\frac{\Delta C_{rg}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{yb}}{b} \right)^2 \right]^{1/2} & \text{и} & \Delta L_1 = \frac{(P\Delta P + Q\Delta Q)}{(P^2 + Q^2)^{1/2}}, \\ \Delta C_{rg} &= \frac{(Q\Delta P - P\Delta Q)}{(P^2 + Q^2)^{1/2}} & \text{и} & \Delta C_{yb} = \frac{S\Delta L_1}{(P^2 + Q^2)^{1/2}} - \Delta S, \\ \Delta L_2 &= \frac{0,279\Delta L_1}{a} \\ K_1 &= 0,55669 + 0,049434Y - 0,82575 \times 10^{-3}Y^2 + \\ &+ 0,79172 \times 10^{-5}Y^3 - 0,30087 \times 10^{-7}Y^4, \\ K_2 &= 0,17548 + 0,027556Y - 0,57262 \times 10^{-3}Y^2 + \\ &+ 0,63893 \times 10^{-5}Y^3 - 0,26731 \times 10^{-7}Y^4, \\ a^2 &= \frac{17,3 \times 10^{-6} (P^2 + Q^2)}{[1 + 2,73P^2Q^2/(P^4 + Q^4)]}, \\ b^2 &= 3,098 \times 10^{-4} (S^2 + 0,2015Y^2), \\ P &= 0,724X + 0,382Y - 0,098Z, \\ Q &= -0,48X + 1,37Y + 0,1276Z, \\ S &= 0,686Z, \end{aligned}$$

где X , Y , Z являются координатами цвета каждого из двух образцов цвета, между которыми рассчитывается различие, а ΔP , ΔQ , ΔS представляют собой величины различия между значениями P , Q и S этих же образцов.

Коэффициенты в этой довольно сложной формуле имеют оптимальные значения в том смысле, что ΔE (ФМЧ II) достаточно хорошо воспроизводит эллипсы уравнивания по цвету наблюдателя Мак Адама (рис. 2.79), когда коэффициент яркости Y поддерживается постоянным и равным 10,69 [95]. В таком случае результаты приблизительно соответствуют данным расчета по предложенной ранее формуле ФМЧ I, которая специально была разработана так, чтобы по возможности ближе соответствовать эллипсам Мак Адама [398].

Параметр K_1 был введен с конкретной целью моделирования предположения о том, что эллипсы уравнивания по цвету увеличиваются или уменьшаются в размерах в зависимости от коэффициента яркости Y так же, как и линии постоянной насыщенности по Манселлу в системе ренотации Манселла (рис. 2.62).

Параметр K_2 был введен для того, чтобы преобразовать различия в светлоте по Фрилю в различия в светлоте по Симону — Гудвину, принятые в графическом методе определения цветовых различий Симона — Гудвина [607].

Более простые выражения для K_1 и K_2 , до некоторой степени упростившие расчет ΔE (ФМЧ II) для данной пары цветов, были предложены Мак Адамом и Симоном [727]. Соответствующие выражения для K_1 и K_2 имеют вид:

$$K_1 = 0,054 + 0,46Y^{1/3},$$

$$K_2 = 0,465K_1 - 0,062.$$

Тот факт, что было разработано так много формул для расчета цветовых различий, без сомнения указывает на существующую в промышленности потребность в численном прогнозе величины воспринимаемых цветовых различий. Большое количество формул свидетельствует также о том, что сделанные на их основе прогнозы не всегда удовлетворяют исследователей. Это приводит к необходимости разработки новых формул в надежде, что они улучшат положение.

В конце 50-х годов комитет по колориметрии МКО приступил к рабочей программе, предназначенной для решения, по-видимому, неразрешимой проблемы достаточно точного расчета цветовых различий. Было установлено, что идеальной формулы для расчета цветовых различий не существует и что разработка такой формулы потребует еще много лет напряженных исследований. Однако в связи с настоятельной необходимостью решения этой проблемы было предложено принять временные критерии, которые позволили бы улучшить положение дел в этой области.

В качестве такого временного критерия МКО предварительно было рекомендовано использовать равноконтрастный цветовой график, первоначально предложенный Мак Адамом [397]. Этот график известен как равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. и довольно подробно был рассмотрен выше (рис. 2.76). Среди нескольких подобных графиков был выбран именно данный благодаря простоте преобразования из цветового графика (x, y) МКО 1931 г. и наличию ясных указаний на то, что он является хорошим представителем равноконтрастных цветовых графиков такого типа. Его рекомендуют использовать всякий раз, когда требуется цветовой график с более близким к равноконтрастному распределению цветности, чем у графика (x, y) МКО.

В 1964 г., основываясь на предложениях Выщецкого [724], МКО предварительно рекомендовала расширить равноконтрастный цветовой график МКО 1960 г. до трехмерного пространства. Рекомендуемое цветовое пространство именуется равноконтрастным цветовым пространством (U^*, V^*, W^*) МКО 1964 г. До разработки лучшей системы координат следует использовать координаты U^* , V^* , W^* , которые при нанесении на взаимно перпендикулярные оси образуют систему координат. Координаты U^* , V^* , W^* связаны с координатами цвета X, Y, Z следующими соотноше-

ниями:

$$\begin{aligned} U^* &= 13W^*(u - u_0), \\ V^* &= 13W^*(v - v_0), \\ W^* &= 25Y^{1/3} - 17 \end{aligned} \quad (1 \leq Y \leq 100). \quad (2.74)$$

где u и v определяются как

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z},$$

а u_0 и v_0 определяются аналогично

$$u_0 = \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}, \quad v_0 = \frac{6Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}.$$

Отметим, что u, v являются координатами равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г., рассмотренного ранее (рис. 2.76), а W^* представляет показатель светлоты, рассмотренный выше в связи с равноконтрастными шкалами светлоты.

Координаты цвета X_0, Y_0, Z_0 определяют цвет номинального белого цветового стимула предмета. Этот стимул обычно задается спектральным распределением лучистой энергии одного из стандартных излучений МКО, например D_{65} или A , отраженной совершенным отражающим рассеивателем в глаз наблюдателя. При этих условиях X_0, Y_0, Z_0 являются координатами цвета выбранного стандартного излучения и Y_0 становится равным 100.

Цветовое различие между двумя цветами в пространстве $(U^* Y^* W^*)$, определенном уравнениями (2.74), задается эвклидовым расстоянием. Формула имеет вид

$$\Delta E_{\text{МКО}} = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2}. \quad (2.72)$$

Эта формула называется формулой цветовых различий МКО 1964 г. Как указано выше, она была предложена комитетом по колориметрии МКО как попытка унифицировать разнообразные методы расчета цветовых различий, используемые в промышленности, помогая таким образом рассчитывать большинство тех различий, которые связаны с решением проблемы установления и описания цветовых допусков. В то время, когда вышла эта рекомендация, в различных колориметрических лабораториях использовалось около десятка, если не более, разных систем определения цветовых различий. Выше были приведены самые распространенные формулы. Такое разнообразие в работе нежелательно. Цветовые различия, полученные на основе одной формулы, трудно, если вообще возможно, интерпретировать на основе данных других формул [428]. Критерии цветовых различий, определенные различными формулами, по существу не сравнимы. Не следует пола-

гать, что простыми масштабными множителями можно преобразовать результаты расчета по одной формуле в результате расчета по другой, если только эти формулы в основном не идентичны по структуре и не содержат почти тех же самых коэффициентов. Однако могут быть найдены такие пересчетные множители, которые для данного ряда пар цветов устанавливают точное соответствие между средними значениями цветовых различий, определенных по разным формулам. Однако стандартное отклонение различий относительно среднего значения будет оставаться большим, тем самым иллюстрируя несравнимость этих формул.

Попытка МКО унифицировать разнообразные методы расчета цветовых различий имела ограниченный успех. Вскоре после временного принятия формулы цветовых различий МКО 1964 г. [уравнение (2.72)] некоторые работники промышленности отметили, что рекомендация МКО не привела к ожидаемым улучшениям в частных случаях их применения. Было предложено продолжить поиск улучшенных методов расчета цветовых различий и расширить рабочую программу комитета по колориметрии МКО.

В 1967 г. комитетом по колориметрии МКО была рекомендована подробная рабочая программа по изучению цветовых различий [727]. Программа содержала требование проведения новых экспериментов по визуальной оценке цветовых различий. В ней были приведены принципы, которыми следует руководствоваться при выборе используемых в экспериментальных работах условий наблюдения, с тем чтобы привести их в соответствие с обычной практикой визуального сравнения цвета в промышленности. Экспериментальные данные следует использовать не только для проверки формулы цветовых различий, временно рекомендуемой МКО в 1964 г. [уравнение (2.72)], но также трех других формул, рассматриваемых как возможные улучшения формулы МКО 1964 г. Три другие формулы были точно определены и приведены выше в виде уравнений (2.63), (2.69) и (2.70), описывающих формулу Годлова — Манселла, формулу кубического корня (модифицированный вариант формулы Глассера) и формулу ФМЧ II соответственно.

Рабочая программа 1967 г. комитета по колориметрии МКО и в дальнейшем стимулировала интерес к этой проблеме, особенно в отношении промышленного применения. Хотя наблюдается постоянный прогресс в направлении удовлетворительного решения этой проблемы, почти нет сомнений в том, что в настоящее время имеется значительно более глубокое понимание проблемы, чем когда-либо прежде. И это поддерживает наш оптимизм, что в конце концов удовлетворительное решение будет найдено. Успехи, достигнутые в этой области в период с 1964 по 1971 г., были обобщены Вышецки [730]. Его обзор охватывает результаты более 200 работ, выполненных в эти годы.

В 1971 г. комитет по колориметрии МКО развил свою деятельность дальше на основе своей рабочей программы 1967 г. с учетом некоторых последних разработок.

Подчеркивалось, что на проверку формул цветовых различий в промышленных условиях может оказать влияние тот факт, что цветовые различия обычно оцениваются с точки зрения критериев приемлемости, в то время как формулы для расчета цветовых различий разработаны на основе их зрительного восприятия. Комитет по колориметрии МКО настаивал на том, чтобы дальнейшие работы были направлены на воспринимаемость цветовых различий, а не на их приемлемость. Оценки приемлемости могут существенно меняться при переходе от одной области применения к другой. Более детально эта проблема будет обсуждена несколько позже.

Комитет по колориметрии МКО также указал, что имеется принципиальная разница между расчетами больших и малых цветовых различий. Иначе говоря, одна и та же формула не может применяться в обоих случаях. Поэтому было предложено, чтобы работа по воспринимаемости цветовых различий, больших, чем пороговые, но меньших, чем цветовые различия, типичные, например, для соседних образцов атласа Манселла, проводилась при следующих условиях:

Величина цветового различия. От 1 до 10 единиц при определении по формулам МКО 1964 г.

Размер поля. Угловой размер образцов должен равняться 4° или более. Ширина линии раздела между образцами должна приближаться к нулю.

Окружение. Поле окружения оцениваемых образцов должно быть равномерным и иметь цветность, эквивалентную цветности одного из стандартных излучений D МКО с цветовой температурой от 5500 до 7500 К.

Яркость образца. От 5 до 500% яркости окружения, однако интерес представляют только те условия, которые обеспечивают поверхностный метод восприятия оцениваемых образцов.

Наблюдатели. С нормальным цветовым зрением и способные оценить воспринимаемость цветового различия без какой-либо склонности к приемлемости.

Комитет по колориметрии МКО ожидает, что различные исследования, проведенные в соответствии с этими условиями наблюдения, дадут сопоставимые результаты и позволят выяснить причины довольно больших расхождений между различными формулами цветовых различий. В случае необходимости новые данные такого рода помогут также разработать модернизированный метод расчета цветовых различий, применимый к определенным условиям наблюдения.

В отношении более значительных цветовых различий с величиной, типичной для цветовых различий в атласе Манселла, комитет по колориметрии МКО принял точку зрения, что в этой области имеется достаточно экспериментальных данных. В частности Система ренотации Манселла и Правильная ромбоэдрическая решетка комитета по равноконтрастным цветовым шкалам Американского оптического общества являются теми совокупностями данных, которые необходимо сопоставить и детально изучить.

К другому классу данных по восприимчивости относятся эллипсы из экспериментов по уравниванию цвета, которые были рассмотрены выше (рис. 2.79). Строго говоря, эти данные применимы к цветовым различиям, меньшим порога восприимчивости. Всякий раз, когда наблюдатель устанавливал цветовое равенство между двумя половинками поля в визуальном колориметре, он, конечно, уменьшал цветовое различие между двумя стимулами до тех пор, пока его величина не станет слишком малой для того, чтобы ее можно было воспринять. Непостоянство его повторных показаний используется для оценки статистики порогового различия. Обычно предполагают, что стандартные отклонения повторных показаний, увеличенные почти в три раза, соответствуют пороговому различию, т. е. различию, которое наблюдатель может оценить как едва воспринимаемое. Так ли это, совершенно не ясно, и, строго говоря, эллипсы из экспериментов по уравниванию цвета должны относиться к подпороговым данным восприимчивости. Для того чтобы эти эллипсы представляли геометрические места точек, соответствующих едва воспринимаемым различиям, их нужно увеличить в размере. Чтобы перейти от едва воспринимаемых различий к средним или большим, их необходимо увеличить многократно. Это требует проведения дополнительной экспериментальной работы. В этом плане было выполнено несколько работ [113, 411, 421, 522], однако их результаты, по-видимому, не согласуются друг с другом и, таким образом, не являются убедительными.

В 1973 г. комитет по колориметрии МКО вновь подчеркнул необходимость проведения дополнительной экспериментальной работы по расчету цветовых различий в соответствии с рабочей программой, описанной выше. Однако комитет сделал еще один шаг вперед в своих рекомендациях по дальнейшему изучению формул цветовых различий. Он предложил уделить особое внимание двум формулам цветовых различий:

а) несколько модифицированный вариант формулы цветовых различий МКО 1964 г.;

б) вариант формулы Адамса — Никкерсон, учитывающий кубический корень.

Вариант формулы Адамса — Никкерсон, учитывающей кубический корень, определяется уравнением (2.65), а рассчитанные с его помощью цветовые различия даются как $\Delta E (L^*a^*b^*)$.

Модификация формулы цветовых различий МКО 1964 г., определяемой уравнением (2.72), вводится в систему координат U^* , V^* , W^* [уравнение (2.71)].

Предлагаемая модификация имеет вид

$$\begin{aligned} L^* &= 25 \left(\frac{100Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad (1 \leq Y \leq 100), \\ u^* &= 13L^* (u' - u'_0), \\ v^* &= 13L^* (v' - v'_0), \end{aligned} \quad (2.73)$$

где

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, & v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}, \\ u'_0 &= \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}, & v'_0 &= \frac{9Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}. \end{aligned}$$

Формула цветовых различий записывается как

$$\Delta E (L^*u^*v^*) = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}.$$

Предполагается, что уравнение (2.73) является усовершенствованным вариантом уравнений (2.71) и (2.72), определяющих пространство ($U^*V^*W^*$) и формулу цветовых различий МКО 1964 г. Отметим, что L^* из уравнения (2.73) соответствует L^* из уравнения (2.68) в пространстве ($L^*a^*b^*$) и является незначительной модификацией первоначального W^* [уравнение (2.51)].

Более существенное изменение в пространстве ($U^*V^*W^*$) МКО 1964 г., которое влияет на расчет цветовых различий, связано с координатой v цветового графика (u, v). В соответствии с предположением, сделанным Иствудом [145], выбирается новая координата v' , равная $1,5v$, поэтому $v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z)$ по сравнению с первоначальным значением $v = 6Y / (X + 15Y + 3Z)$. Координата u остается неизменной, т. е. $u' = u$. Эта модификация довольно простая по сравнению с теми модификациями, которые предлагались в последние годы, например в [574].

Если результаты предлагаемых исследований уравнений (2.68) и (2.73) будут благоприятны, можно предвидеть, что когда-нибудь в недалеком будущем МКО официально будет рекомендовать две формулы $\Delta (L^*u^*v^*)$ и $\Delta E (L^*a^*b^*)$ для обычного использования в промышленности.

Предполагается, что цветовое пространство, определенное координатами L^* , u^* , v^* , и связанная с ним формула цветовых различий $\Delta E (L^*u^*v^*)$ окажутся особенно полезными в отношении равноконтрастного расположения цветов, различия между кото-

рыми того же порядка, что и различия, например, в атласе Манселла.

Между шкалами цветности a^* , b^* пространства ($L^*a^*b^*$) и шкалой цветности u^* , v^* пространства ($L^*u^*v^*$) не существует простой зависимости. График (a^* , b^*) является криволинейной трансформацией цветового графика (x , y) МКО, а график (u^* , v^*) — проективной трансформацией, которая преобразует прямые линии на графике (x , y) МКО в прямые линии на графике (u^* , v^*).

Граница цветового тела предметов. Все представленные выше формулы цветовых различий предназначены для предсказания воспринимаемых цветовых различий между цветовыми стимулами предметов, которые на практике, несомненно, являются наиболее важными. Как мы видели выше, они включают реальные объекты, например кусочки тканей и образцы красок, рассматриваемые при излучении с определенным относительным спектральным распределением энергии. Обычно эти объекты не флуоресцируют, поэтому их спектральные коэффициенты отражения принимают значения в пределах от нуля до единицы (рис. 2.4).

В большинстве практических случаев излучение постоянно, например стандартное излучение D_{65} МКО, а воспринимаемые цветовые различия между двумя цветовыми стимулами предметов вызываются исключительно различиями между кривыми спектральных коэффициентов отражения двух наблюдаемых объектов. Различия между кривыми спектральных коэффициентов отражения приводят к различным координатам цвета (X_1, Y_1, Z_1) и (X_2, Y_2, Z_2) для двух цветовых стимулов предметов. Разности $\Delta X = X_1 - X_2$, $\Delta Y = Y_1 - Y_2$, $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ не дают подходящего критерия воспринимаемой величины цветового различия. Как мы уже узнали, для того чтобы получить такой подходящий критерий, необходимо преобразовать координаты цвета в новые координаты, например L^* , u^* , v^* , которые определяют равноконтрастное цветовое пространство. В этом пространстве каждый цвет снова представляется точкой, однако на этот раз расстояние ΔE между любыми двумя точками (L_1^*, u_1^*, v_1^*) и (L_2^*, u_2^*, v_2^*) прямо пропорционально воспринимаемому различию между двумя цветами, представленными этими двумя точками. В любом месте этого цветового пространства одно и то же расстояние ΔE соответствует одному и тому же воспринимаемому цветовому различию.

Разумеется, нам понятно, что ни одно из предложенных цветовых пространств, включая пространство, определяемое координатами L^* , u^* , v^* , не является совершенно равноконтрастным. Однако большинство из них, несомненно, более равноконтрастное, чем цветовое пространство (X, Y, Z). Возможно, идеальное равноконтрастное цветовое пространство никогда не будет установлено, однако в результате дальнейших исследований весьма

вероятно, что будут найдены гораздо лучшие к нему приближения, чем приближения, имеющиеся в настоящее время.

Ограничивая наше обсуждение цветовыми стимулами предметов, уместно рассмотреть, по крайней мере кратко, внешнюю границу цветового тела предметов. Большой частью внешняя граница не задается линией спектральных цветностей. Линия спектральных цветностей порождается монохроматическими стимулами отдельных узких полос длин волн, однако такие стимулы обычно не относятся к цветовым стимулам предметов.

Представим предмет с кривой спектрального коэффициента отражения, имеющей нулевые значения везде, за исключением узкой полосы длин волн от 450 до 455 нм, в пределах которой кривая принимает значения, равные, например, единице. В таком случае коэффициент яркости, рассчитанный для этого гипотетического предмета по отношению к стандартному излучению D_{65} МКО и стандартному наблюдателю МКО 1964 г., практически должен равняться нулю. Рассматриваемый на белом фоне предмет должен выглядеть черным, а не сине-зеленым, как можно было бы предположить исходя из значений длин волн от 450 до 455 нм.

Кривые спектральных коэффициентов отражения реальных предметов, которые, как можно увидеть, отличаются от нуля, должны иметь ненулевые значения в важных участках видимого спектра. Это в свою очередь приводит к таким точкам цветности для этих цветовых стимулов предметов, которые обычно попадают в пределы линии спектральных цветностей.

Особый интерес представляют те кривые спектральных коэффициентов отражения, которые для данного излучения и наблюдателя дают точки цветности, максимально приближающиеся к линии спектральных цветностей для фиксированных значений коэффициента яркости. Ранее мы уже встречались с тем (смотри обсуждение системы ренотации Манселла, рис. 2.62), что кривые спектральных коэффициентов отражения должны иметь нулевые значения в некоторых участках спектра и равняться единице в остальных при наличии не более двух переходов от нуля к единице. Предметы с такими кривыми спектральных коэффициентов отражения представляют собой теоретический предел нефлуоресцирующих предметов. При освещении данным источником они обеспечивают то, что мы назвали оптимальными цветовыми стимулами. Для данного коэффициента яркости и доминирующей (или дополнительной) длины волны они имеют максимально возможную условную чистоту, иначе говоря, ближе всех подходят к линии спектральных цветностей. Линию цветности таких оптимальных цветовых стимулов иногда называют пределами Мак Адама.

На рис. 2.86 и 2.87 представлено цветовое тело предметов и теоретическая внешняя граница для систем координат (L^* , u^* , v^*) и (L^* , a^* , b^*) соответственно. В обоих случаях используются

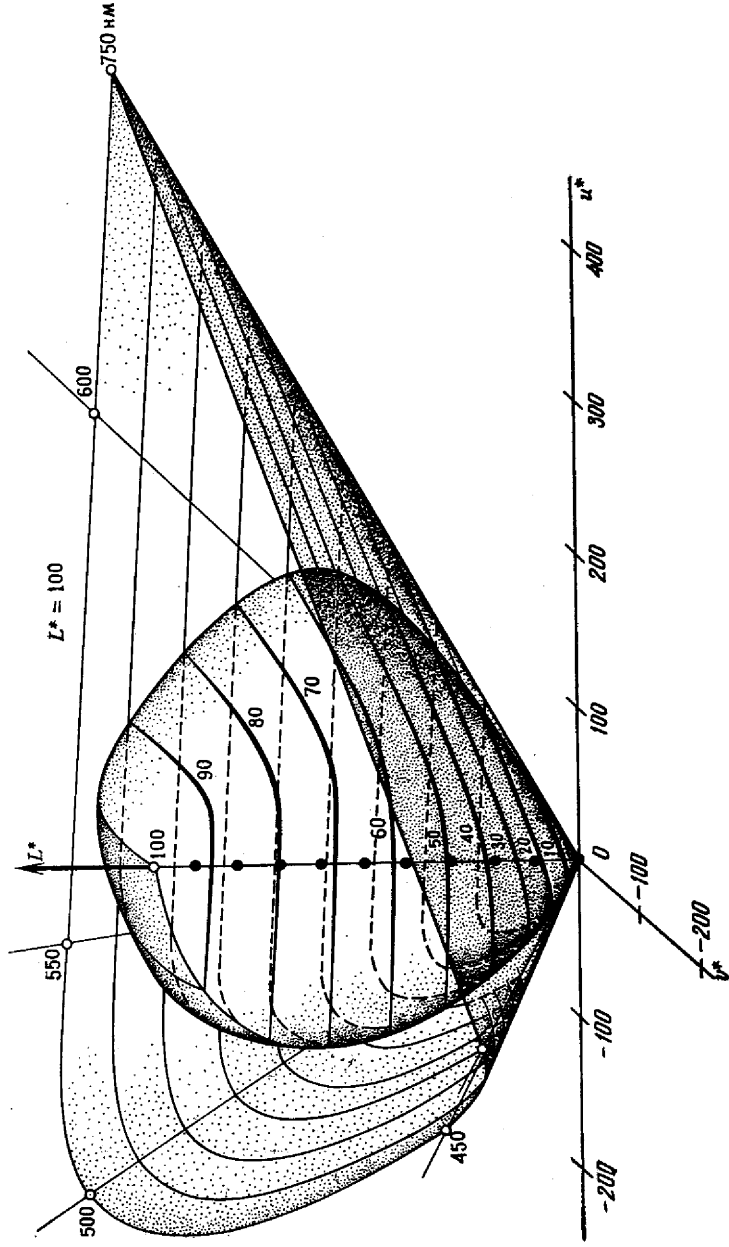


Рис. 2.86. Схематическое изображение цветового пространства предметов (L^* , u^* , v^*) с внешней границей, образованной оптимальными цветовыми стимулами по отношению к стандартному наблюдателю D_{65} МКО и дополнительно стандартному наблюдателю МКО 1964 г.

Цвета всех цветовых стимулов попадают в пределы этой границы. Она представляет собой также охват, в пределах которого предполагается справедливой формула цветовых различий $\Delta E(L^*, u^*, v^*)$ [уравнение (2.73)]. Отметим, что геометрическое место точек монохроматических стимулов обычно лежит вне границы цветовых стимулов предметов.

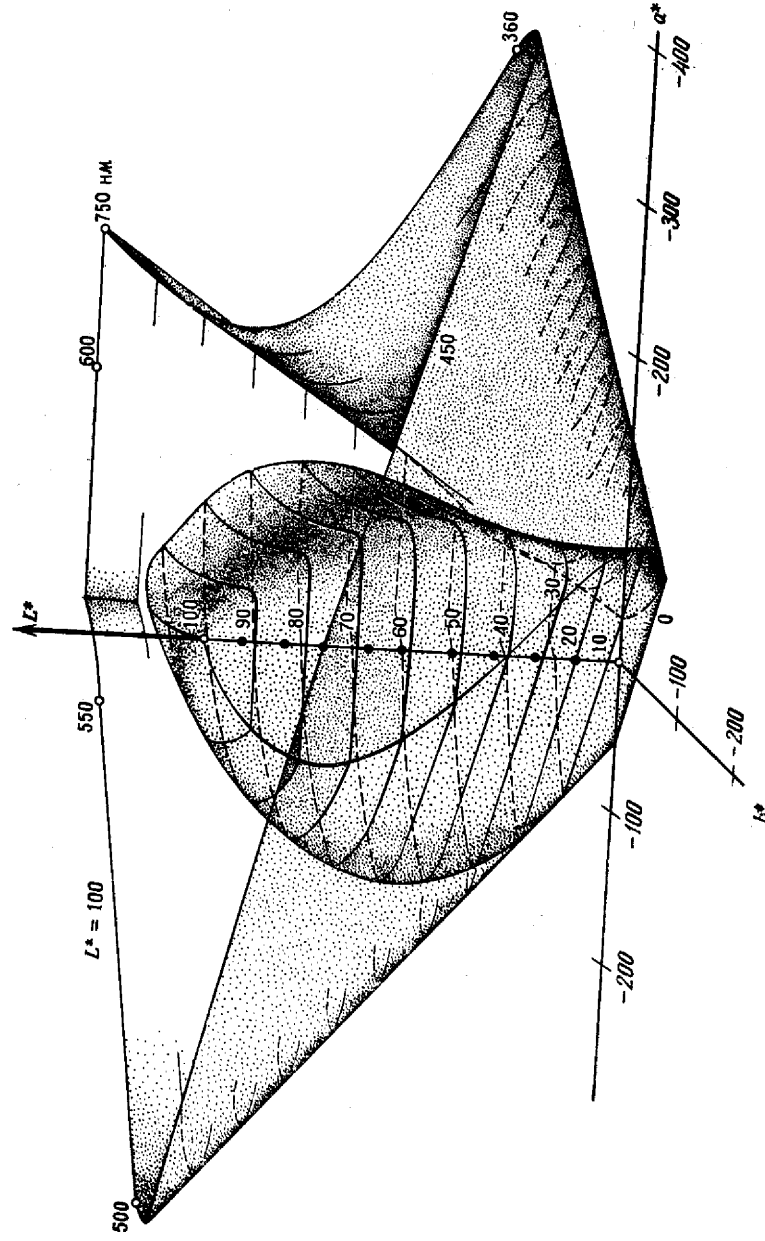


Рис. 2.87. Схематическое представление цветового пространства предметов (L^* , a^* , b^*) с внешней границей, образованной оптимальными цветовыми стимулами по отношению к стандартному наблюдателю D_{65} МКО и дополнительно стандартному наблюдателю МКО 1964 г.

Цвета всех цветовых стимулов попадают в пределы этой границы. Она представляет собой также охват, в пределах которого предполагается справедливой формула цветовых различий $\Delta E(L^*, a^*, b^*)$ [уравнение (2.68)]. Отметим, что геометрическое место точек монохроматических стимулов обычно лежит вне границы цветовых стимулов предметов.

стандартное излучение D_{65} МКО и дополнительный стандартный наблюдатель МКО 1964 г. Следует отметить, что охват цветов предметов, ограниченный теоретической границей, определяемой оптимальными цветовыми стимулами, значительно меньше, чем охват, ограниченный монохроматическими стимулами, которые, если должны выглядеть отличными от черного, относятся к самосветящимся предметам. Формулы цветовых различий $\Delta E (L^*u^*v^*)$ [уравнение (2.73)] и $\Delta E (L^*a^*b^*)$ [уравнение (2.68)] применяются только к цветам предметов, и в этих цветовых пространствах линия спектральных цветностей не представляет большого интереса.

Линейные элементы. Несколько последних страниц были посвящены подробному обсуждению проблемы равноконтрастности цветового тела. Были описаны эксперименты по созданию одно-, двух- и трехмерных примерно равноконтрастных цветовых шкал и обсуждены встречающиеся трудности при разработке таких шкал. Также были рассмотрены различные попытки предсказания величины цветовых различий, воспринимаемых обычным наблюдателем. Большинство этих попыток основано на некоторой приблизительно равноконтрастной цветовой шкале и выражается посредством эмпирической формулы цветовых различий. На протяжении этого обсуждения подчеркивались в основном практические стороны этой проблемы и лишь иногда приводились некоторые теоретические аспекты. Теперь мы закончим наше обсуждение кратким рассмотрением некоторых теоретических, а также и экспериментальных аспектов, являющихся наиболее фундаментальными при решении проблемы равноконтрастного цветового пространства.

Исследование цветового пространства означает разработку геометрии цветового пространства, основанную на результатах наблюдений. Экспериментальные доказательства, собранные многими исследователями в течение более 100 лет, показывают, что цветовое пространство трехмерно. Этот основной факт подкрепляется данными по уравниванию цветов и сформулирован в законах Грассмана. Он также подтверждается психологическими характеристиками цвета, которые, например, используют три психологических свойства — цветовой тон, насыщенность по Манселлу и светлоту. Если даны три такие независимые друг от друга характеристики (или параметра, или координаты), мы можем построить многообразие цветов в трехмерном пространстве, представляя каждый цвет отдельной точкой или вектором. Размер и форма полученного цветового пространства будут зависеть от выбора координат и способа ориентации их относительно друг друга. Однако простое построение многообразия цветов не дает какой-либо информации о присущих многообразию свойствах, за исключением того факта, что оно трехмерно.

Под присущими свойствами мы понимаем такие свойства, которые не зависят от компоновки системы координат и тем самым от любого преобразования, которое можно использовать для превращения данного цветового тела в иное, другого размера и формы. Наиболее фундаментальным присущим свойством цветового пространства является различие между двумя цветами, которое обычный наблюдатель может воспринять при определенных условиях наблюдения (размер поля, окружение, разделение образов и т. д.). Особый интерес представляет одно очень небольшое различие, которое наблюдатель может назвать «едва воспринимаемым» и «едва заметным». Этот интерес обусловлен тем, что это различие может служить основной единицей критерия для любых цветовых различий большего размера. Цветовое различие можно описать как функцию координат двух цветов, представляющих это различие. Обычно полагают, что если это различие является едва воспринимаемым, то оно может выражаться в виде точного квадратичного выражения:

$$\begin{aligned} (ds)^2 = & g_{11} (dU_1)^2 + g_{22} (dU_2)^2 + \\ & + g_{33} (dU_3)^2 + 2g_{12} dU_1 dU_2 + \\ & + 2g_{23} dU_2 dU_3 + 2g_{31} dU_3 dU_1. \end{aligned} \quad (2.74)$$

В этом уравнении ds представляет едва воспринимаемое различие между двумя цветами, которые заданы координатами (U_1, U_2, U_3) и $(U_1 + dU_1, U_2 + dU_2, U_3 + dU_3)$. Коэффициенты $g_{11}, g_{22}, \dots, g_{31}$ являются функциями U_1, U_2, U_3 , т. е. зависят от положения первого цвета в цветовом пространстве. Геометры называют уравнение (2.74) общим выражением для расстояния или линейного элемента трехмерного риманова пространства, более знакомого нам. Обычное или евклидово пространство, которое является более привычным для нас, относится к особой форме более общего риманова пространства. В евклидовом пространстве с прямоугольными координатами линейный элемент получается из уравнения (2.74), если положить $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$ и $g_{12} = g_{23} = g_{31} = 0$. Отсюда следует, что $(ds)^2$ является просто суммой квадратов разностей координат, т. е.

$$(ds)^2 = (dU_1)^2 + (dU_2)^2 + (dU_3)^2. \quad (2.75)$$

Говорят, что линейный элемент, заданный уравнением (2.74), представляет собой метрику трехмерного равноконтрастного цветового пространства. Если метрические элементы $g_{11}, g_{22}, \dots, g_{31}$ заданы как функции координат (U_1, U_2, U_3) , мы можем определить величину различий между любыми двумя цветами в цветовом пространстве. Большое цветовое различие ΔS может измеряться наименьшим числом едва воспринимаемых различий ds , необходимых для перехода от одного цвета к другому. Гео-

метр делает это путем интегрирования линейного элемента ds вдоль так называемой геодезической линии, начиная с первого цвета и кончая вторым. Геодезическая линия является кратчайшим путем перехода от одной точки пространства до другой. Конечно, в евклидовом пространстве геодезические линии являются прямыми, а в римановом они обычно искривлены, если смотреть на них с точки зрения евклидовой геометрии.

Возникает вопрос, можем ли мы отобразить трехмерное риманово пространство с данным линейным элементом ds в трехмерное евклидово пространство и в то же время сохранить равенство расстояний. Другими словами, возможно ли ввести данное риманово пространство трех измерений в евклидово пространство, также являющееся трехмерным? Геометры говорят, что обычно это невозможно. Геометрическая теорема утверждает, что если количество измерений в римановом пространстве равно n , то необходимое число измерений в евклидовом пространстве, включающем риманово пространство, равно

$$m = \frac{n(n+1)}{2}. \quad (2.76)$$

Таким образом, трехмерное риманово пространство ($n = 3$) в общем случае нельзя включить в евклидово пространство менее чем с $m = 6$ измерениями [603]. Мы обсуждали пример для двумерного случая ($n = 2$) в связи с данными Мак Адама по распределению цветности (рис. 2.82). Тогда возникла необходимость в трехмерном евклидовом пространстве ($m = 3$), чтобы в него можно было включить двумерное риманово пространство Мак Адама. Характерным свойством пространства, непосредственно отвечающим за эту взаимосвязь, является гауссова кривизна пространства. Для того чтобы отобразить одно пространство в другое, сохраняя расстояния неизменными, необходимо и достаточно, чтобы оба пространства имели одну и ту же гауссову кривизну. Гауссова кривизна евклидова пространства везде равна нулю. Это означает, что если кривизна равноконтрастного цветового пространства оказывается отличной от нуля, то невозможно его отобразить в трехмерное евклидово пространство без искажений и разрывов. Чтобы избежать искажений и разрывов, необходимо использовать евклидово пространство более трех измерений, возможно, шести (2.76). Однако это, разумеется, имеет чисто теоретический интерес. Из-за отсутствия возможности представить трехмерную модель равноконтрастного цветового пространства, нам следует довольствоваться ее математическим описанием при помощи линейного элемента ds , однозначно определенного шестью метрическими коэффициентами $g_{11}, g_{22}, \dots, g_{31}$.

Гельмгольц первым попытался вывести линейный элемент ds в виде уравнения 2.74 [232]. Он объединил закон Вебера с трех-

компонентной теорией зрения. Закон Вебера (иногда называемый законом Фехнера или законом Вебера — Фехнера) утверждает, чтобы быть чуть-чуть светлее, яркость одного светового пятна должна быть больше яркости другого светового пятна на некоторую постоянную часть яркости. Если яркость одного светового пятна равна L , а другого $L + dL$, где dL — едва заметное различие, отношение dL/L будет постоянным. Гельмгольц полагал, что этот закон одинаково применим независимо к каждой из трех реакций колбочек R, G, B , управляющих зрительным процессом (см. обсуждение теорий цветового зрения в гл. 1). При достаточно высоких уровнях яркости линейный элемент Гельмгольца имеет следующий вид:

$$3(ds)_{\text{Гельм}}^2 = \left(\frac{dR}{R}\right)^2 + \left(\frac{dG}{G}\right)^2 + \left(\frac{dB}{B}\right)^2. \quad (2.77)$$

Реакции колбочек R, G, B относятся к фундаментальным цветам и могут быть связаны с координатами цвета X, Y, Z МКО простым линейным преобразованием (1.18). Гельмгольц проверял свой линейный элемент, предсказывая едва заметные различия в ощущении цветности спектральных цветов и сравнивая свои результаты с измерениями Кёнига и Дитеричи [368]. Согласие было весьма удовлетворительным. К тому же, чтобы достичь такого согласия, необходимо было без доказательств принять фундаментальную систему основных цветов, что совершенно неразумно с точки зрения физиологии. Каждая из трех спектральных функций, соответствующих этим основным цветам, имела два явно выраженных максимума, что противоречит данным Кёнига. Кроме того, Шредингером [588, 589] было показано, что функция относительной спектральной световой эффективности (рис. 1.2, колбочки) для согласия с линейным элементом Гельмгольца должна иметь два максимума.

Попытка Шредингера вывести усовершенствованный линейный элемент в основном сохраняет линейный элемент Гельмгольца, но вводит дополнительное понятие, касающееся концепции цветов одинаковой светлоты, но разной цветности [589]. Согласно Шредингеру, светлота двух световых пятен кажется одинаковой, если любое изменение яркости одного из них увеличивает минимальное число едва заметных цветовых различий, необходимых для перехода от одного цвета к другому. Выше было показано, что минимальное число едва заметных цветовых различий между двумя любыми цветами (1) и (2) определяется интегрированием ds по геодезической линии, соединяющей цвета (1) и (2). Таким образом, если путем регулирования яркости интеграл $\int_{(1)}^{(2)} ds$ сводится к минимуму для двух данных цветностей (1) и (2),

то говорят, что по Шредингеру у этих цветов одинаковая светлота. Чтобы не противоречить закону Эбнея, по которому светлота является аддитивным параметром света, Шредингер предполагает, что светлота пропорциональна линейной комбинации координат цвета, относящихся к основным цветам в цветовом зрении. Иначе говоря, он предполагает, что для идентичных окружений светлота пропорциональна яркости. В окончательном виде линейный элемент Шредингера записывается как

$$(ds)_{\text{Шр}}^2 = \frac{1}{h} \left[\frac{a_1}{R} (dR)^2 + \frac{a_2}{G} (dG)^2 + \frac{a_3}{B} (dB)^2 \right], \quad (2.78)$$

где светлота h определяется следующим образом:

$$h = a_1 R + a_2 G + a_3 B.$$

Этот линейный элемент также был проверен, однако его оказалось недостаточно для удовлетворительного предсказания некоторых экспериментальных данных [52, 560].

Другой вариант линейного элемента Гельмгольца был предложен Стайлсом [626]. Вариант основан на обширных экспериментах Стайлса по двухцветным порогам [625]. Его результаты показали, что в случае трех различных реакций колбочек необходимо использовать разные отношения $\Delta L/L$ Вебера, а не одинаковые, как предлагал Гельмгольц. Линейный элемент Стайлса имеет вид

$$(ds)_{\text{Ст}}^2 = \left[\frac{\xi(R)}{\rho} dR \right]^2 + \left[\frac{\xi(G)}{\gamma} dG \right]^2 + \left[\frac{\xi(B)}{\beta} dB \right]^2, \quad (2.79)$$

где функции $\xi(R)$, $\xi(G)$, $\xi(B)$ приблизительно задаются в виде

$$\xi(R) = \frac{9}{1+9R}, \quad \xi(G) = \frac{9}{1+9G}, \quad \xi(B) = \frac{9}{1+9B}.$$

Значения ρ , γ , β пропорциональны предельным значениям отношений Вебера для трех светочувствительных колбочковых механизмов при высоких уровнях яркости и равны

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 = 0,612, \quad \left(\frac{1}{\gamma}\right)^2 = 0,369, \quad \left(\frac{1}{\beta}\right)^2 = 0,019.$$

Реакции колбочек связаны с координатами цвета X , Y , Z МКО следующим линейным преобразованием:

$$\begin{aligned} R &= 661,0X + 1260,0Y - 112,0Z, \\ G &= -438,0X + 1620,0Y + 123,0Z, \\ B &= 0,708X + 417,0Z. \end{aligned}$$

При высоких значениях яркости линейный элемент Стайлса принимает следующий вид:

$$(ds)_{\text{Ст}}^2 = \left(\frac{dR}{\rho R}\right)^2 + \left(\frac{dG}{\gamma G}\right)^2 + \left(\frac{dB}{\beta B}\right)^2, \quad (2.80)$$

который более непосредственно характеризует взаимосвязь между первоначальным линейным элементом Гельмгольца и его модификацией. Стайлс проверил свой линейный элемент, используя его при расчетах едва заметных ступеней цветности вдоль линий спектральных цветов, функции постепенного изменения световой эффективности и эллипсов цветоразличения типа Мак Адама на цветовом графике (x, y) МКО 1931 г. Некоторые характерные особенности экспериментальных данных точно предсказываются с помощью этого линейного элемента. Даже эллипсы Мак Адама (рис. 2.79) демонстрируют большое сходство с предсказанными эллипсами (рис. 2.80). Однако между римановым пространством, описываемым линейным элементом Стайлса, и пространством, определяемым эллипсами Мак Адамса, имеется существенное различие. Оба пространства обладают различной гауссовой кривизной. Кривизна цветового пространства Стайлса везде отрицательная, а пространство Мак Адама в различных областях меняет кривизну с отрицательной на положительную. Теоретически различие в гауссовой кривизне имеет большое значение, так как показывает, что пространство Мак Адама не совместимо с пространством Стайлса, т. е. что оба пространства не могут быть отображены одно в другое без искажений и разрывов. Однако Вышецким и Филдером было отмечено, что существенное влияние на расчетную кривизну может оказать характерное несоответствие экспериментальных данных, на которых основаны эллипсы по уравнению цвета [733]. По-видимому, фактическая гауссова кривизна, например, пространства Мак Адама может совершенно отличаться от кривизны, предсказанной 25 эллипсами Мак Адама, каждый из которых вносит погрешности в результаты наблюдения, которыми не следует пренебрегать. Действительно, в нашем более раннем обсуждении криволинейных цветовых графиков (рис. 2.84 и 2.85) было показано, что можно отобразить эллипсы Мак Адама в плоскость (с нулевой гауссовой кривизной), переводя их в почти идеальные окружности равного диаметра. Отклонения от круглой формы вполне приемлемы и, вероятно, могут объясняться характерным несоответствием, присущим результатам наблюдений.

Стайлс показал, что теоретически возможно распространить понятие риманова линейного элемента на четыре и более независимых рецепторов [629], хотя до сих пор сохраняется процесс уравнивания по цвету при помощи смешения трех основных цветов. Однако до сих пор за этим интересным предложением не последовало дальнейших теоретических и экспериментальных работ.

Результаты экспериментальных исследований Мак Адама, Брауна, Вышецкого и Филдера [69, 73, 398, 733] являются веским аргументом в пользу линейного элемента типа, описанного уравнением (2.74), хотя они и не дают окончательного ответа на этот

вопрос [113, 386, 522]. Цветовые равенства, полученные на трехцветном колориметре, соответствуют нормальному распределению трех переменных [71, 605]. Если принять нормальное распределение за истинное, то из этого следует, что точно установленная часть всех цветов, найденная для уравнивания с данным цветовым центром, должна по предположению лежать в пределах определенного эллипсоида в координатном цветовом пространстве. В таком случае это приводит к заключению, что линейный элемент цветового пространства должен быть риманова типа [604]. Найденные коэффициенты для этого эллипсоида соответствуют метрическим коэффициентам $g_{11}, g_{22}, \dots, g_{31}$ линейного элемента и зависят от координат центра цвета. Чтобы получить метрические коэффициенты для всего охвата реальных цветов, необходимо выбрать большое число центральных цветов и непосредственным измерением определить для каждого из них соответствующие метрические коэффициенты. На основе этих данных можно подготовить графики или таблицы для обеспечения возможности интерполяции метрических коэффициентов для других центров цвета, следуя, например, методу Мак Адама для его двумерного случая цветов одинаковой яркости [400].

Линейный элемент Фриля [163, 164], усовершенствованный в дальнейшем Мак Адамом [412] и Чиккерингом [92], был выведен исходя из трехэтапной теории цветового зрения Мюллера. Эта теория обсуждалась выше в связи с формулами цветовых различий и ее математической формой, приведенной в уравнении (2.70).

Вос и Волравен [670—672] предложили линейный элемент, основанный на теории зональных флуктуаций зрения [683—685]. В соответствии с этой теорией цветовые стимулы сначала обрабатываются в нейтральной зоне преобразования типа Гельмгольца, в которой формируются сигнал светлоты и два противоположных сигнала (красное — зеленое, желтое, синее). Предполагается, что цветоразличие в основном ограничивается фотонным шумом. При более высоких яркостях различие цветов уменьшается вследствие помех, связанных с насыщением процесса цветоразличения.

Большинство предположений, лежащих в основе разработки линейного элемента, основаны на экспериментальных данных, собранных из различных источников.

Численное выражение для линейного элемента Воса — Волравена в его наиболее общем виде довольно сложное, однако оно приводится к более удобному цифровому виду при применении его к конкретным данным прогнозирования зрительного цветоразличения.

В частном случае предсказания эллипсов различения типа Мак Адама (при постоянной яркости) линейный элемент Воса — Вол-

равена принимает следующий вид:

$$(ds)^2 = f_{RG} (\alpha_G dR + \alpha_R dG)^2 + f_{YB} (\alpha_B + \alpha_Y)^2 (dR + dG)^2, \quad (2.81)$$

где

$$f_{RG} = \frac{(G/\beta_G) + (R/\beta_R)}{[(\alpha_G/\beta_G) + (\alpha_R/\beta_R)]^2 \beta_Y \beta_G R G},$$

$$f_{YB} = \frac{(B/\beta_B) + (Y/\beta_Y)}{[(\alpha_B/\beta_B) + (\alpha_Y/\beta_Y)]^2 \beta_Y \beta_B Y B}$$

при

$$\alpha_R = R \left(1 + \frac{R}{R_0} \right), \quad \beta_R = \left(1 + \frac{R}{R_0} + \frac{R^3}{R_1^3} \right),$$

$$\alpha_G = G \left(1 + \frac{G}{G_0} \right), \quad \beta_G = \left(1 + \frac{G}{G_0} + \frac{G^3}{G_1^3} \right),$$

$$\alpha_Y = Y \left(1 + \frac{Y}{Y_0} \right), \quad \beta_Y = \left(1 + \frac{Y}{Y_0} + \frac{Y^3}{Y_1^3} \right),$$

$$\alpha_B = B \left(1 + \frac{B}{B_0} \right), \quad \beta_B = \left(1 + \frac{B}{B_0} + \frac{B^3}{B_1^3} \right).$$

Величины R, G, B являются координатами цвета в системе, базирующейся на основных цветах цветового зрения. Они линейно связаны с координатами цвета, полученными при визуальном сложении цветов. Координата цвета Y определяется как

$$Y = R + G.$$

Константы R_0, G_0, B_0, Y_0 и R_1, G_1, B_1, Y_1 представляют собой уровни перегрузки зрительной системы. Они связаны с плотностью распределения рецепторов. Если принять B_0 равным 1, то значения остальных констант равны $R_0 = 40, G_0 = Y_0 = 20, R_1 = 80, G_1 = Y_1 = 40, B_1 = 2$.

Уравнение (2.81) достаточно хорошо описывает эллипсы Мак Адама, если учесть неустойчивость, присущую экспериментальным данным, на которых базируются эти эллипсы.

Конечно, линейный элемент является разновидностью формулы цветового различия. Подобно формулам цветового различия, линейный элемент базируется на концепции, что воспринимаемые цвета могут быть представлены точками в трехмерном пространстве. Задача заключается в измерении расстояний в этом пространстве, которые соответствуют воспринимаемым различиям между цветами. Поэтому можно было называть рассмотренные выше линейные элементы формулами цветовых различий. Однако для удобства различают линейные элементы и формулы цветовых различий. В большинстве случаев формулы цветовых различий предполагают, что пространство цветового восприятия является евклидовым или близким к нему, в то время как линейные эле-

менты могут использоваться даже без такого предположения. В самом деле, все линейные элементы, играющие важную роль в науке о цвете, относятся к пространству риманова типа (2.74). Для формулировки линейных элементов используются результаты измерений порогов и стандартные отклонения по уравниванию цвета. В основе формул цветового различия лежат наблюдения малых, но не пороговых различий. Большинство формул предлагается для расчета как больших, так и меньших по величине цветовых различий.

Читателям, желающим разобраться более подробно в применении линейных элементов в науке о цвете, чем это можно предложить в данной книге, рекомендуем обратиться к книге Выпецкого и Стайлса [736].

Формулы белизны. Для оценки белизны материалов были использованы общие представления, лежащие в основе формул цветовых различий.

Белизна является психологическим свойством цветового стимула. Белый цветовой стимул воспринимается свободным от какого-либо цветового оттенка и серости. Охват белых и близких к белым цветов в пространстве цветового восприятия зависит от условий наблюдения, однако обычно он очень мал по сравнению со всем охватом воспринимаемых цветов [252, 279—281].

В качестве рабочего определения белизну можно характеризовать таким свойством рассеивающей поверхности, которое указывает на ее сходство по цвету с некоторым стандартным белым цветом или предпочтительным белым цветом [272]. В большинстве исследований, выполненных с целью оценки белизны промышленных изделий (бумаги, текстильных изделий и т. д.), использовали это определение. Цель этих исследований заключалась в получении численных значений белизны [20, 41, 114, 162, 167, 170, 174, 200, 220, 272, 274, 275, 395, 407, 452, 596, 599, 623, 653, 644].

Показатель белизны W обычно имел вид

$$W = f_1(Y) + f_2(x, y), \quad (2.82)$$

где $f_1(Y)$ обозначает функцию коэффициента яркости Y , а $f_2(x, y)$ обозначает другую функцию координат цветности (x, y) . В обеих функциях используются такие константы, при которых W принимает значение, равное 100, для некоторого точно определенного предпочтительного или стандартного белого цвета, в качестве которого часто выбирают совершенный отражающий рассеиватель ($Y = 100$).

Сходство уравнения (2.81) с формулами цветовых различий ΔE становится явным, если рассматривать функцию $f_1(Y)$, которая в основном соответствует показателю светлоты, а $f_2(x, y)$ — показателю ощущения цветности почти белого стимула с коэффи-

циентом яркости Y и координатами цветности (x, y) . Для наглядности в качестве показателя светлоты можно выбрать L^* , а в качестве показателя ощущения цветности — (u^*, v^*) , определяемые из уравнения (2.73). Тогда показатель белизны может принять более специфическую форму:

$$W = 100 - \Delta E(L^*, u^*, v^*). \quad (2.83)$$

где $\Delta E(L^*, u^*, v^*)$ является величиной цветового различия, рассчитанной в соответствии с уравнением (2.73). Стандартным белым цветом может быть стимул, производимый совершенным отражающим рассеивателем при освещении стандартным излучением D_{65} МКО. Его показатель белизны должен быть равным 100. Все образцы, отличающиеся от совершенного отражающего рассеивателя на величину ΔE , должны иметь индекс белизны, равный $100 - \Delta E$.

Для получения иных выражений, описывающих показатель белизны, можно использовать другие формулы цветовых различий. Опубликовано много предполагаемых вариантов этого выражения (например, [736]), и все же выражение для повсеместно приемлемого показателя белизны необходимо еще искать.

В процессе поиска лучшей формулы для белизны многие исследователи (см. подобранную ниже литературу) проводили визуальные эксперименты и сравнивали свои данные с результатами расчета по формулам. Согласие между визуальными оценками и формулами в общем не было удовлетворительным. Объяснить причину такого несоответствия сложно, она полностью еще не понята.

Существует понятие «предпочтительного белого цвета», который часто оказывает существенное влияние на оценку белизны. Это понятие трудно представить количественно. Ощущение предпочтительного белого цвета определяется вкусом и привычкой человека, видом профессии и типом выпускаемых изделий, что приводит к значительным расхождениям от одного контролера к другому. В настоящее время проблема усложнилась еще больше введением и широким использованием флуоресцирующих отбеливающих веществ или оптических отбеливателей (красителей с голубой флуоресценцией), которые добавляются к бумаге, текстильным изделиям, пластмассам, моющим средствам и т. д. Ганц [174] предложил, чтобы формула белизны, основанная на оценке цветовых различий, фактически не применялась до тех пор, пока не будет найден и определен в качестве основного белого оптимальный флуоресцирующий белый. Этот основной белый должен быть по крайней мере таким же, как любой белый, полученный при добавлении красителя с голубой флуоресценцией.

Конечно, увеличение белизны материала добавлением голубой флуоресценции к чистому потоку, зеркально отраженному от

материала, безгранично. В конце концов добавление голубой флуоресценции приведет к тому, что материал будет выглядеть не белым, а голубым.

Во всех без исключения исследованиях цветового восприятия, в том числе и белизны, важную роль играют условия наблюдения. Среди других факторов, влияющих на наше восприятие цвета и, в частности, белизны, важнейшими являются цветность и яркость окружения, а также размер образцов. При данном окружении имеет значение, рассматриваем ли мы один образец в течение некоторого времени или серию разных образцов одновременно. Рассматриваемые по отдельности разные образцы могут оцениваться как «белые», однако при одновременном наблюдении они могут восприниматься окрашенными, за исключением, может быть, одного.

Все же основным фактором, влияющим на нашу оценку, является окружение. Приведем описание наблюдения Ганца [174]: «Всякий, кто видел белое, сохнувшее на веревке в пасмурный зимний день, на фоне снега, заметил неприятный пурпурноватый оттенок, вызванный флуоресценцией отбеливающих веществ. Носовой платок на фоне снега кажется слегка окрашенным, однако при том же освещении он мгновенно становится ослепительно белым, если его рассматривать на фоне темно-зеленого хвойного леса или серой стены».

При проверке материалов, содержащих флуоресцирующие отбеливающие вещества, возникает еще одна проблема, связанная с источником освещения. Как мы уже видели выше, колориметрия флуоресцирующих материалов имеет свои недостатки, и подходящий источник, представляющий стандартное излучение D_{65} МКО, еще не стандартизован.

Комитет по колориметрии МКО организовал подкомитет, основной задачей которого является изучение сложной проблемы измерения белизны и оценка возможностей разработки достаточно простой формулы, которая обеспечит удовлетворительное прогнозирование степени белизны в большинстве отраслей промышленности.

ЦВЕТОВЫЕ ДОПУСКИ

Отсутствие установленных допусков на требования к цвету в области торговли являлось причиной многих ошибок. В свою очередь установление допусков также приводит к ошибкам. На небольших партиях товаров установление допусков не окупается. В розничной продаже или небольших оптовых сделках лучше всего полагаться на честь поставщика или фабричной марки, поддерживаемую либеральной политикой удовлетворения законных

жалоб покупателя. Однако большие корпорации и государственные агентства часто делают большие оптовые закупки на свободном рынке, и при установлении цены им необходимо заранее знать, что они покупают, включая точные данные о том, как будут удовлетворяться требования к цвету. Государственные закупки во времена второй мировой войны привели многих изготовителей к первому количественному установлению цветовых допусков.

Ответ на вопрос о необходимости установления цветового допуска зависит также от положения в экономике. В том случае, когда спрос превышает предложение, покупатель рад получить даже те товары, цвет которых далеко не отвечает норме. При этом он не будет выражать неудовольствия и необходимости в цветовом допуске нет. В противоположном случае введение допуска на цвет является защитой продавца против произвольного отказа от товаров (как от не соответствующих цвету) со стороны покупателя, который нашел другого продавца, предлагающего товары по более низкой цене. Обычно цветовой допуск служит интересам как изготовителей, так и потребителей. Цветовой допуск, подобно другим допускам в торговле, представляет компромисс между тем, что покупатель хотел бы приобрести, и тем, что изготовитель может ему предложить по сходной цене.

Решить, какой цветовой интервал должен быть записан в контракт в качестве допустимого, совсем не просто. Чтобы быть уверенным в целесообразности этого выбора, необходимо затратить много денег. Имеется большой соблазн сделать предположение в отношении определенного цвета, сообщить поставщику, что цвет должен удовлетворять требованиям предполагаемого использования товара или материала и положиться на его компетентность на поставку товаров, соответствующих назначению. Однако в случае массового производства опасно поддаваться такому соблазну. Если изготовитель автомобилей должен был заказать у одного поставщика блоки цилиндров диаметром 10 см, а у другого — поршни к 10-сантиметровым цилиндрам, он мог бы затратить массу времени, сортируя поршни и пытаясь найти один, соответствующий каждому отдельному цилиндру. Подобная опасность распространяется и на товары тех цветов, которые не соответствуют норме. Цвет служит некоторой цели. Он должен до некоторой степени согласоваться с другим цветом. Если производство должно протекать гладко, нельзя отвлекать внимание на поиски использования материалов или деталей, цвет которых существенно отличается от заданного. Если цветовой допуск велик, можно достичь экономии средств путем введения простых методов контроля; если же он мал, как в случае обивочных тканей, то самый тщательный отбор цветовых допусков, связанных с очень надежными измерениями и контролем цвета, возможно, потребует вложения больших средств.

Цветовые допуски могут быть установлены специальными стандартными образцами цвета, изготовленными для одного заказа, или набором цветных образцов, имеющихся в наличии у изготовителя и покупателя. Кроме того, они могут основываться на измерениях, полученных либо с помощью непосредственной колориметрии, либо спектрофотометрии с последующим расчетом.

Специальные стандартные образцы цвета. Один из наиболее распространенных методов изготовления промышленных товаров заключается в предоставлении будущему заказчику образцов, показывающих обычные отклонения в цвете, получаемые в процессе производства, и гарантии того, что вся поставляемая продукция, за исключением небольшого процента, будет находиться в пределах, определяемых этими образцами. С другой стороны, покупатель будет предлагать образцы, представляющие цветовой интервал, приемлемый для намечаемого им использования товара. Примером будет служить метод, использованный Алленом, широко известным дизайнером по упаковке и рекламе. Допуски на цвет, используемые в фабричных марках, должны быть очень малыми. Аллен был первым, кто использовал для этой цели типографскую краску. Он покрыл лист бумаги пятью пленками разной толщины. Затем он воспроизвел полученные таким образом цвета путем введения в краску прозрачных наполнителей в определенной пропорции и получил оттиски этих красок нормальной толщины на обычном сырье. Центральный цвет представлял желаемый цвет фабричной марки, два соседних — допустимые отклонения, а два крайних — недопустимые. Таким образом, печатник заранее точно знал, какой он должен будет обеспечить контроль состава краски и толщины ее слоя, наносимого на бумагу. Метод Аллена прост и практичен.

Логическое дополнение этого метода заключается в демонстрации 12 граничных образцов, отклоняющихся от стандартного в направлениях, показанных на рис. 2.66 [547, 715]. Воспринимаемые цветовые различия не должны быть одинаковыми во всех направлениях. Например, проще можно допустить вариации, соответствующие изменению толщины пленки (обычно от светлого к темному), и поэтому в этих направлениях приемлемы более значительные воспринимаемые различия.

Наборы стандартных образцов цвета. Другим способом установления цветового допуска является способ сравнения с набором стандартных образцов цвета, копии которых имеются как у покупателя, так и у продавца. Систематизированные наборы образцов, подобные атласу Манселла, весьма подходят для определения цветовых допусков.

Атлас Манселла хорошо приспособлен для установления пределов по цветовому тону, светлоте и насыщенности по Манселлу, поскольку цветовые шкалы, представленные в атласе, являются примером изменения этих свойств при обычных условиях наблюдения. Однако соседние цвета этих шкал отличаются очень сильно, чтобы можно было во многих случаях сослаться на них как на предельные цвета. При визуальной интерполяции необходимо непосредственно использовать шкалы Манселла. Например, обозначение ярко-синего цвета по Манселлу — $7,2PB\ 2,9/9,1$. Пределы могут выражаться в виде двух ступеней цветового тона по Манселлу ($\Delta H = 2,0$), одной ступени насыщенности по Манселлу ($\Delta C = 1,0$) и половиной ступени светлоты по Манселлу ($\Delta V = 0,50$). Контроль поставляемых товаров производится отбором соответствующего образца и определением обозначения его цвета по атласу Манселла путем визуальной трехмерной интерполяции по цветовым шкалам атласа. Различия по цветовому тону, насыщенности по Манселлу и светлоте между испытуемым образцом и определенным стандартным образцом ($7,2PB\ 2,9/9,1$) могут определяться путем вычитания и сравниваться с установленными допусками. Отметим, что для точного «чтения» обозначения образца цвета по атласу Манселла требуется так же, чтобы контролер был в состоянии оценить, какой из двух почти идентичных цветов светлее, серее, краснее или зеленее. Кроме того, он должен уметь проводить визуальную интерполяцию вдоль цветовых шкал Манселла почти так же, как можно «прочитать» длину шкалы, отградуированной в миллиметрах, при интерполяции до десятых долей миллиметра. Например, цветовой тон промежуточного цвета между $7,5\ PB\ 3/10$ и $5PB\ 3/10$ может быть благодаря интерполяции определен величиной $7,2PB$ (т. е. его обозначение $7,2PB\ 3/10$). Контролер должен научиться делать такие оценки со значительной достоверностью. Обученный контролер, оценивающий действительно ли данный образец представляет «практическое цветовое равенство» со стандартным, обычно будет делать допущения, основываясь на своем знании трудности контроля цвета конкретного оцениваемого образца. Если сочетание красителей, которыми окрашен образец, с трудом поддается контролю, контролер может пропустить легко наблюдаемое цветовое различие, потому что при оценке другая попытка сравнить цвета, вероятно, может оказаться такой же неудачной. Однако для хорошего сочетания красителей он будет отсортировывать даже те образцы, которые для неопытного контролера могут быть совершенно одинаковыми. Использование образцов, показывающих предварительно согласованные предельные цвета, ведет к объективному и не зависящему от подготовки контролера способу оценки результатов процесса окраски.

Стандартные образцы, определенные в основной системе. Если выбранный цвет имеет постоянное значение, то можно с надежной гарантией измерить в основных характеристиках любые специальные стандартные образцы цвета, разработанные для его контроля. Это позволяет в любое время воспроизвести выбираемые стандарты цвета, а также установить предполагаемый интервал цвета в основных характеристиках, используемых в колориметрии. Этот интервал может быть выражен в системе координат МКО (например, координатами цветности x , y , коэффициентом яркости Y МКО 1931 г. по отношению к стандартному излучению D_{65} МКО). Кроме того, область цветов может быть определена характеристиками любой системы координат, полученной из стандартной системы МКО, такой, как система, основанная на доминирующей длине волны и чистоте (см. рис. 2.27). Она может быть выражена даже в виде цветовых различий ΔE , определенных, например, по уравнению (2.73). Более подробно об этом будет говориться позже.

В качестве примера цветов, имеющих постоянное значение, можно привести цвета, выбранные для сигнализации на транспорте [98]. Пределы цветности определяются прямыми линиями на цветовом графике (x , y) МКО 1931 г. (рис. 2.88). Местоположение этих пределов диктуется главным образом тем фактом, что светофильтры должны использоваться в совокупности с источниками света, имеющими значительный интервал цветовой температуры (от керосинового пламени до газополных ламп накаливания). Границы цветности устанавливаются для сигнальных огней красного, желтого, зеленого, синего и белого цвета. Для сигнализации на большом расстоянии редко используются сигнальные огни синего цвета, так как часто синие стеклянные светофильтры пропускают некоторую часть длинноволнового (красного) излучения лампы. Вследствие хроматической аберрации глаза [33] сигнальный огонь синего цвета будет восприниматься в виде красной точки, окруженной несфокусированным синим светом. По этой причине избегают также использования пурпурного цвета для сигнализации на большом расстоянии.

Отметим, что для установления этих цветовых допусков необходим очень большой объем информации о цветовом пространстве; однако во внимание были приняты и трудности цветового контроля при производстве стеклянных светофильтров для сигнальных устройств. Контроль светофильтров сигнальных устройств производится визуальным сравнением со стандартными граничными фильтрами, которые служат пределами по цветности.

Таким образом, для проверки стекла сигнального устройства зеленого цвета контролера снабжают синим граничным фильтром и фильтром, показывающим предел по желтизне и насыщенности. От контролера требуется, чтобы он смог оценить, действительно

ли находящееся под контролем стекло синее синего предела или менее насыщенное, чем предел по желтизне и насыщенности.

Если контроль поставляемых товаров не должен зависеть от индивидуальных особенностей контролера, следует обратиться к измерению цвета поставляемых товаров с помощью визуальной

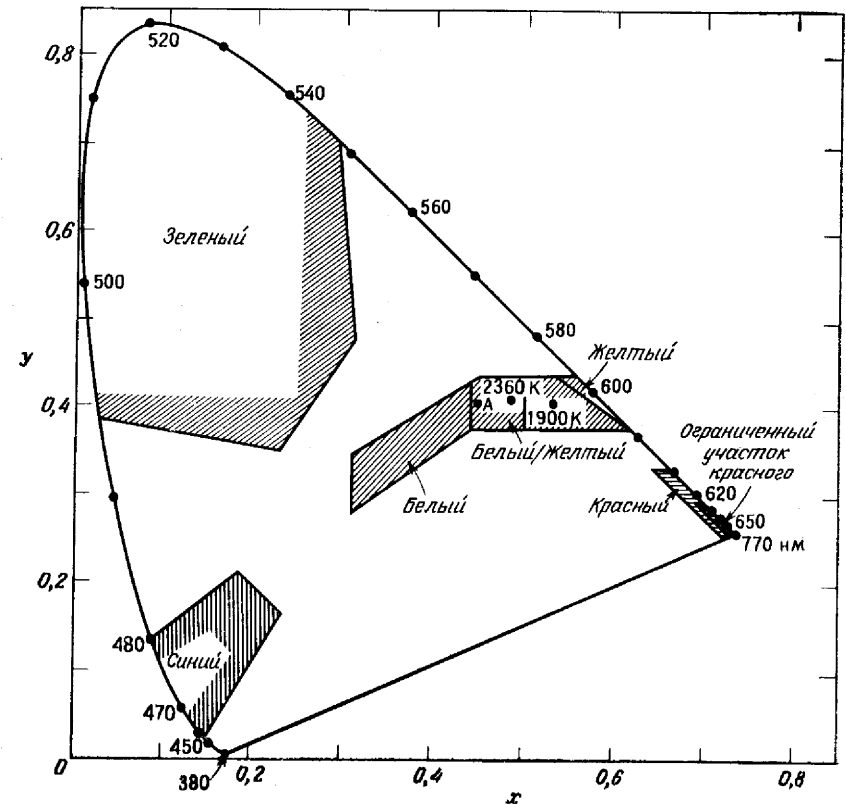


Рис. 2.88. Цветовой график x , y МКО 1931 г., представляющий пределы цветности стимулов, используемых для сигнальных огней [98].

колориметрии, фотоэлектрической колориметрии или фундаментальных измерений на спектрофотометре с последующим расчетом для одного из двух стандартных наблюдателей МКО. Если измерения необходимо проводить на визуальном или фотоэлектрическом колориметре, цветовой допуск часто устанавливается непосредственно значениями показаний прибора. Например, когда используется субтрактивный колориметр со стеклами Ловибонда, стандартный цвет и пределы могут выражаться непосредственно

в значениях красного, желтого и синего стекол Ловибонда. Однако начиная с 1931 г. стало принято выражать цветовые допуски через стандартного наблюдателя МКО и систему координат (система МКО 1931 или МКО 1964 г.) или на основе других данных, связанных с ними известными соотношениями

Формулы цветовых различий. Если цветовые допуски основаны на изучении возможных отклонений цвета, возникающих в процессе производства, то допуски для каждого нового цвета должны быть изучены в индивидуальном порядке.

При этом не имеет существенного значения, какая система координат используется для их выражения, поскольку она определяется исходя из стандартной системы МКО.

Однако если цветовые допуски устанавливаются только на основе приемлемости (или нежелательности) отклонений от стандарта или на основе воспринимаемости таких отклонений, то цветовая система с приблизительно равноконтрастными цветовыми шкалами типа системы ренотации Манселла или шкалами, предполагаемыми, например, уравнениями (2.68) и (2.73), более предпочтительна. Если восприятие отклонений является единственным требованием, то ее преимущество очевидно. При помощи этих уравнений цветовые допуски могут быть установлены непосредственно в виде величины цветовых различий. В таком случае специального изучения допусков для каждого нового цвета не требуется. Все, что для этого требуется — это определение стандартного цвета и числа единиц допустимого цветового различия.

Если цветовой допуск должен устанавливаться на основе приемлемости цветовых отклонений от стандарта, то весьма удобно использовать систему координат с почти равноконтрастными цветовыми шкалами. Появление заметных отклонений может явиться началом анализа приемлемости цветовых отклонений. При описании цветовых допусков на текстильные изделия обычно выясняется, что крайне необходимо близкое соответствие по цветовому тону, в то время как для отклонений в светлоте и насыщенности можно принять большие допуски. Отклонения в цветовом тоне часто приводят к мнению, что использовался не тот краситель. Значительное различие в светлоте, даже если оно хорошо заметно, обычно не вызывает возражений у основного потребителя, так как оно выглядит подобно различиям, обычно вызываемым неравномерным освещением. Различие в насыщенности, даже хорошо заметное, не так бросается в глаза, как различие в цветовом тоне, так как оно только указывает, что было использовано слишком много или слишком мало красителя. Это не так плохо по сравнению с использованием не того красителя; при этом не создается впечатления, что была допущена грубая ошибка. Кроме того, два цвета одинакового цветового тона, имеющие воспринимаемые различия по

светлоте и насыщенности, все же гармонируют друг с другом, хотя небольшое воспринимаемое различие в цветовом тоне вызывает неприятное впечатление.

Понятия приемлемости и воспринимаемости цветового различия существенно отличаются, и следует принять меры по их различению при применении в промышленности. Конечно, возможны случаи, когда приемлемы только совершенные равенства. В таких случаях неприемлемость цветового различия становится синонимом воспринимаемости этого различия. Однако часто в промышленности требуется оценка приемлемости цветового различия. Такая оценка не может быть сделана на основе какой-либо формулы цветовых различий из числа рассмотренных выше, которые по предположению предсказывают воспринимаемость цветовых различий. Таким образом, факт, что формулы цветовых различий не в состоянии точно определить приемлемость цветовых различий, не должен являться неожиданностью.

Тем не менее, как указано выше, формулу цветовых различий с успехом можно использовать для описания установленных величин приемлемости в данных направлениях от стандартного цвета. Эту идею иллюстрирует рис. 2.89.

Мы изобразили часть пространства ($L^*a^*b^*$), определяемого уравнением (2.68), в двух сечениях. Верхняя левая часть рис. 2.89 показывает плоскость постоянной светлоты (L^*), а нижняя правая часть — плоскость постоянного цветового тона ($b^* = ma^*$ при постоянном m). Обе плоскости проходят через точку $L_{Ст}^*$, $a_{Ст}^*$, $b_{Ст}^*$ стандартного цвета и точку, представляющую ахроматический (серый) цвет той же светлоты, что и стандартный. Цвета, отличающиеся от стандартного на одно едва воспринимаемое различие (1 е. в. р.), лежат на поверхности сферы в пространстве ($L^*a^*b^*$) с центром в точке стандартного цвета (Ст). Эта сфера представлена окружностью единичного радиуса в плоскости постоянной светлоты и аналогичной окружностью в плоскости постоянного тона. Цвета, отличающиеся от стандартного на две единицы едва воспринимаемого различия (2 е. в. р.), лежат на поверхности сферы с радиусом, вдвое большим, чем у первой сферы. В сечении она представлена окружностями с радиусом, вдвое большим единичного. Этот процесс можно продолжать. Легко представить серию концентрических сфер, увеличивающихся в диаметре, представляющих собой кратные величины едва воспринимаемых цветовых различий.

Типичный пример охвата цветов с приемлемыми отличиями от стандарта показан заштрихованными площадями на рис. 2.89. Предположим, что наш эксперимент показал, что оцениваемая ткань обычно принимается в качестве «практически соответствующей по цвету» данному стандарту, если различие в цветовом тоне не превышает 1 е. в. р., различие в насыщенности не больше

2 е. в. р., а различие в светлоте не больше 3 е. в. р. Эта эмпирическая информация может быть преобразована в цветовой охват эллипсоидальной формы, содержащий все цвета, которые можно оценивать как приемлемые дубликаты стандартного цвета. Поперечные сечения этого охвата в плоскостях постоянной светлоты и постоянного цветового тона являются эллипсами (рис. 2.89).

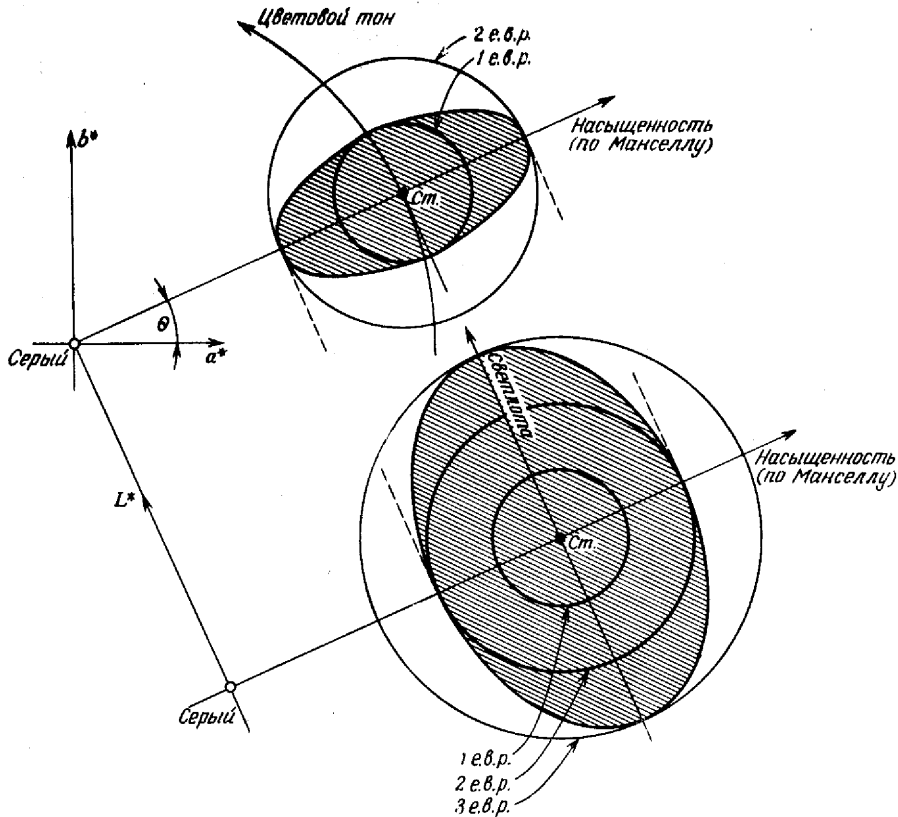


Рис. 2.89. Поперечные сечения цветового пространства ($L^*a^*b^*$).

Вверху слева представлена плоскость постоянной светлоты L^* ; внизу справа — плоскость постоянного цветового тона (θ). Концентрические окружности вокруг стандартного цвета (Ст) представляют собой кривые одинаковой воспринимаемости [1 е. в. р. (едва воспринимаемое различие), 2 е. в. р., 3 е. в. р.]. Концентрические (заштрихованные) эллипсы являются поперечными сечениями эллипсоида приемлемости.

Установив однажды этот охват, мы можем преобразовать формулу цветовых различий $\Delta E (L^*a^*b^*)$ в новую форму, которая будет определять на этой основе приемлемость цветовых различий.

В соответствии с рис. 2.89 определим цветовой тон в пространстве ($L^*a^*b^*$) углом θ , насыщенность — расстоянием по радиусу

от начала координат (серый цвет) в плоскости (a^*, b^*), светлоту — координатой L^* , перпендикулярной плоскости (a^*, b^*).

Эллипсоид приемлемости с центром в точке стандартного цвета ($L_{Ст}^*, a_{Ст}^*, b_{Ст}^*$) выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} & \frac{[-(a^* - a_{Ст}^*) \sin \theta + (b^* - b_{Ст}^*) \cos \theta]^2}{\alpha_T^2} + \\ & + \frac{[(a^* - a_{Ст}^*) \cos \theta + (b^* - b_{Ст}^*) \sin \theta]^2}{\alpha_H^2} + \\ & + \frac{[L^* - L_{Ст}^*]^2}{\alpha_C^2} - 1 = 0. \end{aligned} \quad (2.84)$$

Другой вид этого уравнения, исключая явное использование тригонометрических функций цветового тона θ , записывается как

$$\begin{aligned} & \frac{[-b_{Ст}^* (a^* - a_{Ст}^*) + a_{Ст}^* (b^* - b_{Ст}^*)]^2}{\alpha_T^2 C_{Ст}^2} + \\ & + \frac{[a_{Ст}^* (a^* - a_{Ст}^*) + b_{Ст}^* (b^* - b_{Ст}^*)]^2}{\alpha_H^2 C_{Ст}^2} + \\ & + \frac{[L^* - L_{Ст}^*]^2}{\alpha_C^2} - 1 = 0, \end{aligned} \quad (2.85)$$

где $C_{Ст}^2 = (a_{Ст}^*)^2 + (b_{Ст}^*)^2$ представляет квадрат насыщенности стандарта. Постоянные $\alpha_T, \alpha_H, \alpha_C$ являются длинами главных осей эллипсоида приемлемости и соответствуют множителям для отклонения цветового тона, насыщенности и соответственно светлоты, которые мы устанавливали в качестве пределов приемлемости в этих направлениях. Эти множители даются в значениях едва воспринимаемых различий в цветовом тоне, насыщенности, светлоте. В примере, изображенном на рис. 2.89, они равны

$$\alpha_T = 1, \quad \alpha_H = 2, \quad \alpha_C = 3.$$

Чтобы уравнение (2.85) можно было применить для определения приемлемости любого цвета L^*, a^*, b^* , находящегося по соседству с стандартом $L_{Ст}^*, a_{Ст}^*, b_{Ст}^*$, следует несколько преобразовать это уравнение. Мы должны записать его в виде

$$\begin{aligned} & \frac{[-b_{Ст}^* (a^* - a_{Ст}^*) + a_{Ст}^* (b^* - b_{Ст}^*)]^2}{\alpha_T^2 C_{Ст}^2} + \\ & + \frac{[a_{Ст}^* (a^* - a_{Ст}^*) + b_{Ст}^* (b^* - b_{Ст}^*)]^2}{\alpha_H^2 C_{Ст}^2} + \\ & + \frac{[L^* - L_{Ст}^*]^2}{\alpha_C^2} - 1 = A. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Для каждого цвета L^* , a^* , b^* , сравниваемого со стандартным цветом $L_{ст}^*$, $a_{ст}^*$, $b_{ст}^*$, необходимо определить величину A . Если оказывается, что A имеет отрицательное значение, т. е. $A < 0$, испытуемый цвет является приемлемым, потому что он попадает внутрь эллипсоида приемлемости. Если оказывается, что A имеет положительное значение, т. е. $A > 0$, испытуемый цвет неприемлем, так как он попадает за пределы эллипсоида приемлемости. Когда A становится равным 0, уравнение (2.86) переходит в уравнение (2.85) и цвета, для которых имеет место это условие, лежат на поверхности эллипсоида, т. е. на границе охвата приемлемости. Это редко случается на практике. Однако если это происходит, мы имеем классический случай принятия наугад решения относительно приемлемости этого цвета. С другой стороны, у нас имеются все основания требовать от администрации решения этой дилеммы. Вероятнее всего, цвет будет принят в качестве приемлемого.

Следует предостеречь тех, кто хочет для прогнозирования приемлемости цветовых различий применить схему, подобную заданной уравнением (2.86).

Ахроматические (серые) цвета создают особую проблему. Это видно из уравнения (2.86) при $a_{ст}^* = b_{ст}^* = 0$. Для этих и близких к ним цветов необходимо вывести специальное уравнение, в которое не входит значение цветового тона. В этой области цветового пространства цветовой тон не определяется.

В уравнении (2.86) мы молчаливо допускали, что единица $\Delta E (L^*a^*b^*)$ соответствует едва воспринимаемому цветовому различию. Это может быть не совсем правильным для рассматриваемого применения. В решении этого вопроса существенную роль играют условия наблюдения. Для согласования единиц может быть введен соответствующий масштабный множитель.

Во многих приложениях множители α_T , α_N , α_C в уравнении (2.86) не могут быть постоянными во всем цветовом пространстве. Для определения подходящих коэффициентов для различных областей цветового пространства необходимо провести специальные эксперименты по приемлемости цветовых различий.

Проведено несколько обширных экспериментальных работ по исследованию приемлемости цветовых различий [105, 124, 297, 420, 429—431, 459, 460, 530, 557, 607, 657]. Результаты, полученные различными исследователями, не всегда приводят к одинаковым заключениям относительно ценности отдельных уравнений цветовых различий как средства прогнозирования оценок приемлемости. Имеется строгое указание, что удовлетворительного прогнозирования приемлемых цветовых различий нельзя сделать с помощью какой-либо формулы цветовых различий, основанной исключительно на воспринимаемости цветовых различий. По-видимому, для выработки удовлетворительного метода оценки прием-

лемости данного цветового различия следует использовать совместно с формулой цветовых различий другие параметры, помимо тех, которые связаны с цветовым восприятием. Один такой метод иллюстрируется уравнением (2.86). В нашем примере дополнительные параметры α_T , α_N , α_C непосредственно связаны с видом исследуемого окрашенного материала, заданным или предполагаемым типом его использования, техническими проблемами, издержками, связанными с производством материала, пожеланиями заказчика и прочими факторами.

Сложность перехода от формул цветовых различий к формулам приемлемости усугубляется тем фактом, что еще не найдено идеальной формулы цветовых различий, точно предсказывающей воспринимаемые цветовые различия. Как мы уже отмечали ранее, все существующие формулы являются более или менее удовлетворительной аппроксимацией идеальной формулы [106, 730].

ТЕМНОВАЯ И СВЕТОВАЯ АДАПТАЦИЯ—ЦВЕТОВАЯ АДАПТАЦИЯ

Одним из наиболее важных свойств нашего зрительного механизма является его способность сохранять приблизительно то же самое изображение предмета, даже если интенсивность лучистого потока, попадающего в глаз при формировании этого изображения, изменяется в широких пределах. Процесс приспособления зрительного механизма к условиям воздействия лучистой энергии на глаза называется адаптацией. Известны различные виды адаптации, наиболее важными из которых являются темновая, или ночная, адаптация, световая, или дневная, адаптация и цветовая адаптация. Темновая и световая адаптации относятся к настройке зрительного механизма к изменениям интенсивности лучистой энергии, попадающей в глаз. Цветовая адаптация относится главным образом к настройке зрительного механизма к изменению спектрального состава лучистой энергии. Явления, связанные с адаптацией, легко наблюдать, однако трудно объяснить количественно.

Говорят, что глаза адаптированы к темноте, если они находились в полной темноте в течение более 30 мин. В таком состоянии можно обнаружить даже очень слабые световые потоки.

Если источник излучения лучистой энергии достаточно велик, то невооруженным глазом можно обнаружить яркость до 10^{-6} кандел на квадратный метр ($\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$). При таком низком уровне яркости возбуждаются только палочки сетчатки (рис. 1.2 и 1.3), поэтому мы не воспринимаем хроматические цвета. Предметы, которые при дневном свете могут выглядеть цветными, в этом случае будут казаться белыми, серыми или черными. Это так называемое ночное зрение сохраняется до уровня яркости приблизительно 10^{-3} $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$. В ночное время палочки автоматически регулируют

свою чувствительность к данному уровню яркости. Если этот уровень поддерживается в течение достаточно долгого периода времени, адаптация достигает равновесия, а рецепторы становятся более чувствительными к установлению различий между малыми изменениями яркости вблизи этого уровня. Внезапное резкое уменьшение яркости вызывает временную слепоту, т. е. до тех пор, пока рецепторы не приспособятся к новым условиям, ничего нельзя увидеть. Подобным образом, резкое увеличение яркости делает нас фактически слепыми, так как светлота всех участков поля зрения становится одинаковой и они не передают никакой информации.

Однако имеется верхний предел яркости, при которой палочки полностью прекращают функционирование. Хотя этот предел трудно точно определить, можно считать, что он достигается при уровне яркости около $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ [637]. Независимо от того, в течение какого времени адаптируются палочки, они не будут реагировать при уровне яркости $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ и выше. Однако, до того как будет достигнут этот предел, фактически при яркости порядка $10^{-3} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ начинают действовать колбочки, приводящие к восприятию цвета. Область, в которой при воздействии света активны как палочки, так и колбочки, называется мезопической; в этом случае мы обычно говорим о мезопическом, или сумеречном зрении. Приблизительный интервал яркостей, который обуславливает сумеречное зрение, находится в пределах от $10^{-3} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ до приблизительно $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$. В пределах области сумеречного зрения как палочки, так и колбочки настраивают свою чувствительность на данный уровень яркости. Если в течение достаточно долгого времени поддерживается один и тот же уровень, адаптация палочек и колбочек достигает равновесия. При таком равновесии рецепторы наиболее чувствительны к различию в яркости. Если произойдет внезапное резкое изменение яркости, их чувствительность временно может упасть до нуля. Требуется от нескольких секунд до нескольких минут, прежде чем рецепторы адаптируются к новому уровню яркости.

При повышении уровня яркости выше $125 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ палочки теряют чувствительность и только колбочки несут информацию о поле зрения. Мы подошли к фотопическому или, как обычно его называют, дневному зрению. Изменения в яркости быстро нейтрализуются благодаря адаптации, так чтобы поддерживать зрительный механизм в состоянии наибольшей чувствительности к различиям в относительной яркости при всех условиях. Однако при уровне яркости свыше $10^6 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ степени адаптации обычно уже не достаточно, мы слепнем и ощущаем большое неудобство. Мы сами автоматически предохраняем наши глаза за счет быстрого моргания или частичного закрывания век, пытаясь уменьшить интенсивность лучистой энергии, попадающей на единицу площа-

ди сетчатки, т. е., пользуясь техническим языком, добиваемся, чтобы освещенность сетчатки — величина, которая реально существует — уменьшилась до терпимого уровня.

Весь диапазон яркостей, которые наш зрительный механизм способен воспринять, действительно огромен: от $10^{-6} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ для глаза, полностью адаптированного к темноте, до $10^6 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ для глаза, адаптированного к свету, или на 12 порядков яркости. Однако этот диапазон может быть использован главным образом потому, что палочки возбуждаются при освещенности сетчатки слишком низкой для функционирования колбочек. Частично это объясняется автоматической настройкой зрачка, уменьшающего или увеличивающего освещенность на сетчатке. Колориметрические методы применимы только к среднему диапазону изменения колбочкового зрения на три порядка. Разумеется, имеется много проблем, связанных с адаптацией (местоположением изображения на сетчатке, величиной поля зрения, временем экспозиции, эффектом предварительной адаптации), их невозможно здесь рассмотреть. Однако интересующемуся этими вопросами читателю можно рекомендовать обзор Барлоу [26].

Как было указано выше, существует и другая разновидность явления адаптации, которая в основном имеет дело с изменениями качества (цветности) стимула, воздействующего на наши глаза. Это явление называется цветовой адаптацией, оно имеет исключительно важное значение для колориметристов, желающих прогнозировать (по крайней мере до некоторой степени) восприятие цвета предметов.

Ниже приводится пример того, что понимается под цветовой адаптацией.

При переходе от естественного дневного света в комнату, освещаемую лампой накаливания, мы сразу же отмечаем изменение цвета излучения, отраженного от предметов, находящихся в комнате. Те предметы, которые при дневном свете отражают зеленый, теперь, по-видимому, отражают желто-зеленый; пурпурные в свою очередь выглядят более красными. Однако это непосредственное изменение воспринимаемого цвета, по-видимому, не относится к самому предмету. Т. е. мы осознаем, что свет излучения лампы накаливания красновато-желтого цвета, и по отношению к нему воспринимаем цвет предмета почти таким же зеленым, каким он был при дневном свете. Обычно это явление известно, как явление постоянства (константности) цвета предмета. Постепенно наш зрительный механизм привыкает к новому свойству освещения, т. е. он адаптируется и, спустя примерно 5 мин, цвет отраженного от предмета излучения воспринимается приблизительно таким же, как и при дневном освещении. Отраженный от предмета красновато-желтый свет лампы накаливания, который в первый момент показался нам желтовато-зеленым, вновь становится зеле-

вым. Аналогично пурпурный, который вначале стал краснее, вновь изменился на первоначальный. К сожалению, адаптационное изменение обычно не является полным. Вообще между цветом предмета, рассматриваемого при дневном свете, и цветом того же предмета при лампе накаливания имеется различие, часто весьма значительное.

Например, пурпурный не утратит полностью ту долю красного, которую он приобрел при переходе от дневного света к свету лампы накаливания. Результирующий сдвиг цвета, воспринимаемый после адаптации к хроматическому освещению светом лампы накаливания, определяется колориметрическим и адаптационными сдвигами. Колориметрический сдвиг происходит в результате измененного спектрального распределения лучистого потока, отраженного от предмета при освещении светом лампы накаливания вместо естественного дневного света. Это изменение приводит к изменению цветности и коэффициента яркости цветовых стимулов предметов и соответствует тому, что мы видим в первое мгновение при смене источника освещения. Адаптационный сдвиг вызывается исключительно цветовой адаптацией и в основном направлен в сторону первоначального цвета, воспринимаемого при естественном дневном свете.

Благодаря использованию простых условий освещения и наблюдения можно измерить результирующий цветовой сдвиг и выразить его, например, в системе МКО (в координатах цветности x , y и коэффициентом яркости Y) или в системе обозначений Манселла. Таких исследований было выполнено очень много особенно за последние годы [85—87, 144, 230, 236, 237, 258—261, 302, 304, 406, 408, 579, 580, 650, 652, 665, 674, 687—690, 711, 714, 736]. Имеется несколько различных методов проведения экспериментов по цветовой адаптации, три из которых наиболее широко известны. К ним относятся метод памяти на цвета, метод бинокулярного уравнивания с перегородкой и метод локальной адаптации.

В методе памяти на цвета [237] наблюдатель вначале учится описывать цвета, показанные ему при дневном свете, в значениях цветового тона, светлоты и насыщенности. При этом удобно использовать образцы цвета атласа Манселла с их обозначениями: цветовым тоном по Манселлу, светлотой по Манселлу, насыщенностью по Манселлу. После достаточной адаптации, которая может продолжаться около 8 ч., наблюдатель запоминает шкалы цветового тона, насыщенности и светлоты, с тем чтобы впоследствии довольно точно и правильно описать цвет любого предмета, который он может воспринять. После этого тренированного наблюдателя просят посмотреть на предметы при хроматическом свете, например свете лампы накаливания, и после того, как его глаза адаптируются к новому освещению, описать цветовые восприятия в характеристиках тех цветовых шкал, которые он запомнил.

Рис. 2.90 иллюстрирует некоторые типичные результаты, полученные Хелсоном и сотр. [237] для шести наблюдателей, оценивавших образцы Манселла на белом фоне при стандартных источниках С (средний дневной свет) и А (свет лампы накаливания). На рис. стрелками показаны лишь результирующие сдвиги в ощу-

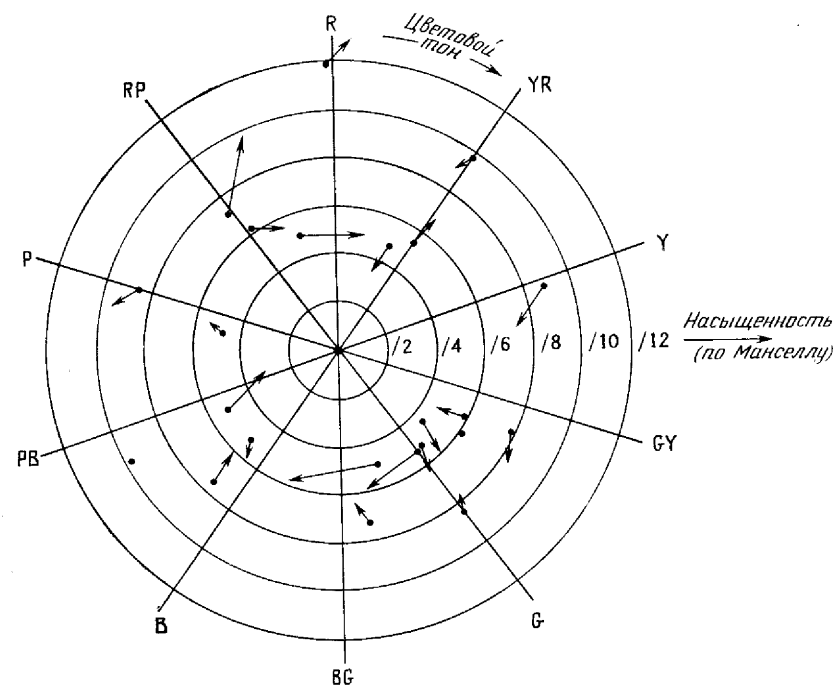


Рис. 2.90. Изменения цветового тона и насыщенности по Манселлу при переходе от источника С МКО (дневной свет) к источнику А МКО (свет лампы накаливания) в соответствии с данными, опубликованными Хелсоном и сотр. [237], при использовании метода по памяти.

Представленные здесь наблюдения относятся к образцам атласа Манселла, расположенным на белом фоне и имеющим средние значения светлоты по Манселлу при дневном свете.

щении цветности. Каждая стрелка начинается в точке, соответствующей ощущению цветности (цветовому тону и насыщенности) образца Манселла при дневном свете (источник С), а кончается в точке, относящейся к ощущению цветности того же образца при свете лампы накаливания. Оценка при дневном свете проводилась после полной адаптации к нему, подобно тому как оценка при свете лампы накаливания проводилась после полной адаптации к этому освещению. В соответствии с данными Хелсона и др. [237] коэффициент яркости фона оказывает значительное влияние на

результаты. Еще ранее Хелсоном было показано [234], что воспринимаемый цветовой тон и насыщенность цветового стимула предмета зависят от отношения его яркости к яркости адаптации. Яркость адаптации зависит от взвешенного среднего значения коэффициентов яркости всех цветовых стимулов предметов, находящихся в поле зрения, и в значительной степени определяется фоном (см. также следующий раздел по цветовому восприятию предмета в сложной обстановке).

Бинокулярный метод сравнения с перегородкой включает разделение зрительного поля непрозрачной перегородкой, помещаемой между глазами, и представления двух цветовых стимулов по одному на каждый глаз [86]. Соответствующее бинокулярное смещение приводит к тому, что два отдельных стимула воспринимаются в виде одного поля сравнения, состоящего из двух частей и помещенного в средней части обширного фона. Цвет половин поля сравнения может изменяться независимо друг от друга, также как это осуществляется в независимых трехцветных колориметрах.

Чтобы определить цвет стимулов, которые воспринимаются одними и теми же при адаптации как к дневному свету, так и к свету лампы накаливания, левый глаз наблюдателя адаптируют к свету лампы накаливания, а правый — к дневному свету, а наблюдателя просят менять цвет левой половины поля сравнения, пока он не уравнивает его с цветом правой половины поля сравнения. Цветовые стимулы двух половин, которые в данных условиях воспринимаются одинаковыми, обычно будут восприниматься совершенно различными, если оба глаза адаптированы к дневному свету. Это различие обеспечивает непосредственное измерение эффекта цветовой адаптации при замене дневного света на свет лампы накаливания.

Не следует считать бинокулярный метод уравнивания с перегородкой совершенно свободным от возможных отклонений, обусловленных некоторым взаимодействием между глазами. Однако оценки величины этих отклонений меняются от «незначительных» до «значительных». Недавняя работа Истмана и Брехера [144] показывает, как изменить эксперимент, чтобы уменьшить взаимодействие между глазами до незначительной величины.

В методе локальной адаптации [406, 408] используется трехцветный колориметр типа представленного на рис. 1.12. Две половины поля цветового сравнения заполняются различными адаптирующими стимулами. Например, левая половина заполняется светом лампы накаливания, правая половина — дневным светом. Через 10 с только на одну секунду в правой половине два адаптирующих стимула заменяются на испытуемый стимул, в левой половине — на аддитивную смесь трех основных стимулов (красный, зеленый, синий). Наблюдатель непрерывно смотрит

обоими глазами на центр линии раздела поля сравнения и в течение периода адаптации регулирует величины первичных стимулов в левой половине с тем, чтобы в течение той секунды, когда оба, и испытуемый стимул, и стимул смеси, рассматриваются рядом, получить цветное равенство с испытуемым стимулом. Удовлетвори-

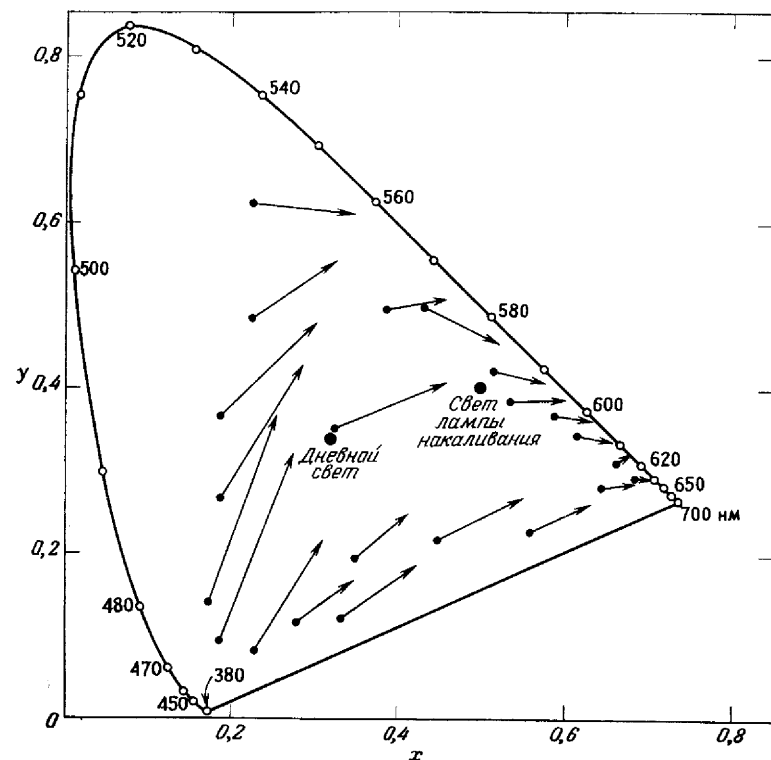


Рис. 2.91. Некоторые типичные сдвиги цветности, полученные Мак Адамом [408] для наблюдателя с использованием метода локальной адаптации.

Каждый вектор показывает изменение цветности, необходимое для поддержания визуального равенства между двумя половинками поля зрения трехцветного колориметра, когда один участок центральной области сетчатки адаптирован к дневному свету, а соседний участок — к свету лампы накаливания.

тельное равенство обычно можно получить после нескольких циклов показа адаптирующих стимулов, испытуемого стимула и стимулов смеси. Результаты эксперимента могут быть выражены, например, координатами системы МКО 1931 г. На рис. 2.91 представлены некоторые типичные результаты, опубликованные Мак Адамом [408].

Результаты, полученные различными исследователями, например результаты, которые представлены на рис. 2.90 и 2.91, в

основном имеют аналогичную тенденцию сдвигов цвета при изменении состояния адаптации глаза от дневного света к свету лампы накаливания и наоборот. Однако более детальное сравнение указывает на наличие значительных расхождений между данными, полученными разными исследователями. Полагают, что эти расхождения обусловлены главным образом различиями в условиях наблюдения, например, размера поля, яркости испытуемого стимула и окружения, а также различиями между наблюдателями. Более того, как было отмечено выше, за эти расхождения могут быть частично ответственны различия в методах наблюдения, т. е. в методах памяти на цвета по сравнению с бинокулярным методом или методом локальной адаптации.

Было проведено много работ (особенно в последние годы), цель которых заключалась в том, чтобы вывести или проверить формулы, количественно предсказывающие влияние цветовой адаптации на восприятие цвета. Классическая гипотеза цветовой адаптации основана на трехкомпонентной теории цветового зрения Юнга — Гельмгольца. В этой теории (см. раздел по теориям цветового зрения) вводятся три типа колбочек, первый из которых чувствителен в основном к коротковолновой (фиолетовой, синей) области спектра, второй — к средневолновой (зеленой) области спектра, а третий — к длинноволновой (красной) области спектра. Когда глаз достаточно долго подвергается воздействию красно-желтого стимула, например света лампы накаливания, рецепторы, чувствительные к красному цвету, и в меньшей степени рецепторы, чувствительные к зеленому цвету, становятся менее чувствительными, в то время как рецепторы, чувствительные к фиолетовому цвету, подвергаются относительно слабому раздражению коротковолновой частью спектра адаптирующего стимула. Другими словами, адаптация к красновато-желтому стимулу приводит к относительному увеличению чувствительности к фиолетовому и синему стимулам.

Принимая в целом теорию Юнга — Гельмгольца, фон Крис [374] выдвинул предположение, что, хотя цветовая адаптация и по-разному влияет на реакцию трех колбочковых механизмов, относительная спектральная чувствительность каждого из трех колбочковых механизмов остается неизменной. Другими словами, фон Крис постулировал, что цветовую адаптацию можно точно объяснить уменьшением чувствительности с постоянным коэффициентом. Этот коэффициент различен для трех колбочковых механизмов, а его величина зависит от цвета стимула, к которому адаптируется наблюдатель. Теперь напомним о трех основных цветах фундаментальной системы, соответствующих трем колбочковым механизмам, на основе которых можно выразить цветовое равенство (см. раздел по теориям цветового зрения). Следовательно, мы можем сформулировать гипотезу фон Криса в таком виде:

координаты цвета всех цветовых стимулов, выраженные через основные цвета теории Юнга — Гельмгольца, для одного состояния адаптации глаза образуют постоянные отношения с соответствующими координатами цвета визуально эквивалентных стимулов, наблюдаемых при другом состоянии адаптации глаза. На это соотношение обычно ссылаются как на закон коэффициентов фон Криса. Его можно выразить с помощью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} R' &= \alpha R, \\ G' &= \beta G, \\ V' &= \gamma V. \end{aligned} \quad (2.87)$$

В этих уравнениях координаты цвета R, G, V определяют цвет стимула, воспринимаемого наблюдателем, адаптированным к первоначальному адаптирующему стимулу. Координаты цвета R', G', V' определяют цвет того же стимула, но теперь воспринимаемого наблюдателем, адаптированным к другому адаптирующему стимулу. Коэффициенты α, β, γ являются коэффициентами фон Криса, соответствующими уменьшению чувствительности трех колбочковых механизмов вследствие цветовой адаптации. Величины α, β, γ можно легко получить из уравнения (2.87), если только отдельная пара соответствующих цветов задана координатами цвета R, G, V и R', G', V' соответственно.

Основные цвета фундаментальной системы, соответствующие чувствительным к фиолетовому и красному цветам колбочковым механизмам, постулированным в теории Юнга — Гельмгольца, считаются достаточно хорошо известными, в то время как оставшийся основной цвет, соответствующий колбочковому механизму, чувствительному к зеленому цвету, в некоторой степени не определен, поскольку речь идет о его обозначении в координатах цветности (x, y) МКО. Если принять в качестве основных цветов те, которые были предложены Джаддом, можно выразить координаты цвета R, G, V через значения координат цвета X, Y, Z МКО [330]:

$$\begin{aligned} X &= 2,954R - 2,174G + 0,220V, \\ Y &= 1,000R, \\ Z &= 1,000V, \end{aligned} \quad (2.88)$$

или, наоборот, как

$$\begin{aligned} R &= 1,00Y, \\ G &= -0,46X + 1,36Y + 0,10Z, \\ V &= 1,00Z. \end{aligned} \quad (2.89)$$

Заменяя в уравнениях (2.88) R, G, V на R', G', V' , а X, Y, Z на X', Y', Z' , мы получаем аналогичное уравнение, связывающее R', G', V' с X', Y', Z' . Вводя уравнения (2.87) в новое уравнение

и затем выражая R , G , V в соответствии с (2.89), мы получаем следующее преобразование:

$$\begin{aligned} X' &= \beta X + 2,954(\alpha - \beta)Y + 0,220(\gamma - \beta)Z, \\ Y' &= \alpha Y, \\ Z' &= \gamma Z. \end{aligned} \quad (2.90)$$

Для заданных значений коэффициентов фон Криса α , β , γ координаты цвета X , Y , Z МКО относятся к стимулу, воспринимаемому наблюдателем, адаптированным к одному адаптирующему стимулу, в то время как координаты цвета X' , Y' , Z' относятся к тому же стимулу, но воспринимаемому наблюдателем, адаптированным к другому адаптирующему стимулу.

Приведем пример [237]. Предположим, что наблюдатель вначале адаптирован к дневному свету (источник С МКО) и предмет, который он наблюдает при свете лампы накаливания (источник А МКО), имеет координаты цвета X , Y , Z и вызывает соответствующее цветовое ощущение. Затем наблюдатель адаптируется к свету лампы накаливания (источник А МКО), и мы задаемся целью предсказать координаты цвета X' , Y' , Z' , вызывающие то же самое цветовое ощущение. В соответствии с (2.90) эта проблема разрешима, если мы знаем коэффициенты фон Криса α , β , γ . Чтобы найти эти коэффициенты, нам необходима по крайней мере пара соответствующих цветов (X_0 , Y_0 , Z_0 и X'_0 , Y'_0 , Z'_0). В данном примере такую пару представляют цвета адаптирующих стимулов С и А. Экспериментальные данные показывают, что предметы с неселективным отражением воспринимаются близкими к серым при адаптации наблюдателя к цветному стимулу, даже если адаптирующий стимул значительно отличается от дневного света [238, 346]. Таким образом, мы можем предположить (без риска допустить серьезную ошибку), что цветовое постоянство для предметов с неселективным спектром отражения строго сохраняется. Координаты цвета источников С и А МКО равны

$$\begin{aligned} X_c &= 98,0, & Y_c &= 100,0, & Z_c &= 118,1, \\ X_a &= 109,8, & Y_a &= 100,0, & Z_a &= 35,5. \end{aligned}$$

Из (2.89) вычисляем

$$\begin{aligned} R_c &= 100,0, & G_c &= 102,7, & V_c &= 118,1, \\ R_a &= 100,0, & G_a &= 89,0, & V_a &= 35,5 \end{aligned}$$

и при помощи (2.87) получаем коэффициенты фон Криса

$$\alpha = \frac{R_c}{R_a} = 1,000, \quad \beta = \frac{G_c}{G_a} = 1,154, \quad \gamma = \frac{V_c}{V_a} = 3,327.$$

Наконец, для этого случая уравнения (2.90) принимают вид

$$\begin{aligned} X' &= 1,154X - 0,458Y + 0,473Z, \\ Y' &= 1,000Y, \\ Z' &= 3,327Z. \end{aligned}$$

Эти уравнения могут быть записаны через координаты цветности [уравнение (1.14)]:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{0,681x - 0,931y + 0,473}{-2,646x - 3,258y + 3,800}, \\ y' &= \frac{y}{-2,646x - 3,258y + 3,800}. \end{aligned}$$

Координаты x , y относятся к предмету, освещенному источником А, и соответствуют реакции наблюдателя, адаптированного к источнику С. Координаты x' , y' , предсказываемые теорией, будут соотноситься с реакцией наблюдателя, адаптированного к источнику А. Выщепский разработал графический метод определения x' , y' для любой цветности x , y по цветовому графику (x , y) МКО [714].

Простая линейная гипотеза для цветовой адаптации, обсуждавшаяся выше, подчиняется важному колориметрическому принципу фон Криса [374]—*постоянству цветового равенства*, который мы ввели ранее в связи с обсуждением уравнивания по цвету. Этот принцип гласит, что для условий, при которых выполняются законы аддитивного смешения цветов Грассмана, состояние адаптации глаз наблюдателя не влияет на метамерное цветовое равенство.

Соответствие между наблюдаемыми сдвигами цвета и теми сдвигами, которые прогнозируются на основе закона коэффициентов фон Криса, отнюдь не совершенно, хотя в общем это соответствие наблюдается. Часть расхождений можно объяснить отсутствием выбора правильных основных цветов фундаментальной системы. Другая часть может вызываться недостаточным контролем состояния адаптации глаза, приводящим к неустойчивым оценкам наблюдателя. Как указывают некоторые наблюдатели, возможно также, что закон коэффициентов фон Криса выполняется не строго, и поэтому следует использовать другие, более совершенные модели цветового зрения [304, 736].

ЦВЕТОПЕРЕДАЧА ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

С разработкой новых искусственных источников света типа флуоресцентных ламп, ксеноновых ламп низкого и высокого давления проблема оценки цветопередающих свойств этих источников приобрела большое практическое значение. Многие из этих искусственных источников предназначены для создания освеще-

ния, близкого к дневному свету, в магазинах, на фабриках, в театрах, жилых домах и т. д. Цвет света, излучаемого такими источниками, очень похож на цвет некоторой фазы естественного дневного света. Однако, к сожалению, относительное спектральное

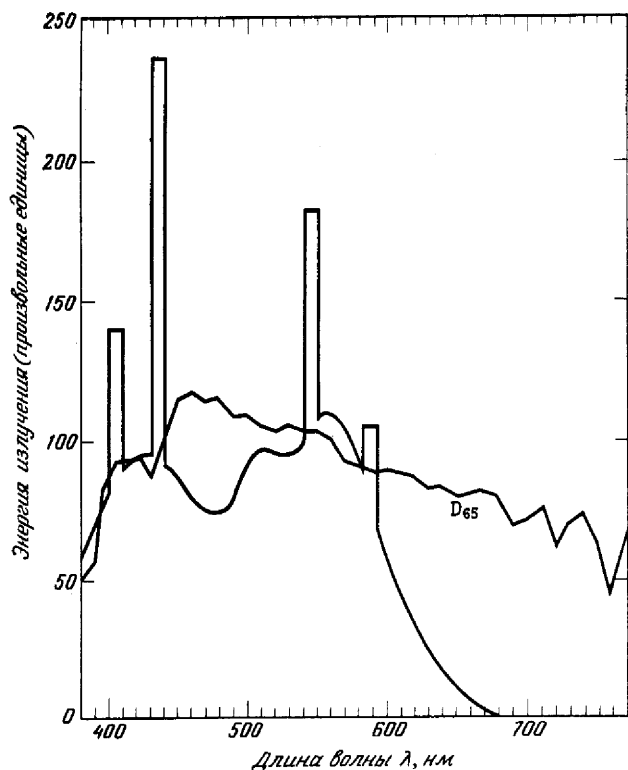


Рис. 2.92. Относительное спектральное распределение энергии стандартного излучения D_{65} МКО (представляющего средний естественный дневной свет) и типичной флуоресцентной лампы дневного света с приблизительно такой же цветностью.

распределение энергии многих искусственных источников дневного света не всегда хорошо соответствует распределению энергии естественного дневного света такого же или аналогичного цвета. На рис. 2.92 в качестве примера представлено относительное спектральное распределение энергии излучения типичной флуоресцентной лампы дневного света и стандартного излучения D_{65} МКО, которое, как известно, очень хорошо представляет естественный дневной свет. Оба излучения имеют приблизительно одну и ту же цветность и коррелированную цветовую температуру ~ 6500 К.

Расхождения между двумя кривыми совершенно очевидны и особенно значительны в длинноволновой части спектра и на длинах волн линий испускания ртути (405, 436, 546, 578 нм).

Различия в спектральном составе являются основным источником затруднений, так как цвет одних и тех же предметов, освещенных искусственным источником и естественным дневным светом, будет различаться. Иногда искажения цвета, или, говоря техническим языком, колориметрические сдвиги, могут иметь существенное значение. Возьмем, к примеру, витрину мясного магазина, освещаемую флуоресцентной лампой с таким спектральным составом излучения, как показано на рис. 2.92. Весьма вероятно, что в этом свете цвет только что разрезанного мяса будет восприниматься менее насыщенным и более темным, чем при естественном дневном освещении. Это вызовет у покупателя сомнения в отношении свежести мяса и, возможно, отобьет у него охоту купить его. Разумеется, изготовители ламп сознают эти трудности и пытаются улучшить цветопередающие свойства выпускаемых ламп, вводя в них различные добавки фосфоров, чтобы увеличить выход потока излучения в длинноволновой части спектра. Обычно такие лампы известны как флуоресцентные лампы типа Де Люкс. Однако улучшение цветопередающих свойств обычно означает потерю эффективности, т. е. потерю выхода света по отношению к входной электрической мощности. Более того, точное воспроизведение спектрального состава естественного дневного света невозможно из-за линий излучения ртути, которые нельзя подавить и которые должны присутствовать для возбуждения флуоресценции фосфоров. Лучшее, что можно сделать с лампами такого типа, достаточно хорошо было представлено на рис. 2.9. Отметим значительно расширенную длинноволновую часть спектрального распределения энергии этой флуоресцентной лампы.

Изготовители ламп предлагают множество флуоресцентных ламп различных типов, одни из которых должны быть высокоэффективными, а другие иметь хорошие цветопередающие свойства. Совсем непросто выбрать тип лампы, наиболее подходящей для данной цели, и может потребоваться консультация инженера-светотехника, архитектора, специалиста по оформлению интерьеров и т. д. Эти эксперты в свою очередь должны хорошо знать отличительные свойства различных типов ламп, имеющихся в их распоряжении. Одним из этих свойств является цветопередача. Это свойство источника света стали лучше понимать только в последние годы. В развитие представлений о цветопередаче внесли свой вклад многие специалисты, разрабатывающие методы определения цветопередающих свойств источников света [24, 111, 112, 208—211, 246, 464—467, 476—479, 495—497, 517—520, 634, 635, 720]. Комитет по цветопередаче МКО подготовил официальные рекомендации по методу измерения и определения цветопередаю-

щих свойств источников света [99]. Метод МКО был развит в соответствии с результатами многих исследований, перечисленных выше, и получил общее признание в качестве полезного метода в светотехнике. Однако метод МКО не является исчерпывающим решением проблемы определения цветопередающих свойств источника света, и, как видно из некоторых публикаций после 1965 г., работа в этом направлении продолжается.

Трудности, встречающиеся при разработке универсального метода, многочисленны. Прежде чем обсудить некоторые аспекты этой проблемы, следует сначала дать широко принятое в настоящее время определение цветопередачи источника света [100]: цветопередача источника света характеризует влияние источника на восприятие цвета предметов по сравнению со стандартным источником света. На основе этого определения можно установить индекс цветопередачи источника света как меры соответствия зрительных восприятий цветных объектов, освещенных исследуемым и стандартными источниками света в определенных условиях. Обычными условиями являются следующие: наблюдатель должен обладать нормальным цветовым зрением и быть адаптированным к окружению при освещении каждым источником по очереди. Для вывода индекса цветопередачи в соответствии с вышеприведенным определением мы должны знать способ точного определения восприятия цвета предметов и различий между ними, а также договориться относительно стандартного источника, с которым хотят сравнить данный исследуемый источник. Еще не решена задача точного определения восприятия цвета предметов, т. е. цвета несамосветящихся тел, в самом общем случае, когда наблюдатель рассматривает сложную картину, составленную из большого числа предметов и различных видов источников, освещающих их. Различные зрительные явления, такие, как одновременный контраст, последовательный контраст, постоянство цвета и память на цвета, вступают в действие и вносят существенный вклад в результирующее восприятие цвета сложной картины. Однако эти знания не позволили нам продвинуться вперед настолько, чтобы решить эту задачу количественно (см. следующий раздел). Однако можно рассмотреть упрощенный вариант задачи, ограничиваясь такими условиями, при которых состояние адаптации наших глаз почти полностью определяется только качеством контролируемого излучения, в то время, как находящиеся в поле зрения другие предметы оказывают на нее незначительное влияние. В этих условиях можно, по крайней мере приблизительно, качественно оценить восприятие цвета предметов, используя стандартного наблюдателя, систему координат МКО и, например, закон коэффициентов фон Криса для расчета состояния адаптации глаза (см. предыдущий раздел).

Выбор стандартного источника, с которым сравнивается опытный, также представляет проблему. При таком выборе следует руководствоваться всем тем, что понимается под первоначальным восприятием цвета предмета. Другими словами, это воспринимаемый цвет предмета при том освещении, при котором обычно видят этот предмет. В большинстве случаев им будет свет лампы накаливания или некоторая фаза дневного света. Спектральный состав света лампы накаливания, которая может иметь цветовую температуру вплоть до 3400 К, адекватно определяется формулой Планка [уравнение (2.1)]. Спектральный состав различных фаз естественного дневного света хорошо определяется в диапазоне 4000 К и выше (см. стандартные излучения D МКО). Из ряда излучений ламп накаливания и дневного света мы можем выбрать стандартное излучение, по отношению к которому будут проверяться цветопередающие свойства исследуемого источника. Для удобства на практике среди имеющихся стандартных излучений выбирается излучение, коррелированная цветовая температура которого максимально соответствует цветовой температуре исследуемого источника. Такой выбор полностью или по крайней мере почти полностью исключает необходимость учета изменения состояния адаптации глаза. Таких изменений не будет, если как стандартный, так и исследуемый источники имеют один и тот же цвет, т. е. образуют метамерное цветовое равенство.

Степень соответствия воспринимаемых цветов предметов, освещаемых исследуемым и стандартными источниками, удобно оценивать в равноконтрастном цветовом пространстве. Различия в цветности обычно считаются наиболее важными, и поэтому использования равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г. (рис. 2.76) достаточно для приблизительного определения таких различий.

Метод МКО [99] очень хорошо согласуется с отмеченными выше требованиями. Он является в основном методом сдвига цвета, так как с его помощью рассчитываются средние колориметрические сдвиги на равноконтрастном цветовом графике МКО 1960 г. для ряда исследуемых предметов по отношению к исследуемому и стандартному источникам излучения той же цветности. Считается, что набор из восьми образцов атласа Манселла различного цветового тона, средней насыщенности и светлоты обеспечивает удовлетворительное представление охвата практически важных цветов предметов. Спектральные коэффициенты отражения образцов приведены в таблице, данной в публикации МКО [99]. Дополнением к основному набору из восьми образцов являются еще шесть образцов из атласа Манселла с более высокой насыщенностью. Их используют в особых случаях.

Общий индекс цветопередачи R_a , рекомендованный МКО [99], определяется как

$$R_a = 100 - 4,6\overline{\Delta E}_a, \quad (2.91)$$

где $\overline{\Delta E}_a$ представляет среднее арифметическое восьми значений $\Delta E_{a,i}$ для восьми исследуемых цветов, рассчитанных следующим образом:

$$\Delta E_{a,i} = 800 \{ [(u_{0,i} - u_0) - (u_{k,i} - u_k)]^2 + [(v_{0,i} - v_0) - (v_{k,i} - v_k)]^2 \}^{1/2},$$

где u, v — координаты равноконтрастного цветового графика МКО 1960 г. В частности, мы обозначили

$u_{k,i}, v_{k,i}$ — координаты цветности i -го образца относительно исследуемого излучения k ;

$u_{0,i}, v_{0,i}$ — координаты цветности i -го образца относительно стандартного излучения o ;

u_k, v_k — координаты цветности испытуемого излучения k ;

u_0, v_0 — координаты цветности стандартного образца o .

В методе МКО ставится условие, чтобы цветность стандартного излучения была одинакова или почти одинакова цветности исследуемого излучения. Допускается очень небольшое различие ($u_0 - u_k$) и ($v_0 - v_k$). Комитет по цветопередаче МКО собирается выпустить второе издание метода МКО [99], который будет давать возможность оценивать цветопередающие свойства тех исследуемых излучений, которые заметно отличаются по цветности от стандартного излучения. Здесь начинает вступать в действие цветовая адаптация, и, для того чтобы количественно учесть ее, комитет рекомендует использовать закон коэффициентов фон Криса.

Метод оценки цветопередающего свойства источников света, рекомендованный МКО, предназначен для оценки способности источника придавать предметам их истинный цвет. Для источников с высокой цветовой температурой истинным считается цвет предмета при дневном освещении. В случае источников с низкой цветовой температурой истинным считается цвет предмета при освещении лампой накаливания. Для критической оценки окрашенных предметов потребитель должен выбрать тот источник, который дает достаточно хорошее приближение к истине. Обычно это означает, что источник должен иметь довольно высокий общий индекс цветопередачи МКО (95 и более). В некоторых особых случаях для контроля может потребоваться источник с более высоким индексом цветопередачи и более жесткие допуски на фактическое относительное спектральное распределение энергии излучения. Такие особые случаи возникают при необходимости проведения критического сравнения метамерных цветовых стимулов предметов [44, 476, 478, 729]. См. обсуждение стандартных источников для колориметрии, рис. 2.7—2.10.

Другой, совершенно противоположный случай состоит в придании цветным предметам привлекательности. Общее освещение домов, учреждений, заводов, ресторанов, гостиных и танцевальных залов не предназначается для критической оценки окрашенных

предметов. Если осветительная арматура для этих целей приукрашивает людей так, что каждый прекрасно выглядит, пышет здоровьем, то она более предпочтительна, чем та, которая безжалостно раскрывает истинное состояние здоровья. Подобным же образом освещение в столовых и ресторанах должно быть таким, чтобы еда выглядела как можно аппетитней. Когда еда подана на стол, имеется достаточно времени для критической оценки ее цвета с тем, чтобы обнаружить низкое качество гастрономических продуктов или малейшие недостатки в ее приготовлении. Все склонны поддерживать оптимистическую точку зрения, даже если она включает элемент притворства. Для подобных целей используют косметику, но никого в данном случае не беспокоит элемент ухищрения и утаивания. Аналогично осветительная арматура, способствующая поддержанию оптимистической точки зрения за счет прикрашивания цветных предметов, оказывает ценную услугу.

Джаддом в 1967 г. [343] был предложен индекс прикрашивания для искусственных источников. В своей основе индекс прикрашивания подобен индексу цветопередачи, за тем исключением, что заданные цвета не будут истинными цветами, рассчитанными для стандартного источника, а будут представлять собой предпочтительные цвета исследуемых образцов, рассматриваемых при стандартном источнике. Отметим, что основанный на этом принципе индекс прикрашивания может иметь более высокое значение для источника, существенно отличающегося от стандартного, чем для самого стандартного источника. Таким образом, изготовитель ламп может разработать искусственный источник, превосходящий по прикрашиванию дневной свет или любую стандартную лампу накаливания и потому способный вызвать большее одобрение публики для придания привлекательности при рассмотрении выбранных цветных предметов.

Наиболее важным из предпочтительных цветов является цвет, характеризующий комплекцию человека. Комплекция сама представляет человека почти при каждом типе освещения; она часто, вольно или невольно, становится критерием оценки данного освещения [77]. Предпочтительный цвет, характеризующий комплекцию человека, существенно отличается от истинного среднего цвета: он краснее и насыщеннее [28, 566].

Следующим по значимости идет цвет пищи. При освещении домов, ресторанов, магазинов и т. д. восприятие товаров, пищевых продуктов и мебели может быть таким же важным, как и восприятие внешнего вида человека [28]. Сандерс [566] определил предпочтительный цвет чая, масла и ломтиков картофеля, однако он обнаружил, что из этих трех видов продуктов только для масла наблюдается значительное расхождение между истинным и предпочтительным цветами.

Индекс прикрашивания Джадда [343] привлек внимание всех, кто работает с индексами цветопередачи, однако, чтобы установить его ценность в качестве практического рабочего инструмента, необходимо провести дальнейшую работу [305].

ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА ПРЕДМЕТОВ В СЛОЖНОЙ ОБСТАНОВКЕ

Большая часть наших усилий по исследованию цветового зрения направлена к одной цели — количественно прогнозировать цвета, воспринимаемые наблюдателем при рассмотрении в естественной обстановке множества предметов: пейзажа, прилавка с пищевыми продуктами в магазине самообслуживания, обстановку и декорации на театральной сцене, картины, витрины магазина и т. д. Эта цель далека от достижения, хотя уже накопилось достаточно знаний (главным образом за последние 100 лет), которые дают нам общее понимание того, что воспринимает наблюдатель с нормальным цветовым зрением в сложной обстановке. Это понимание основывается главным образом на лабораторных экспериментах, специально предназначенных для качественного, а где возможно, и количественного изучения различных зрительных явлений, играющих важную роль в цветовом восприятии.

Когда наши глаза рассматривают картину, они непрерывно блуждают по ней, задерживаясь то на одном, то на другом предмете или световом пятне. При этом чувствительность наших глаз к цвету постоянно и быстро изменяется, что влияет на наше восприятие цвета. Значение таких изменений можно представить с помощью простых экспериментов. Один такой эксперимент можно провести следующим образом [339]: квадратное световое пятно, состоящее из красного, желтого, зеленого и синего квадрантов, рассматривают в течение 15 сс фиксацией взгляда в его центре, после чего рассматривается чистое белое поле также с фиксацией его центра. Почти мгновенно появится остаточное изображение, дополнительное к четырем цветным квадрантам, наблюдаемым перед этим, т. е. та область сетчатки, на которую первоначально воздействовал квадрант красного цвета, будет воспринимать белое поле как сине-зеленым. Подобным образом другие участки белого поля будут восприниматься пурпуровато-синими, красно-пурпурными и оранжевыми (рис. 2.93). Это явление называется последовательным контрастом или проявлением негативного остаточного изображения на белом фоне. Чтобы появилось остаточное изображение, необходимо предварительно посмотреть на цветное поле и зафиксировать на нем свое внимание в течение нескольких секунд. Однако если оно появилось, то движется вместе с глазом и не имеет объективного характера. По истечении короткого времени остаточное изображение исчезает.

Изменения цветовой чувствительности глаза могут также происходить мгновенно. Чтобы продемонстрировать это явление, можно провести следующий опыт [339]. Имеется пластинка, которая при дневном свете по отношению к средне-серому фону воспринимается светло-пурпуровато-красной средней насыщенности (по Манселлу $\sim 5RP\ 6/4$). Как только серый фон заменяется на ярко-пурпурный, пластинка мгновенно становится серой. Изменение пурпуровато-красного на серый происходит немедленно, без какой-либо задержки времени. Следует отметить, что серый цвет

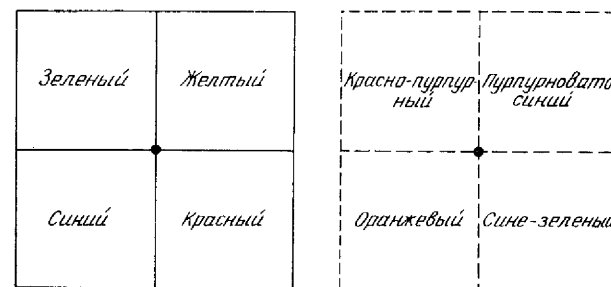


Рис. 2.93. Схема, иллюстрирующая опыт по демонстрации последовательного контраста.

Слева показаны цветные тона (и порядок их расположения), которые должны рассматриваться в течение примерно 15 с при фиксации центра квадрата. Справа представлены дополнительные цветные тона, воспринимаемые при фиксации центра белого поля после воздействия на центральную область сетчатки цветного квадрата слева.

стабилен и в такой же степени кажется свойственным пластинке при наблюдении ее на ярком пурпурном фоне, как пурпуровато-красный цвет при наблюдении ее на сером фоне. Таким образом, мы приходим к заключению, что восприятие цвета зависит от фона. Наблюдаемое явление называется одновременным контрастом. На основе теории противоположных цветов Джемсон и Гурвич [302] разработали формулы для описания одновременного и последовательного контрастов.

В связи с этим полезно напомнить еще раз, что определение цвета стимулов в колориметрии значениями координат цвета или доминирующей длины волны, чистотой и яркостью обычно не соответствует восприятию цвета стимула, пока не будут поддерживаться определенные условия наблюдения, т. е. использование темного окружения и отсутствие предварительной адаптации глаза хроматическим стимулом. Аналогично обозначения Манселла цвета предмета коррелируют с восприятием цвета только в том случае, когда предмет рассматривается при дневном свете адаптированным к нему наблюдателем с нормальным цветовым зрением.

При рассматривании предметов в сложной обстановке глаза постоянно перебегают с одних цветных пятен света на другие, при этом начинают действовать как одновременный, так и последовательный контрасты, которые мгновенно и весьма существенно влияют на наше восприятие цвета. Тот факт, что глаз постоянно пробегает по участкам объекта и останавливается то на одном световом пятне, то на другом, имеет первостепенную важность в восприятии цвета. Наиболее убедительно это могут продемонстрировать устойчивые изображения на сетчатке [17, 34, 551]. Устойчивое изображение на сетчатке является таким изображением, которое остается всегда на одной и той же совокупности рецепторов сетчатки (колбочек, палочек). Световое пятно, появляющееся таким образом, что исключается какая-либо возможность последовательного контраста даже из-за незначительного подрагивания глаза, становится невидимым в течение некоторого времени — от нескольких секунд до одной минуты. Эксперименты такого рода без сомнения доказывают, что восприятие цвета значительно зависит от переменного возбуждения рецепторов сетчатки. Однако имеются еще и другие факторы, которые влияют на восприятие цвета, особенно если мы имеем дело с восприятием цвета предметов.

Для доказательства утверждения можно предположить, что координаты цвета могут быть связаны с лучистым потоком, который поглощается тремя фотопигментами в рецепторах сетчатки (см. раздел, касающийся теории цветового зрения). Можно также предположить, что при учете влияния цветовой адаптации результирующее восприятие апертурного цвета, т. е. цвета, воспринимаемого как относящегося к отверстию в экране, не локализованного по глубине, непосредственно связано с сигналами, поступающими от рецептора в мозг по оптическому нерву. Однако когда воспринимается цвет предмета, одновременно в мозг должна быть передана информация о восприятии предмета. Способ, которым эти сигналы обрабатываются в мозгу, может в некоторой степени влиять на результирующее цветовое восприятие предмета. Обычно это сложное явление объясняют, предполагая, что одновременно с восприятием цвета предмета происходит восприятие цвета излучения, освещающего данный предмет [340]. Различие между воспринимаемыми цветами, которые относятся к световым пятнам изображения, и теми цветами, которые относятся к предметам, представленным комбинациями этих пятен, может быть очень большим. В самом деле, можно показать, что предмет, отражающий свет любой цветности, при помещении в соответствующие условия воспринимается серым [234, 235].

В эксперименте Хелсона [234] несколько наблюдателей с нормальным цветовым зрением рассматривали серию накрапок с неселективными спектрами отражения и яркостью в диапазоне при-

близительно от 0 до 100 при красном, желтом, зеленом и синем свете, каждый из которых почти соответствовал некоторой узкой области спектра. Наблюдатели выделили по одной и более накрапок, воспринимающихся серыми, независимо от используемого источника света. Это постоянство цвета предмета наводит на мысль, что наблюдатель может подсознательно не принять во внимание цвет источника, и мы должны заключить, что каждая точка на цветовом графике при некоторых условиях должна относиться к категории серого цвета. Хелсону и Микелсу [238] удалось показать, что благодаря одному последовательному контрасту большая часть цветового графика (x , y) МКО может давать восприятия апертурного цвета без цветового тона. Вообще говоря, мы можем констатировать, что воспринимаемый цвет образцов с неселективным спектром отражения при цветном свете соответствует либо цвету источника, либо цвету остаточного изображения, который дополняет цвет источника, либо серому цвету. То, каким точно будет восприниматься цвет, зависит от соотношения яркостей испытуемого стимула и адаптации [234].

Джадд разработал эмпирические формулы определения цветового восприятия любого предмета, рассматриваемого при любом виде освещения через цветовой тон, насыщенность и светлоту [325]. В этих формулах учтена очевидная, но неосознанная способность наблюдателя не принимать во внимание цвет источника, а также экспериментальные данные, опубликованные Хелсоном [234]. Исключение влияния цвета источника учитывается выбором точки на равноконтрастном цветовом графике, по предположению соответствующей восприятию серого в виде предмета. Для наблюдателя, адаптированного к дневному свету, эта ахроматическая точка располагается вблизи точки, представляющей цветность дневного света. Для наблюдателя, рассматривающего предметы в разных точках, ахроматическая точка выбирается вблизи той, которая представляет среднюю цветность окружающей обстановки. Формулы Джадда для прогнозирования цветового восприятия предметов являются эмпирическими и не указывают на процессы, посредством которых зрительный механизм может обеспечить прогнозируемые восприятия цвета. Полагают также, что формулы не обеспечивают точного прогнозирования восприятия цвета в соответствии с численными экспериментальными данными [54, 325, 375]. Однако они обеспечивают основу для довольно удачных качественных оценок цветового восприятия предметов [561].

Интересное и довольно успешное использование формул было сделано применительно к широко известному методу двуцветной проекции Лэнда [37, 385], а также [340, 524, 525]. Лэнд показал, что, проецируя на экран два цветоделенных позитивных изображения, можно более наглядно продемонстрировать различные явления, связанные с цветовым восприятием предмета в сложной

обстановке. Цветоделенные позитивы изготовлены следующим образом: многоцветный объект был дважды сфотографирован — один раз через светофильтр, пропускающий длинноволновую часть видимого спектра (от 585 до 700 нм), а другой через светофильтр, пропускающий среднюю часть (от 490 до 600 нм). При фотографировании использовались такие экспозиции, которые приводили к одинаковому почернению по серой шкале. Изображение одного из этих позитивов (обычно выполненного с длинноволновым светофильтром), как правило, проецируется на экран в красном свете (от 585 до 700 нм), изображение другого — в свете лампы накаливания. Для проектирования использовались также другие излучения. Оба изображения на экране тщательно совмещают. С помощью метода двуцветной проекции могут быть воспроизведены некоторые изображения, представляющие предметы, имеющие цвета любого тона. Однако, как следовало ожидать, цветовые восприятия предметов, полученные при помощи метода двуцветной проекции, составляют двумерный охват. Изображения, представляющие достаточно полный трехмерный охват воспринимаемых цветов предметов, обязательно должны воспроизводиться со значительными искажениями. Пары цветов, отличающихся на оригинале, при воспроизведении методом двуцветной проекции могут походить друг на друга. Метод двуцветной проекции, хотя и не имеет большой потенциальной ценности для практического использования в фотографии и цветном телевидении, является прекрасным средством демонстрации явлений восприятия цвета предметов [425, 525, 583, 681, 694, 695].

Другим мало понятным явлением, которое иногда может играть важную роль в восприятии цвета предметов, является память на цвета [8, 28]. Как следует из наименования, это явление заключается в следующем: когда на изображении появляется знакомый предмет, то восприятие цвета имеет тенденцию к изменению в направлении того цвета, который первоначально приписывался данному предмету.

В заключение можно сказать, что восприятие цвета предметов в сложной обстановке представляет трудную задачу для исследователя цветового зрения, когда приходится количественно прогнозировать восприятие данного изображения наблюдателем. Однако наиболее важные явления, которые начинают действовать при восприятии цвета предметов, известны, по крайней мере качественно, в течение более столетия. К их числу относятся явления последовательного и одновременного контрастов, цветовое постоянство (т. е. в расчет не принимается цвет излучения) и память на цвета. Метод двуцветной проекции обеспечивает интересный способ демонстрации восприятия цвета предметов в сложной обстановке, где можно наблюдать действие всех вышеупомянутых явлений одновременно. Хотя эмпирическая формула Джадда в общих чер-

тах прогнозирует большинство восприятий цвета предметов в простых условиях, необходима дальнейшая работа по количественному прогнозированию на основе всесторонней теории цветового зрения для всех без исключения условий.

ЯЗЫК ЦВЕТОВЫХ ТЕРМИНОВ

К объяснению цветовых явлений привлекаются такие области науки как химия, физика, физиология, психофизика, психология, кроме того, с цветом встречаются в ботанике, зоологии, геологии, археологии, антропологии. Выпуском окрашенных материалов занимаются многие отрасли промышленности: бумажная, текстильная, керамическая, лакокрасочная, производство пластмасс. Различный подход к цвету привел к распространению различных цветовых терминов. Мало кто из специалистов основательно знаком с одним из этих терминологических языков и, вероятно, никто не знает всех цветовых терминов.

Тем не менее каждый, кто занимается цветом, должен хорошо знать терминологию в одной области и иметь ясное представление об остальных.

Правильное использование языка цветовых терминов является ценным средством общения и понимания. Оно позволяет специалистам, работающим над различными аспектами цвета, понимать друг друга и успешно сотрудничать. Много времени было затрачено впустую на споры между людьми, пытающимися выразить одну и ту же мысль на личных языках цветовых терминов. Также впустую было израсходовано много средств, поскольку покупатель считал, что он понимает, что подразумевает изготовитель под цветом поставляемых товаров, но на самом деле это было не так. В данной книге используются в основном психофизический язык цветовых терминов, разработанный МКО и опубликованный в Международном светотехническом словаре [100] наряду с терминами из физики, физиологии, психологии и технологии красителей. Как читатель несомненно заметил, психофизический язык цвета довольно сложен; будем надеяться, что он также заметил, насколько он хорошо приспособлен к описанию и решению многих цветовых проблем, возникающих в промышленности и торговле. Было бы ошибкой считать эту терминологию установившейся, потому что на самом деле она очень быстро меняется. Ошибочно также полагать, что любой язык цветовых терминов, разработанный с учетом какой-либо одной точки зрения, может служить удобным средством выражения всего, что нужно сказать о цвете. Можно привести пример, подкрепляющий это мнение. Это история Джека и Джилл.

По-видимому, Джек, молодой психофизик, был склонен некоторое время назад попробовать маргарин вместо масла и в конце

концов он так изменил свой вкус, что предпочитал маргарин маслу. Его супруга Джилл возражала против маргарина не столько из-за его вкуса, сколько потому, что должна была тратить время на смешивание его с желтым красителем, прилагаемым к маргарину, который продавали белым.

Джек: Но почему ты не подаешь его на стол белым? Мне все равно, какого он цвета.

Джилл: Нет, я не могу намазывать хлеб белым маргарином, он напоминает мне свиное сало и у меня пропадает аппетит.

Джек: А! Это как раз из моей области. Цвет определяется доминирующей длиной волны, чистотой и коэффициентом яркости. Я знаю, как придать цвет маргарину без красителя. Нужно просто использовать освещение обеденного стола желтым светом и это придаст бесцветному маргарину такую же самую доминирующую длину волны, чистоту и коэффициент яркости, как у масла. Ты не сможешь их различить.

Джилл (с сомнением): Я ничего не знаю о доминирующей длине волны, однако действуй и вставь лампочку желтого цвета.

Итак, Джек принес домой желтую лампочку и гордо показал Джилл рядом на одной тарелке кусочек масла и кусочек бесцветного маргарина.

Джек: Видишь, как я тебе и говорил, при желтом свете ты не сможешь их различить.

Джилл: Я вижу очень хорошо. Ты сделал так, что они оба выглядят как свиное сало. Можешь выбросить эту желтую лампочку.

Джек (несколько смущенно): Хм, они оба действительно кажутся белыми. О! Теперь я понимаю. Чтобы они выглядели желтыми, нужно использовать черный фон.

Джилл: Ты никогда не признаешься, что не прав. Если ты думаешь, что я собираюсь использовать черные тарелки на черной скатерти, ты глубоко ошибаешься.

Таким образом, Джилл победила в споре, как обычно.

Психофизические термины «доминирующая длина волны», «чистота, коэффициент яркости» относятся к свету, отражаемому предметом. «Белый» и «желтый» являются психофизическими терминами для описания цвета, воспринимаемого как собственный цвет предмета. Выше уже приводились слова д-ра Эмеса из Дортмутского глазного института: «То, что мы видим, является нашей лучшей догадкой о том, что в действительности находится перед нами». На черном фоне оба кусочка нам кажутся желтыми. На белом фоне при желтой лампе безошибочно обнаруживается то, что оба кусочка выглядят такими благодаря желтому освещению; наша догадка о том, что оба кусочка желтые, немедленно отвергается в пользу того, что оба кусочка белые. Это явление часто ошибочно припи-

сывают хроматической адаптации. Действительно, когда человек смотрит на белую скатерть при желтом свете в течение пяти или более минут, глаз адаптируется к желтому так, что восприятие цвета освещения меняется от ярко-желтого к бледно-желтому. Однако свет, отраженный от кусочков маргарина и масла, тарелок и скатерти, меняет цвет, и сами предметы в процессе адаптации воспринимаются белыми. Это явление было изучено немецким психологом Иеншем [299] под именем превращение цвета.

Мораль этой истории такова: сама по себе доминирующая длина волны не влияет на потерю аппетита, однако это может сделать аспект восприятия цвета пищи, если он отличается от привычного. Эти аспекты восприятия следует описывать психологическими (субъективными) терминами. В торговле должны интересоваться тем, что видит покупатель. Цвет излучения, отраженного от предмета, является лишь частью проблемы.

В конце сороковых годов Межотраслевым советом по цвету США (ISCC) было положено хорошее начало по составлению сравнительного перечня цветовых терминов [486]. Перечни терминов и их определения были подготовлены большинством членов ISCC, затем подкомитет ISCC объединил их в сравнительный перечень, включающий 1550 терминов, расположенных в алфавитном порядке. В определениях этих терминов обнаруживаются сотни небольших и десятки более серьезных разногласий в значениях терминов. В него также включены многие цветовые термины из различных областей науки и техники, которые совершенно неизвестны тем, кто, подобно авторам данной книги, привык иметь дело с терминами, рекомендуемыми МКО. В качестве примера могут быть приведены такие термины как полосатость, изопаковая кривая, цветение, краснеющий, высокий, тень, отенок, полная слепота, эпискотистер, закон Хорнера, световые круги, сажа, дуахромизм, дуотонический, скудный, ровный, бледный, щербинки, сортировка, защитное покрытие, подцветка при кручении шелка, тембр, темпера, гуашь, сочный цвет, переливчатый цвет, верхний регистр, моментальный снимок, скупость красок, рутилант, тонкий слой краски, мягкий, резкий, полезное несоответствие, легкость. Нет сомнения в том, что ряд специалистов, пользующихся этой терминологией, испытывает такие же затруднения в понимании таких оптических терминов, как отрицательный цвет, трехцветное соотношение, алихна, желтое пятно и дихроизм. В задачу данной книги не входит разрешение противоречий в определениях или объяснение всех незнакомых терминов. Это потребовало бы подключения еще многих специалистов из различных отраслей науки и техники.

Несмотря на то что перечень ISCC был опубликован 25 лет назад, читатели все еще могут пользоваться им как уникальной подборкой информации такого рода.

Вместе с тем имеет смысл объединить термины и определения наиболее важных цветовых понятий, используемых в промышленности. Основным источником такой информации является Международный светотехнический словарь, изданный МКО в 1970 г. [100]. Этот словарь подготовлен совместно с Международной электротехнической комиссией (МЭК) и содержит около 900 терминов и их определений, касающихся всех разделов светотехники. Эти термины и определения даны на четырех языках: французском, английском, немецком и русском. Перевод одних только терминов дан на пяти дополнительных языках: испанском, итальянском, датском, польском и шведском; подробные алфавитные указатели терминов даны на всех девяти языках.

ОСНОВНЫЕ, ИЛИ ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ, ЦВЕТОВЫЕ ТЕРМИНЫ

Основные, или психологические, цветовые термины относятся к цветовым понятиям, субъективно определяемым каждым человеком и используемым им для описания собственного восприятия цвета. Изготовитель никогда не может с уверенностью сказать, каким будет восприниматься цвет его продукции. Каждый покупатель видит его несколько другим в зависимости от его типа зрительного восприятия или от того, на что он смотрел перед этим.

Эти термины относятся также к оценкам контролера, проверяющего соответствие цвета поставляемых товаров установленным требованиям.]

Цветовой тон. Свойство зрительного ощущения, обозначаемое словами: синий, зеленый, желтый, красный, пурпурный и т. д.

Насыщенность. Свойство зрительного ощущения, которое позволяет судить о количестве имеющегося чистого хроматического цвета независимо от количества ахроматического цвета. Для цветов одинаковой светлоты и цветового тона равные по ощущению интервалы изменения насыщенности (по Манселлу) соответствуют равным интервалам ощущения насыщенности. Однако в серии цветов с одинаковой насыщенностью с увеличением светлоты возрастает и насыщенность (по Манселлу).

Насыщенность. Свойство зрительного ощущения, позволяющее оценить пропорцию чистого хроматического цвета в общем цветовом ощущении.

Светлота. Свойство зрительного ощущения, согласно которому некоторая поверхность кажется испускающей больше или меньше света. Светлота может изменяться от очень темной до ослепляющей. Относится к стимулам, воспринимаемым как самосветящиеся.

Светлота. Свойство зрительного ощущения, согласно которому тело кажется диффузно пропускающим или диффузно отражающим более или менее значительную часть падающего света. Для светоотражающих тел предельными значениями светлоты являются черный и белый, для пропускающих тел — черный и абсолютно прозрачный и бесцветный. Термин относится к цвету несамосветящихся объектов.

ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ЦВЕТОВЫЕ ТЕРМИНЫ

Происхождение психофизических цветовых терминов связано с процессом установления цветового равенства между двумя смежными половинками поля фотометра или выявлением степени схождения или различия между двумя такими половинками.

Эти термины используются для точного определения цвета и решения ряда цветовых проблем. Вначале будут рассмотрены основные термины, затем термины Оствальда и Манселла.

Основные термины. Основные термины возникли в процессе установления цветового равенства между двумя смежными половинками поля фотометра.

Световой стимул. Лучистая энергия с определенными физическими характеристиками, проникающая в глаз и вызывающая ощущение света.

Цветовой стимул. Лучистая энергия с определенными физическими характеристиками, проникающая в глаз и вызывающая ощущение цвета.

Функция цветового (светового) стимула. Относительное спектральное распределение мощности цветового (светового) стимула. Для стимула самосветящихся объектов (источников света) функция совпадает с относительным спектральным распределением мощности излучения $S(\lambda)$ источника света. Для стимулов несамосветящихся объектов функция определяется произведением $\beta(\lambda) S(\lambda)$ или $\tau(\lambda) S(\lambda)$, где $\beta(\lambda)$ является спектральным коэффициентом отражения, а $\tau(\lambda)$ — спектральным коэффициентом пропускания объектов.

Цвет. Характеристика цветового стимула (лучистой энергии), благодаря которой наблюдатель может проводить различие между двумя полями зрения, одинаковыми по форме, размеру, структуре и отличающимися лишь спектральным составом. В данном контексте цвет определяется координатами цвета цветового стимула, проникающего в глаз. В противоположность психофизическому определению цвета *воспринимаемый цвет* определяется как свойство зрительного восприятия, благодаря которому наблюдатель может про-

водить различие между двумя полями зрения, одинаковыми по форме, размеру, структуре и отличающимися лишь спектральным составом.

Координаты цвета. Количества трех основных цветов, позволяющие воспроизвести рассматриваемый цветовой стимул в данной трехцветной системе. Рекомендуемые обозначения для координат цвета: X, Y, Z в стандартной колориметрической системе МКО 1931 г. и X_{10}, Y_{10}, Z_{10} в дополнительной стандартной колориметрической системе МКО 1964 г.

Координаты цветности. Отношение каждой из трех координат цвета к их сумме.

Доминирующая длина волны. Длина волны монохроматического цветового стимула, который при сложении в соответствующей пропорции с точно определенным ахроматическим стимулом дает цветное равенство с рассматриваемым стимулом. Если нельзя указать значение доминирующей длины волны (это относится к пурпурным цветам), то ее заменяют значением *дополнительной длины волны*.

Дополнительная длина волны. Длина волны монохроматического цветового стимула, который при сложении в соответствующей пропорции с рассматриваемым стимулом дает цветное равенство с точно определенным ахроматическим стимулом.

Условная чистота цвета. Отношение длин двух отрезков на цветовом графике, один из которых соответствует расстоянию между точками, представляющими цветность точно определенного ахроматического (белого) и рассматриваемого цветных стимулов, другой — расстоянию вдоль этого же направления от первой точки до точки границы цветного графика (линии спектральных цветностей или прямой пурпурных цветностей).

Метамерные цветовые стимулы. Цветовые стимулы различного спектрального распределения энергии, производящие один и тот же цвет в одних и тех же условиях наблюдения. Соответствующее свойство называется *метамеризмом*. Следует отметить, что цветовые стимулы определяются радиометрическими величинами, такими, как лучистая энергия. Часто фотометрические величины выводят из радиометрических величин для того, чтобы описать в психофизических терминах количество возбуждения, полученного глазом. В приложении этой книги дана специальная таблица радиометрических и фотометрических терминов и единиц.

Термины Оствальда. По теории Оствальда цвет светорассеивающего предмета определяется посредством того предмета из ряда идеализированных предметов особого рода, который дает цветное

равенство с данным. Под идеально отражающим предметом по Оствальду понимают предмет, имеющий спектральные коэффициенты отражения $\beta(\lambda)$, величина которых постоянна при одном значении между двумя дополнительными длинами волны и при некотором значении (отличающемся от первого, кроме белых, серых и черных цветов) в остальной области видимого спектра [160, 516]. Меньший из этих спектральных коэффициентов отражения

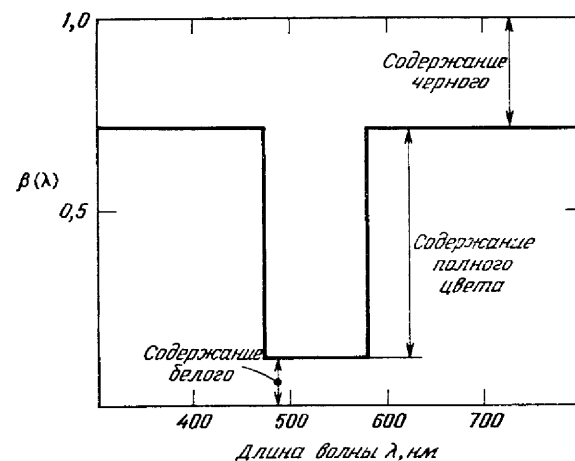


Рис. 2.94. Спектральные коэффициенты отражения непрозрачного образца, иллюстрирующие то, что подразумевается под идеальным цветом по Оствальду. Меньший из двух коэффициентов отражения характеризует содержание белого, разность между единицей и большим коэффициентом отражения — содержание черного, а разность между двумя коэффициентами отражения — содержание полного цвета.

характеризует содержание белого. Разность между единицей и большим коэффициентом спектрального отражения характеризует содержание черного. Разность двух спектральных коэффициентов отражения характеризует содержание полного цвета (рис. 2.94). Идеальный цвет предмета по Оствальду, определенный на рис. 2.94, должен быть пурпурным. Значения 480 и 580 нм выбраны в качестве дополнительных длин волн. Следует отметить, что сумма содержания белого, черного и полного цветов равна единице. Любые два из этих трех терминов могут служить для определения двух характеристик цвета. Обычно используют содержание белого и черного. Третья характеристика цвета в системе Оствальда называется *цветовым тоном* по Оствальду и соответствует довольно равномерному размещению светового круга. Номер цветового тона по Оствальду (поддерживаемый постоянным) однозначно связан с постоянным значением доминирующей или дополнительной длины волны. Цветовые карты, подобно *Руковод-*

ству по цветовой гармонии, построенные более или менее в соответствии с теорией Оствальда, оказались весьма ценными, а ряд цветowych терминов, получивших свое начало в работах Оствальда — очень удобными для выражения важных представлений о цвете в промышленности и торговле.

Чистый цвет. Идеальный цвет по Оствальду, для которого содержание белого и черного равно нулю;

Содержание белого. Меньший из двух спектральных коэффициентов отражения, характеризующий идеальный цвет по Оствальду.

Содержание черного. Разность между единицей и большим из двух спектральных коэффициентов отражения, характеризующих идеальный цвет по Оствальду.

Содержание полного цвета. Разность двух спектральных коэффициентов отражения, характеризующих идеальный цвет по Оствальду.

Теневые ряды. Ряды цветов, имеющих одинаковый цветовой тон по Оствальду и одинаковое отношение содержания полного цвета к содержанию белого; то же самое относится к рядам одинаковой цветности.

Цветовой тон по Оствальду. Обозначение доминирующей или дополнительной длины волны произвольными числами, обычно от 1 до 24.

Извалентные цвета. Цвета различных цветowych тонов по Оствальду, имеющие одно и то же содержание черного и белого.

Чистота по Оствальду. Отношение содержания полного цвета к содержанию белого. Примечание: для любого цветowego тона по Оствальду цвета с одинаковой чистотой по Оствальду имеют также постоянную условную чистоту.

Многие из тех, кто имеет дело со смешением красок то ли при разработке рецептур, то ли при смешении их на палитре, находят, что их идеи очень удобно выражаются в этих терминах Оствальда. Такие люди считают, что набор образцов цвета, расположенных более или менее в соответствии с системой Оствальда, весьма полезен, так как сразу видно, каким образом нужно смешивать краски, чтобы добиться необходимого эффекта.

Набор образцов, расположенных более или менее по системе Оствальда, в достаточной степени соответствует системе смешения красок, поэтому такие предположения обоснованы.

Термины Оствальда и цветowe карты для их иллюстраций успешно использовались для обучения студентов художественных учебных заведений и при разработке цветowego решения упаковок [249, 296]. Те, кто связан с процессом печати растровым клише, при котором происходит сочетание цветов хроматического и черного пигментов с белым цветом бумаги, выделяющимся между пе-

чатными точками, тоже находят много преимуществ в системе Оствальда и в использовании цветowych карт, созданных на ее основе. Они правы в большей степени, так как цветowe смешение благодаря наложению точек в данном случае точно соответствует принципам смешения цвета, на которых основана система Оствальда.

Термины Манселла. Термины Манселла возникли на основе оценок сходства и степени различия между цветами. Описание строения цветовой системы Манселла послужило введением к рассмотрению равноконтрастных шкал светлоты и цветности и обозначения Манселла были даны в связи с его атласом. Цветowe термины Манселла тесно связаны со свойствами самого цветowego восприятия [469].

Цветовой тон по Манселлу. Выражение по произвольным шкалам одного аспекта цветowego стимула предмета, определяемого его коэффициентом яркости (Y) и координатами цветности (x, y). Примечание: с точки зрения восприятия шкалы цветowego тона по Манселлу приблизительно равноконтрастны; при обычных условиях наблюдения цветовой тон по Манселлу соответствует цветowому тону воспринимаемого цвета данного образца.

Светлота по Манселлу. Выражение коэффициента яркости (Y) цветowego стимула предмета по приблизительно равноконтрастной (с точки зрения восприятия) шкале и в обычных условиях наблюдения. Примечание: в этих условиях светлота предмета по Манселлу тесно связана со светлотой воспринимаемого цвета данного образца.

Насыщенность по Манселлу. Выражение по произвольной шкале степени отклонения цветowego стимула предмета от ближайшего ахроматического цветowego стимула, определяемого коэффициентом яркости (Y) и координатами цветности (x, y). Примечание: с точки зрения восприятия шкалы насыщенности по Манселлу приблизительно равноконтрастны; в обычных условиях наблюдения насыщенность по Манселлу соответствует насыщенности воспринимаемого цвета данного образца.

Цветовой тон по Манселлу обозначается четырьмя различными способами: а) словесно (основными названиями цветowych тонов: красный, желтый, зеленый, синий, пурпурный и их сочетаниями, такими, как желто-красный, зелено-желтый и т. д.); б) буквами (R, Y, G, B, P и их сочетаниями, например YR, GY, BG и т. д.); в) буквами и цифрами ($5R, 7,5 R, 10R, 2,5 YR, 5YR$ и т. д.); г) цифрами (5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 и т. д., где $R = 5R = 5, YR = 7,5R = 7,5$ и т. д.). Наиболее распространенным является буквенно-цифровой метод обозначения. Различные методы обозна-

чения цветового тона по Манселлу подробно представлены на рис. 2.95.

Светлота по Манселлу изменяется от 0/ для черного ($Y = 0$) до 10/ для белого ($Y = 100$).

Насыщенность по Манселлу выражает степень отклонения данного цвета от эквивалентного серого (с тем же значением светлоты по Манселлу) и записывается как /1, /2, /3 и т. д.

Полное обозначение цвета по Манселлу записывается в следующем виде: цветовой тон/ светлота/насыщенность, например

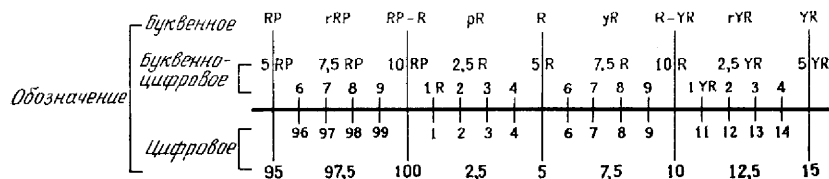


Рис. 2.95. Детальное соотношение между различными способами обозначения цветового тона по Манселлу.

Здесь представлено соотношение между буквенным, буквенно-цифровым и цифровым обозначениями цветового тона по Манселлу для части цветового круга. При помощи более широко используемого буквенно-цифрового метода третий промежуточный ряд цветовых тонов обозначается как: 7,5 RP; 2,5 R; 7,5 YR и т. д. (с согласия фирмы «Манселл калор»).

5R4/14, что означает: цвет красного тона, светлота чуть ниже средней, насыщенность составляет 14 производных ступеней от эквивалентного серого ($N4/$). Если обозначение цвета получено приблизительно путем визуальной интерполяции по шкалам атласа Манселла, то оно называется обозначением по атласу Манселла. Если оно получено точно по координатам цвета (X, Y, Z), то такое обозначение называется ренотацией Манселла.

Так как характеристики цвета в системе Манселла (цветовой тон, насыщенность, светлота) тесно связаны с аналогичными характеристиками цветового восприятия, то их применение чрезвычайно разнообразно. Различия в значениях светлоты по Манселлу между рисунком и фоном непосредственно показывает, насколько хорошо рисунок будет выделяться на фоне. Обозначения цвета по системе Манселла были использованы при разработке упаковки, а также рекламе товаров, где очень важна четкость изображения. Они очень удобны для анализа цветовых сочетаний [444—447] и успешно использовались для обучения студентов художественных учебных заведений [97]. Однако в наибольшей степени они применяются для определения цвета. Ренотация Манселла позволяет определять координаты цветности и коэффициенты яркости и в то же время сразу указывать, какой цвет имеется в виду.

ТЕРМИНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ КРАСИТЕЛЕЙ

Большинство проблем в промышленности, связанных с цветом, относится к составлению рецептов и применению красителей (пигментов и красок) для производства материалов и изделий нужного цвета. Те, кто составляют рецепты и применяют красители, описывают цвет, исходя из принятой терминологии для красителей, используемых для получения необходимого цвета. Ниже представлены термины, отобранные из числа часто используемых на практике, хотя и не везде признанных. Некоторые трудности, возникающие при систематизации терминов в области красителей, обсуждаются в недавно появившихся статьях, посвященных этой проблеме [108, 347, 433].

Выкраска. Окрашенная ткань.

Интенсивность окраски. Количество красителя, вводимого в красильную ванну для окраски данного количества материала. Обычно выражается в процентном отношении к весу материала.

Красящая способность. Величина, обратная концентрации красителя, необходимой для получения нужного цвета.

Интенсивность цвета. Воспринимаемое свойство цвета, связанное с количеством красителя, используемого для получения цвета.

Интенсивный цвет. Цвет, который воспринимается как полученный в результате использования относительно большого количества красителя.

Слабый цвет. Цвет, который воспринимается как полученный в результате использования относительно малого количества красителя.

Цвет обычной ткани, небеленого шелка, немойтой шерсти относится к цвету материала, еще не прошедшего влажной обработки.

Глубокий цвет (производство керамики). Цвет, который воспринимается как полученный в результате использования большого количества хроматического красителя и относительно малого количества белого.

Пастельный цвет (производство керамики). Цвет, который воспринимается как полученный в результате использования большого количества белого и относительно малого количества хроматического красителя.

Глубина (производство керамики). Воспринимаемое качество цвета, связанное с соотношением количеств хроматического и белого красителей, используемых для его получения.

Оттенок 1. Выражение цветового отличия от рассматриваемого цвета, не связанное с изменением в интенсивности; другими словами, такое отличие, когда для получения цветового

равенства необходимо добавлять другой краситель. При таком предположении изменение оттенка относится либо к изменению тона, либо к изменению светлоты, либо к изменению и того и другого.

Придавать оттенок 2. Добавить другие красители (в красильную ванну или тонеры в порцию краски), чтобы получить желаемый цвет.

Оттенок 3. Цвет, слегка отличающийся от рассматриваемого.

Оттенок 4. Любой цвет, воспроизведенный пигментом смеси красителя, имеющей в своем составе некоторое количество черного пигмента или красителя.

Оттенок 5. Любой цвет. Примечание: оттенок является наиболее распространенным термином в области красителей.

Оттенок (окраски). Оттенок цветов, полученных в результате окраски.

Оттенок (красителя). Оттенок цветов окрасок, сделанных с использованием данного красителя.

Полный тон. Такая окраска, что дальнейшее добавление красителя существенно не изменит цвет.

Яркий цвет (текстильная промышленность). Цвет, воспринимаемый как насыщенный.

Тусклый цвет (текстильная промышленность). Цвет, воспринимаемый как сероватый; полная противоположность яркому цвету.

Красильная яркость (цвета). Яркость.

Красильная яркость (красителя). Яркость цветов, полученных с помощью данного красителя.

Чистый цвет (текстильная промышленность, производство красок и керамики). Цвет, который воспринимается как совершенно отличный от серого тусклого, неяркого, грязно-белого или мрачного.

Грязный цвет (производство красок). Цвет, воспринимаемый как не чистый.

Чистота (производство красок и керамики). Отсутствие в цвете серого или черного оттенка.

Разбел (производство пигментов и красок). Любой цвет, получаемый смешением хроматического и белого пигментов с преобладанием последнего.

Оттенок (печать). Любой цвет, получаемый смешением хроматического пигмента с белым.

Подцветка (красильная промышленность). Слабое крашение ярким красителем.

Подцветивать. То же, что придавать оттенок 2.

Тон. 1. Оттенок.

2. Цвет.

3. Изменения цвета, не связанные с изменением его оттенка.

Тонировать. То же, что подцветивать или придавать оттенок 2

Тон (оформительские работы). Светлота.

Чистый цвет (производство красок). Цвет, полученный неразведенным хроматическим пигментом.

Тонер. Хроматический пигмент, добавляемый к краске до получения нужного цвета.

Чистый тон (хроматического пигмента). Цвет толстого слоя пигмента, смешанного со связующим.

Полутон (хроматического пигмента). Цвет тонкого слоя пигмента, смешанного со связующим и нанесенного на белую бумагу, или подцветка цвета, рассматриваемого в проходящем свете.

Накраска. Образец, используемый для оценки чистого тона и полутона, получаемого нанесением капли краски на основе данного пигмента на белую подложку одним движением ракеля.

Плотная окраска. Для оценки полутона используется окраска, изготовленная при сильном нажиме на ракель, с тем чтобы получить тонкий слой. Используется для оценки полутона.

Неплотная окраска. Для оценки чистого тона используется окраска, изготовленная при слабом нажиме на ракель, с тем чтобы получить толстый слой. Используется для оценки чистого тона.

Разбел. Окраска смесью белого и испытуемого пигментов (часто соотношение белого и хроматического пигментов составляет примерно 20 : 1).

Основные цвета. Цвета трех красителей, смешением которых можно получить почти все цвета. Примечание: обычно в качестве основных цветов используют пурпурный (фуксин), желтый и голубой (циан), а иногда простой красный, желтый и синий. Они отличаются от основных стимулов психофизического ощущения (красного, зеленого, синего), с которыми имеют дело в трехцветных колориметрах.

В производстве красителей цвет определяется двумя терминами: оттенком и интенсивностью, причем оттенок является двумерным свойством, включающим цветовой тон и красильную яркость. Различие между цветами оценивается терминами слабый или сильный (в отношении интенсивности), красный, желтый, зеленый, синий (в отношении цветового тона), яркий или тусклый (в отношении красильной яркости) [645]. Обычно используются еще и добавочные термины (светлый и темный). Более яркий (в смысле красителя) обычно означает более светлый и более насыщенный. Более интенсивный (в этом же смысле) означает более темный и более насыщенный, хотя для крепких тонов он может означать просто

более темный. В отдельных случаях — это более темный и менее насыщенный. Чтобы объяснить это явно двусмысленное значение термина интенсивный, следует отметить, что по мере увеличения интенсивности окраски белой ткани цвет выкраски, воспринимаемый вначале как потемнение, становится все более и более хроматическим, вплоть до максимума насыщенности. Дальнейшее увеличение интенсивности приводит к тому, что цвет воспринимается более темным и менее насыщенным, а для некоторых красителей — вплоть до черного [184].

На рис. 2.96 дан график зависимости светлоты от насыщенности (по Манселлу), на котором сплошными линиями представлены характеристики цветового восприятия, соответствующие выкраскам четырьмя красителями разной интенсивности: ярким, тусклым и двумя красителями с промежуточными значениями красильной яркости. Каждая сплошная линия представляет изменения цветового восприятия, вызванные изменением интенсивности выкрасок одного красителя, и соответствует постоянной красильной яркости или постоянной чистоте. Для более светлых цветов возрастание интенсивности соответствует уменьшению светлоты и увеличению насыщенности. Этой областью в основном заинтересованы предприниматели. Для цветов с промежуточным значением светлоты увеличение интенсивности соответствует главным образом уменьшению светлоты, а для самых темных цветов — дальнейшему небольшому уменьшению светлоты, сопровождающемуся значительным уменьшением насыщенности. Для самого низкого значения светлоты выражение «чистый цвет» или «яркий цвет» является особенно непонятным для новичков, а также для многих специалистов в области красителей [116]. Это связано с тем, что подобные цвета темнее, чем цвет равной интенсивности, но меньшей яркости. Таким образом, для очень темных цветов красильная яркость в некоторой степени соответствует тому, что в повседневном языке называется темнотой. Такая терминология в области красителей совершенно логично приводит к появлению таких явно противоречивых определений, как ярко-черный или хороший чисто-черный цвет. Пунктирные линии на рис. 2.96 приблизительно соответствуют цветовым восприятиям, относящимся к постоянной интенсивности при изменении красильной яркости или чистоты. Однако следует отметить, что колористы не пытаются сравнивать интенсивности окрасок, значительно различающиеся по яркости.

Рис. 2.96, суммирующий все, что было выше сказано о цвете окрасок, относится также к обычному поведению смесей хроматического и белого пигментов в составе связующего вещества. Вместе с тем не следует полагать, что линии постоянной чистоты для данных красителей будут точно такими же. Два красителя, имеющие приблизительно одну и ту же чистоту, могут привести к возникновению пересекающихся линий; другими словами, при

небольших концентрациях один краситель может быть чище, при больших — грязнее.

Определение цветовых различий в виде цветового тона, красильной яркости (или чистоты), интенсивности (или глубины) непосредственно связано с той деятельностью, которая должна

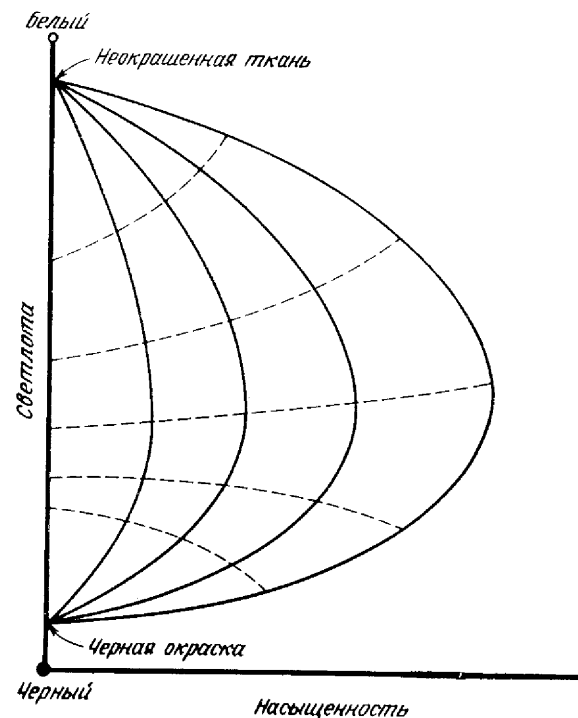


Рис. 2.96. Геометрические места точек постоянной красильной яркости, (—), представленные на графике светлоты в зависимости от насыщенности соответствующих цветовых восприятий и кривые постоянной интенсивности (---).

приводить к соответствию цвета ткани, краски или керамики установленному образцу. Возможность проведения оценок подобным образом зависит от многолетнего опыта работы с красителями и фактически является его ценным результатом. Если точно установлено, что испытуемый образец отличается от стандартного только по интенсивности, то его цвет можно подогнать только изменением концентрации хроматического красителя. Однако если точно определено, что образец является более ярким или более тусклым либо имеет другой цветовой тон, то его цвет нельзя довести

ти до стандартного путем изменения концентрации. О таком образце говорят, что он «другого оттенка» и должен быть «доведен» до стандартного путем добавления другого хроматического красителя (или тонера).

Хроматические красители и пигменты обычно классифицируют по интенсивности (красящая способность, красящая сила). Интенсивность красителя является непосредственным критерием того, как много материала можно окрасить с его помощью. При прочих равных свойствах (светостойкость, стойкость к воздействию других химических веществ и т. д.) интенсивность красителя непосредственно определяет цену, которую могут назначить за него. Яркие краски и чистые пигменты представляют ценность не только в качестве исходных материалов для получения цветов, которые заказчик будет воспринимать как цвета с достаточной светлотой и насыщенностью, но также в качестве тонеров. Размельчение белого пигмента с тонером происходит до тех пор, пока цвет не достигнет почти максимальной насыщенности. Это называется «проявлением цвета». Бесполезно применять тонер с любой меньшей добавкой белого пигмента, чем эта, так как хорошее приближение к более темной области его цветового охвата можно получить добавлением других менее дорогостоящих, почти черных пигментов. Метод определения цветов пигмента, альтернативный по отношению к методу оттенков — чистота — глубина, заключается в упоминании состава смеси красителей, требуемых для их получения: а) торговое или химическое наименование хроматического пигмента в смеси; б) процентное (весовое или объемное) содержание белого пигмента в смеси; в) процентное содержание черного пигмента в смеси. Эти три характеристики приблизительно эквивалентны цветовому тону, содержанию белого и содержанию черного по системе Оствальда соответственно.

В полиграфической промышленности цвет часто обеспечивается двойной печатью мелких точек хроматической и черной краски. Цвет определяется: а) названием хроматической краски; б) процентом покрытия бумаги хроматическими точками; в) процентом покрытия бумаги черными точками. Эти характеристики также довольно близки цветовому тону, содержанию полного цвета и содержанию черного по системе Оствальда. Эти же термины можно применить к четырехцветному процессу печати, в котором цвет воспроизводится четырьмя отпечатками точек: желтых, красных, голубых и черных.

В итоге основные термины в области красителей (для тканей и красок) интенсивность и оттенок, причем оттенок включает две переменные (цветовой тон и красильную яркость); для красок, полиграфии и керамики — цветовой тон, чистота, глубина, или цветовой тон, процентное содержание белого, процентное содержание черного.

НАЗВАНИЯ ЦВЕТОВ

До сих пор обсуждались термины, определяющие различные цветовые понятия. Разумеется, покупатель, не представляющий ясно все эти термины, спрашивает тот или иной цвет по его названию. Американские коммерсанты, рекламные агентства и законодатели мод проявили большую изобретательность при создании названий цветов, чтобы содействовать продаже окрашенных материалов. Такие названия могут указывать на источник происхождения цвета или на применение изделия, довольно часто в них содержится намек на романтику и очарование. Выбор цвета подвергается периодическим колебаниям, поэтому основная тенденция этой деятельности часто заключается в придумывании новых названий старым цветам. Это очень удачно с точки зрения увеличения продаж, однако является очевидной помехой с точки зрения постоянства в определении цвета.

Метод обозначения цветов. Среди различных систем названий цветов, разработанных в прошлом, наиболее понятным и доступным является *метод обозначения цветов ISCC — NBS*. Этот метод разработан на основе требований Американской фармацевтической ассоциации и Фармакологической конвенции Соединенных Штатов Америки. Основа этого метода была разработана Межотраслевым советом по цвету (ISCC), а отдельные элементы — Национальным бюро стандартов (NBS), поэтому этот метод стал называться Методом обозначения цветов ISCC — NBS [349, 360]. Начиная с 1939 г. отдельными организациями и членами, входящими в ISCC, были внесены предложения по пересмотру этого метода, что впоследствии привело к публикации пересмотренного издания [362]. Пересмотренное издание обозначений цвета по системе ISCC — NBS позволяет обозначить любой цвет, воспринимаемый как собственный цвет предмета (непрозрачная поверхность или светопропускающий слой) или цвет самосветящихся тел. Обозначения цветов даются в системе Манселла в соответствии с 31 наименованием — для каждой из 31 области цветового тона по Манселлу.

В целях упрощения число обозначений цвета было специально сокращено до 267. Поскольку нормальный человеческий глаз в оптимальных условиях наблюдения может различить около 10 млн. цветов, метод ISCC — NBS далеко не соответствует возможности дать отдельное обозначение каждому различаемому цвету или даже всем цветам (насчитывающим около полумиллиона), рассматриваемым разными с коммерческой точки зрения.

Метод заключается в делении цветового тела на ряд блоков и обозначении каждого в строгом соответствии (насколько это возможно) с общепринятой в искусстве, науке и промышленности

наборам стандартных образцов материалов, известных в то время. Из всех разработанных до сих пор методов обозначения цветов, цель которых заключалась в уточнении значения цветовых названий, метод ISCC — NBS является наиболее исчерпывающим.

ЦВЕТОВАЯ ГАРМОНИЯ

В том случае, когда два (или более) цвета, находящиеся рядом, производят приятное впечатление, говорят, что они гармонично сочетаются. О цветовой гармонии написано множество книг, однако мнения различных специалистов по этому вопросу достаточно разноречивы. Обнаружить причину таких противоречий не составляет труда [337].

1. Цветовая гармония является предметом симпатий и антипатий; эмоциональное впечатление от сочетания цветов может быть неодинаковым не только у разных людей, но и у одного и того же человека. Мы устаем от привычных цветовых сочетаний и часто рады любым изменениям. С другой стороны, иногда мы учимся оценивать цветовое сочетание (неоднократно наблюдая его), которое первоначально оставляло нас равнодушными.

2. Цветовая гармония зависит от абсолютного углового размера участков, покрытых цветом, а также от композиции и самих цветов. Прекрасно выполненная миниатюра, увеличенная в 10 раз, обычно выглядит грубо и производит неприятное впечатление. Отдельные цвета кажутся очень насыщенными и значительно отличаются друг от друга. То, что в миниатюре вызывает впечатление приглушенности и даже утонченности, при увеличении воспринимается как карикатурно подчеркнутое. Это мы можем объяснить только очень большим участком яркого цвета. Вспомним наше объяснение цветовой слепоты, обусловленной недостаточным размером цветовых пятен. Увеличение миниатюры обычно приводит к обратному результату, вызывая чрезмерно сильное цветовое ощущение, обусловленное большим полем зрения. Этим частично объясняется тот факт, что при рассмотрении большой картины отходят подальше, чтобы лучше ее разглядеть.

3. Цветовая гармония зависит от относительных размеров участков, покрытых цветом, а также и от самих цветов. Небольшой серовато-красный образец (по Манселлу $R\ 3/2$), помещенный на ярко-красный фон (по Манселлу $R\ 4/14$), вызывает неприятное впечатление. С первого взгляда он смотрится, как серовато-красный или серый, но через несколько секунд из-за контраста он будет восприниматься серым или серовато-сине-зеленым, в зависимости от того, какая часть цветовой композиции рассматривается последней. Ивенс предположил [148], что нестабильность цветового восприятия в большинстве случаев является причиной дисгармонии цветовых сочетаний, и это может служить точным

объяснением данного эффекта. Однако если два цвета композиции поменять местами, так, что ярко-красное пятно (по Манселлу $R\ 4/14$) будет рассматриваться на серовато-красном фоне (по Манселлу $R\ 3/2$), то впечатление от такого сочетания будет гораздо более приятным. Центральное пятно всегда воспринимается ярко-красным.

4. Цветовая гармония зависит от формы элементов изображения в такой же степени, как и от самих цветов. Эта форма может влиять на путь точки фиксации при оценке цветового сочетания, различные элементы которого рассматриваются в неблагоприятной последовательности.

5. Цветовая гармония зависит от смысла или толкования изображения так же, как и от самих цветов. Например, приятное впечатление от трех серых площадей ромбовидной формы на рис. 1.8 в значительной степени зависит от того, рассматриваем ли мы эти участки в одной плоскости или в виде элементов изображения куба. Цветовая гармония с точки зрения художника-портретиста совершенно отлична от цветовой гармонии в абстрактной живописи.

В связи с вышесказанным видно, что попытки дать простые правила для построения цветовой гармонии обречены на провал в той или иной степени. Цветовая гармония представляет собой очень сложный вопрос. Однако половина сведений о цветовой гармонии, вероятно, интересует отдельные отрасли промышленности в большей степени, чем все данные о цветовых измерениях, поскольку часто при продаже товаров цветовая гармония должна сделать гораздо больше, чем то, что может предложить контроль цвета. В связи с этим ниже кратко изложены общепринятые принципы цветовой гармонии. Они не обоснованы научно, однако являются лучшим руководством при отборе приятных сочетаний цветов, полученных в результате тысяч проб и ошибок, а также выборочных исследований, сделанных до сих пор.

Принцип 1. Цветовая гармония возникает в результате сопоставления цветов, отображенных в соответствии с принятой ранее упорядоченной системой отбора, которая может быть признана и эмоционально оценена [516]. Такая точка зрения на цветовую гармонию приводит нас к необходимости мыслить понятиями равноконтрастного цветового пространства — трехмерной последовательности точек, по одной для каждой характеристики цветового восприятия (рис. 2.57). В таком пространстве одинаково контрастирующие пары цветов представлены парами равноудаленных точек. С этой позиции любые три цвета, выбранные исходя из любой правильной траектории в цветовом пространстве (прямая линия, эллипс или окружность) или криволинейной линии, могут быть отобраны в соответствии с принятой упорядоченной системой отбора и могут быть гармоничными [444—446]. Отметим, однако, что

принцип прямой линии требует, чтобы гармоничными были три цвета, поскольку для проведения прямой необходимы две цветочные точки. Аналогично принцип окружности требует для составления гармоничного сочетания четырех цветов, поскольку для проведения окружности необходимы три точки.

Кроме того, цвета для композиции могут быть отобраны из числа цветов, расположенных на отдельной поверхности (плоскость, цилиндр, сфера) цветового тела. Разновидность такой последовательности нельзя обнаружить до тех пор, пока в композицию не включено по крайней мере четыре цвета, так как плоскость в цветовом пространстве можно провести через точки, представляющие три любых цвета.

Наконец, имеются разные виды упорядочения цветочных точек, лежащих на выбранных линиях. Например, три цвета, представленные равномерно удаленными точками, лежащими на прямой линии в цветовом теле, являются более упорядоченной последовательностью, чем неравномерно распределенные цвета. Можно ожидать, что цвета, подобранные в соответствии с этим принципом упорядочения, дают цветовую гармонию, которую легче оценить. В соответствии с этим принципом предполагается, что триада, в каждой паре цветов которой наблюдается одинаковый контраст, может обладать еще одним преимуществом: это эквивалентно равномерному расположению на окружности.

Оглядываясь ретроспективно этот наиболее ценный принцип цветочной гармонии, а именно что гармония устанавливает равный порядок, поражаешься отсутствию ограничений, накладываемых этим принципом. Негармоничными признаются не пары цветов, а только те триады, в которых наблюдается слишком неравный контраст. Можно спросить о том, каким образом можно узнать о признании и эмоциональной оценке упорядоченного принципа отбора и о наличии предпочтительных направлений линий в цветовом теле, ориентации плоскостей или местоположения окружностей и эллипсов. Это непосредственно приводит ко второму принципу.

Принцип II. Из двух подобных последовательностей цветов более гармоничной будет та, которая более привычна наблюдателю. Другими словами, нам нравится то, что мы используем. Соответствие этого принципа первому очевидно. Если мы не распознаем системы отбора, то мы будем скорее озадачены ею, чем удовлетворены, и она нам покажется лишенной всякого смысла. Известны направления, в которых лучшим руководством по цветочной гармонии является природа. Считается, что для того, чтобы получить хорошую последовательность зеленых оттенков, следует наблюдать за игрой светотени в листве. Красные и оранжевые оттенки нужно выбирать из цвета заката или осенних листьев. Той-

кие гармоничные сочетания в черном, белом и коричневом следует брать из зимнего пейзажа или окраски животных, птиц и насекомых. Благодаря хорошему знакомству с природой такое направление достижения цветочной гармонии имеет под собой надежную основу. Мы постоянно наблюдаем такие последовательности цветов, без труда узнаем их и получаем от них удовольствие.

В соответствии с принципом привычки в равноконтрастном цветовом пространстве *имеются* предпочтительные направления линий (рис. 2.57). Линии, веерообразно расходящиеся из черной точки (рис. 2.57, а), соответствуют цветам постоянной насыщенности и постоянного цветового тона, т. е. постоянной цветности. Эти цвета очень близки тeneвым рядам. Цветовые последовательности, выбранные на основе этих линий, несомненно будут выявлены. Наиболее легко среди всех узнается центральная линия (черно-белая или нейтральная ось). Любая из других линий тeneвых рядов вместе с нейтральной осью определяет плоскость в цветовом теле. Эти предпочтительные плоскости являются вертикальным сечением цветового тела и проходят через нейтральную (серую) ось. Они представляют собой плоскости постоянного цветового тона. Имеются также предпочтительные окружности и эллипсы. Их центры расположены на серой оси, обычно они не лежат в горизонтальных плоскостях, т. е. в плоскостях, содержащих цвета постоянной светлоты. Они лежат в наклонных плоскостях, так чтобы проходить через более светлые цвета в желто-зеленой, желтой и оранжево-желтой части цветового круга и через темные цвета в пурпурной и синей части. Почему они так наклонены? Потому что цвета в природе следуют этому порядку. Это так называемый естественный порядок цветочных тонов. Цвета, расположенные вокруг такого эллипса, дают устойчивые сочетания. Ни один из них не мешает другому, т. е. в результате контраста ни один не выглядит серым.

Принцип III. Любая группа цветов будет гармоничной в той степени, в какой цвета имеют общий аспект или качество. Принцип упорядочения, который необходимо здесь выявить и эмоционально оценить, заключается в том, что цвета являются более или менее похожими. На этом принципе основано общее правило, используемое непрофессиональными художниками по интерьеру. Если цвета двух красок дают дисгармоничное сочетание, то необходимо добавить немного одной краски к другой. Таким образом уменьшается различие между двумя цветами, и если в этих цветах чувствуется много общего, то они более не кажутся дисгармоничными. Это правило можно распространить на более широкую группу красок явно несходных цветов, добавляя к каждой краске произвольное количество краски другого цвета. Это придает всем им общее качество и делает их похожими [535]. Цвета для отделки

интерьеров жилищ можно сделать гармоничными путем ограничения их отклонений от среднего серого.

Этот принцип объясняет преимущество плоскостей постоянного цветового тона с точки зрения цветовой гармонии тем, что общим признаком двух или более цветов, который оценивается эмоционально, является наличие у них одного и того же цветового тона. Это лежит в основе общего положения, что серый цвет гармонирует с любым цветом. Аналогично этим объясняется преимущество окружностей, центрированных по нейтральной оси, для построения цветовой гармонии. Выбранные среди них два или более цвета имеют общий признак, заключающийся в наличии одной и той же насыщенности. Эта насыщенность должна быть высокой в комнатах для игр и низкой — в рабочих помещениях.

По этому же принципу можно отбирать горизонтальные плоскости цветового тела, имеющие особое преимущество при составлении гармоничных сочетаний. Цвета, выбранные из одной такой плоскости, должны быть гармоничными, потому что они могут рассматриваться, как имеющие одинаковую светлоту. Один из способов достижения цветовой гармонии заключается в том, чтобы сделать так, чтобы большинство цветов композиции имело примерно одну и ту же светлоту. На основании только этого факта как комбинации светлых цветов, так и комбинации темных цветов имеют тенденцию к гармоничности. Однако не следует доводить это правило до крайности. Если выбранные цвета имеют точно одну и ту же светлоту, трудно заметить, где кончается один и начинается другой цвет. Наше восприятие очертаний основано главным образом на различиях в светлоте цветов, разделенных контуром. Приписывание всем цветам композиции одной и той же светлоты равносильно приписыванию всем им одного и того же цвета. Композиция настолько гармонична, что может стать почти невидимой. С принципом сходства можно зайти слишком далеко, он может привести к монотонности.

Иногда дают более общую формулировку связи сходства цветов с гармонией сочетаний: гармония происходит в результате восприятия единства в разнообразии. Слишком малое единство приводит к хаосу, слишком малое разнообразие — к монотонности.

Принцип сходства породил много споров относительно того, какие характеристики цветового восприятия имеют отношение к цветовой гармонии. Он устанавливает, что цвета являются гармоничными, если они похожи в том или другом отношении. Иногда в качестве таких отношений принимают обычные свойства цветового восприятия: цветовой тон, светлоту и насыщенность. Иногда для применения принципа сходства светлоту и насыщенность заменяют свойствами восприятия, соответствующими переменным Оствальда: содержанию черного и содержанию белого. Дизайнер будет использовать какие угодно свойства, которые (по его пред-

положению) приведут к лучшим эстетическим результатам. Существует довольно широко распространенное мнение, что понятия Оствальда несколько лучше соответствуют принципу сходства, чем обычно используемые понятия цветового восприятия (светлота и насыщенность) из-за того, что исключается необходимость предположения об использовании цветов одинаковой светлоты, которые, как мы уже отмечали, настолько хорошо гармонируют, что композиция совершенно не выделяется на фоне. Такие цветовые гармонии имеют очень ограниченное применение, например, для обоев, где элементы рисунка должны быть ненавязчивы, чтобы не отвлекать внимание от предметов в комнате.

Четвертый заслуживающий внимания принцип цветовой гармонии относится к исключению неопределенности из-за непостоянства.

Принцип IV. Цветовой гармонии можно достичь только таким сочетанием цветов, система отбора которых недвусмысленно очевидна. Этот принцип является естественным результатом первого принципа, который утверждает, что система отбора будет признана и эмоционально оценена. На один вид неопределенности уже ссылались в связи с относительной площадью, занимаемой цветом. Часто в качестве гармоничных к любому другому цвету предлагают серый, черный и белый, однако это несправедливо для цветных композиций, в которых небольшие участки нейтрального цвета представлены на фоне ярких цветов, как, например, при печати черной краски на желтой или оранжевой бумаге. Если краска продолжает выглядеть черной, то цветовая гармония должна хорошо выдерживаться (выбор цветов из одной системы постоянного цветового тона). Однако спустя несколько секунд после начала осмотра цветовой композиции из-за хроматической адаптации окрашенные участки воспринимаются голубоватыми, и композиция теперь основывается на дополнительных цветовых тонах. Эта неопределенность не позволяет, чтобы с эстетической точки зрения это сочетание выглядело удачным. Американское оптическое общество в течение ряда лет отдаст дань этому принципу цветовой гармонии, используя на желтой обложке своего журнала коричневую краску вместо черной. Вследствие хроматической адаптации эта коричневая краска часто воспринимается почти черной, но никогда в ней не ощущается голубизны. Цветовое сочетание имеет один цветовой тон и производит приятное впечатление.

Другим примером неопределенности является выбор цветового тона, расположенного между цветами, выбранными из одного эллипса с центром на нейтральной оси (изовалентные цвета в системе Оствальда). Если различные элементы композиции имеют цветовые тона настолько близкие, что порознь они неотличимы, то

система отбора ясна и результат не портит гармонии. Если же они отличаются на едва воспринимаемую величину, то гармония в значительной степени нарушается. Это происходит из-за того, что иногда кажется, что цель заключалась в том, чтобы иметь различные цветовые тона, а в другое время, что они по предположению были одними и теми же. Композиция вызывает ощущение, что была допущена оплошность. Если различные элементы композиции показывают последовательность цветовых тонов с мелкими, но определенно воспринимаемыми интервалами, в результате может получиться приятное сочетание родственных цветовых тонов. Однако если различие в цветовом тоне между соседними элементами композиции составляет около четверти цветового круга, то, вероятно, возникнет другой вид неопределенности. Наблюдатель не может сказать, что являлось целью данной композиции: подборка контрастирующих или родственных цветовых тонов. Ивэнс [148] отметил, что неприятное впечатление, связанное с этим видом неопределенности, можно также приписать непостоянству восприятия цветового тона. Если наблюдатель смотрел на другой участок этой композиции, а затем смотрит на две соседние области различных цветовых тонов, то они будут казаться довольно близкими. Однако если он будет смотреть то на одну область, то на другую, небольшой цветовой контраст постепенно увеличивается вследствие хроматической адаптации к среднему между ними цвету до тех пор, пока в конце концов они не будут восприниматься дополнительными. Таким образом, характер сочетания, воспринимаемый наблюдателем, зависит от того, как он смотрит на композицию, и для него становится невозможным распознать какую-либо определенную систему отбора. Однако цветовые тона, разделенные приблизительно половиной цветового круга или триады цветовых тонов, равномерно разделенные третью цветового круга, вызывают устойчивые сочетания. Система отбора ясна, ее можно распознать и оценить в виде цветовой гармонии.

Совершенно очевидно, что систематический анализ такого весьма субъективного явления, как цветовая гармония, является в высшей степени трудной задачей.

Однако современные психологические методы шкалирования совместно со статистическими методами являются многообещающими средствами дальнейшего исследования цветовой гармонии. В связи с этим особый интерес представляют исследования Мори и сотр. [453] и Наятани и сотр. [473, 474, 480].

Глава 3

ФИЗИКА И ПСИХОФИЗИКА КРАСОЧНЫХ СЛОЕВ

Множество проблем, касающихся цвета в промышленности, связано со сложными красочными слоями. Лаковая пленка придает поверхности глянец, оживляет цвет и фактуру основы; слой воска делает то же самое. Бумага образует основу, которая делает шрифт удобочитаемым и в то же время скрывает буквы, напечатанные на обороте или на нижележащем листе. Ткань представляет собой слой переплетенных (часто окрашенных) волокон. Она может быть непрозрачной, демонстрирующей только собственный цвет, в других случаях — прозрачной, т. е. обладающей собственным цветом и в то же время частично пропускающей свет от ниже расположенного объекта (например, нейлоновые чулки). Красочный слой служит для того, чтобы скрыть нежелательный цвет объекта. Эмаль в виде непрозрачного покрытия, состоящего из пигмента в стеклянной среде, придает свой собственный стабильный цвет порой неоднородной и непривлекательной поверхности металла. Керамическая глазурь придает цвет и защищает от проникновения влаги в керамические изделия различного назначения. Различные пластмассовые изделия, такие, как отделочные плитки, выключатели и др., содержат тонкие пигментированные слои.

Слой материала имеет верхнюю и нижнюю границы, а также внутреннюю область, толщина которой мала по сравнению с ее длиной и шириной. Часть света, падающего на верхнюю границу, отражается, не проникая внутрь слоя. Характер углового распределения этого отраженного потока определяет, является ли слой глянцевым или матовым. Часть падающего света проникает внутрь и частично поглощается; оставшаяся часть выходит из слоя через верхнюю или нижнюю границу. От способности слоя поглощать и рассеивать проходящий световой поток зависит, будут ли видны или невидимы цвет и структура основы. Это свойство известно как непрозрачность или укрывистость. Глянец и укрывистость являются коммерчески важными свойствами, так как они существенно влияют на цвет окрашенной поверхности. Вопрос о составлении и применении красочных слоев для различных целей является одним из важных секретов производства, используя которые многие отрасли промышленности удовлетворяют потребности общества.

ГЛЯНЕЦ

Считается, что идеально-зеркальная поверхность имеет максимальный глянец. Идеально-зеркальной является поверхность, которая отражает весь падающий световой поток, так что, формируя отраженные изображения, сама поверхность остается невидимой. В отраженном от идеального зеркала световом потоке нет лучей, позволяющих сфокусировать глаз на (его) поверхности; отсутствует видимая микроструктура и поверхность нами не ощущается. И все-таки идеально-зеркальная поверхность с успехом

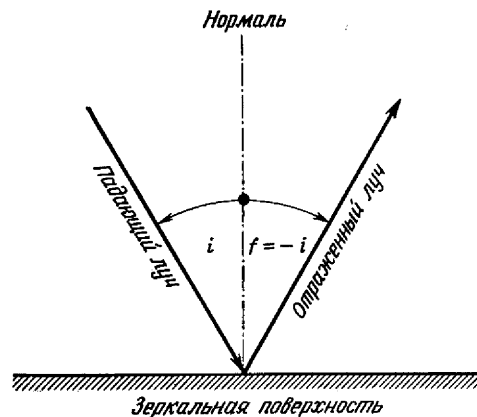


Рис. 3.1. Зеркальное отражение.

может быть использована в качестве стандарта глянцевого покрытия. Хорошее приближение к идеально-зеркальному отражению дает полированная поверхность серебра или обычное стеклянное зеркало с ртутным покрытием. Законы зеркального отражения хорошо известны (рис. 3.1). Пучок света, падающий на поверхность под углом i , отсчитываемым от нормали к поверхности, отражается в плоскости, перпендикулярной к поверхности, так что угол отражения f равен углу падения, т. е. $f = -i$. Для идеального зеркала независимо от угла падения отраженный световой поток равен падающему.

Для поверхности красочных слоев коэффициент зеркального отражения (отношение отраженного потока к падающему) достигает 1 только при почти скользком по поверхности пучке света ($i \rightarrow 90^\circ$). Зеркальное отражение поверхности зависит от (относительного) коэффициента преломления света (или от отношения скорости распространения света в воздухе к скорости света в той части слоя, которая прилегает к поверхности). Этот высокоглянцевый участок красочных слоев состоит из связующего вещества почти прозрачной среды, содержащей частицы пигмента.

Коэффициенты преломления обычных связующих веществ по отношению к воздуху изменяются примерно от 1,45 до 1,60. Если объект погружен в жидкость или в твердую среду вместо воздуха (или вакуума), то зеркальное отражение зависит от соотношения скорости света по обе стороны границы. Это соотношение может быть записано как n_2/n_1 , где n_2 — коэффициент преломления оптически более плотной среды, а n_1 — менее плотной. Для воздуха коэффициент n_1 равен $\sim 1,0003$. Он изменяется с температурой, и эти изменения вызывают эффект кажущегося дрожания объектов, видимых сквозь поток воздуха, поднимающегося от нагретой поверхности и смешивающегося с холодным воздухом.

ОТРАЖЕНИЕ ФРЕНЕЛЯ

При падении света по нормали к поверхности ($i = 0$) соотношение, связывающее коэффициент отражения ρ с коэффициентами преломления n_1 и n_2 , записывается в виде

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad (3.1)$$

Для углов падения, отличных от 0, отражение ρ зависит от того, был ли падающий свет уже отражен другой плоскостью. Когда свет от обычного источника (солнца или лампы накаливания) падает на плоское неметаллическое зеркало, то одна часть его входит в среду, а другая часть отражается, причем отражается в большей мере, когда угол отражения f соответствует отношению

$$\operatorname{tg} f = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.2)$$

Соотношение (3.2) известно под названием *закона Брюстера*. Согласно этому закону, отраженный свет полностью плоскополяризован, и он отражается от также ориентированного следующего зеркала более полно, чем первичный пучок света.

Полная зависимость коэффициента отражения ρ от угла падения i для неметаллической поверхности и от коэффициентов преломления света n_2 и n_1 , а также от состояния поляризации падающего луча известна как *закон Френеля*. Пусть ρ_{\parallel} — отражение плоскополяризованного света от зеркальной поверхности, ориентированной таким образом, что отражение света более полно, а ρ_{\perp} — отражение плоскополяризованного света от поверхности, ориентированной так, что отражение затруднено. Тогда в соответствии с законом Френеля [441]

$$\rho_{\parallel} = \left[\frac{\cos i - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 i}}{\cos i + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 i}} \right]^2, \quad (3.3)$$

$$\rho_{\perp} = \left[\frac{(n_2/n_1)^2 \cos i - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 i}}{(n_2/n_1)^2 \cos i + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 i}} \right]^2.$$

Для неполяризованного падающего света отражение ρ_T является средним арифметическим ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} :

$$\rho_T = (\rho_{\parallel} + \rho_{\perp})/2. \quad (3.4)$$

Для частного случая $i = 0$ уравнение (3.3) принимает вид (3.4). Полагая $i = 90^\circ$, из уравнения (3.3) получаем $\rho_{\parallel} = \rho_{\perp} = 1$, и, следовательно, из уравнения (3.4) $\rho_T = 1$. Это означает, что при

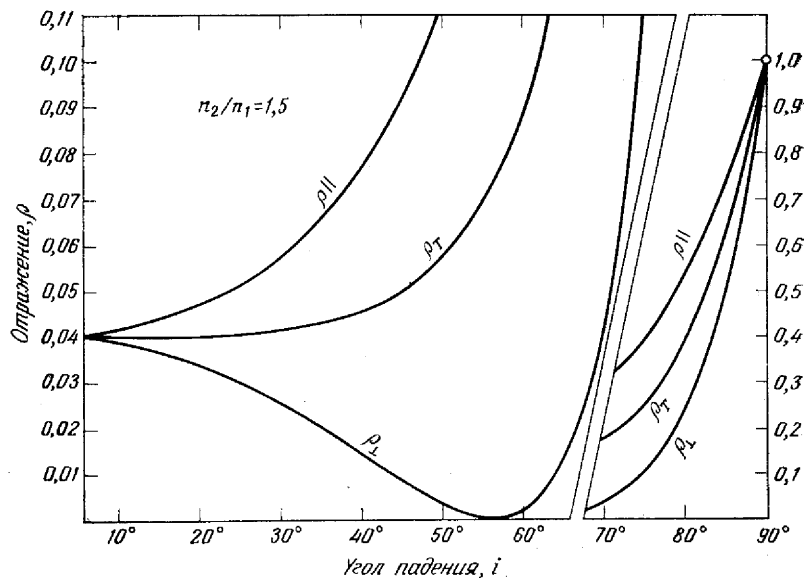


Рис. 3.2. Отражение Френеля как функция угла падения i на границе раздела сред, отношение коэффициентов преломления которых $n_2/n_1 = 1,5$ (например, граница раздела воздух — стекло).

Отражение ρ_T для неполяризованного света является средним арифметическим двух составляющих отраженного света: параллельно поляризованной (ρ_{\parallel}) и перпендикулярно поляризованной (ρ_{\perp}) к плоскости падающего пучка света.

скользящем по поверхности пучке света отражение его от зеркальной поверхности (стекло, лак, лед, вода) близко к 1. Для промежуточных углов падения (между $i = 0$ и $i = 90^\circ$) величины коэффициентов отражения ρ_{\parallel} , ρ_{\perp} и ρ_T определяются по (3.3) и (3.4), как показано на рис. 3.2 для случая $n_2/n_1 = 1,5$. Для угла, тангенс которого равен 1,5 ($\sim 56^\circ$), отражение перпендикулярно поляризованного света ρ_{\perp} в соответствии с уравнением (3.2) равно 0, т. е. такой свет, падая на зеркальную поверхность, полностью

входит в нее и не отражается. Если луч неполяризован, то при этом угле в процессе отражения выделяется параллельно поляризованная составляющая; весь перпендикулярно поляризованный свет проникает в среду, и только параллельно поляризованный образует отраженный поток. Если такой параллельно поляризованный свет падает на следующую аналогично ориентированную зеркальную поверхность, то доля отраженного потока будет в два

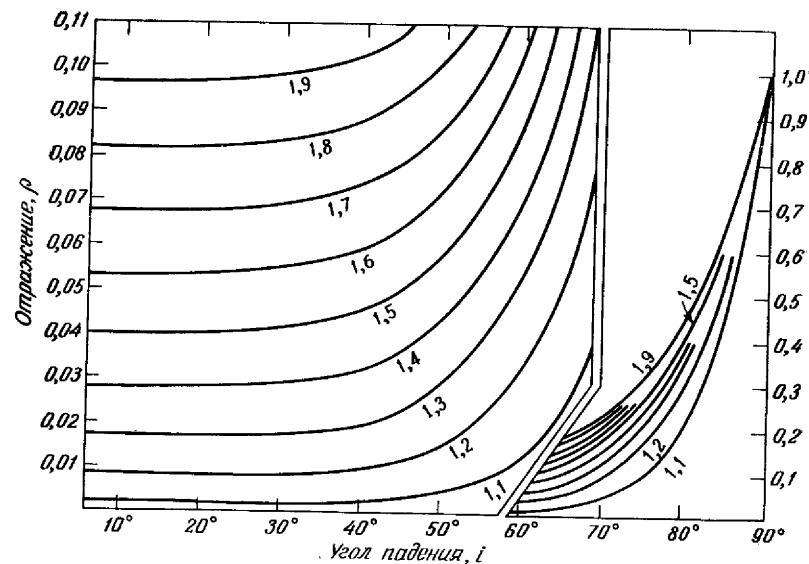


Рис. 3.3. Отражение Френеля для неполяризованного света в зависимости от угла падения i для различных значений отношений коэффициентов преломления.

раза больше по сравнению с долей отраженного потока для неполяризованного луча [уравнение (3.4) для $\rho_{\perp} = 0$].

На рис. 3.3 приведены изменения ρ_T от угла падения i для значений n_2/n_1 , равных 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9. Методом интерполяции по кривым рисунка можно приблизительно определить величину ρ_T для любого угла падения i и любого отношения n_2/n_1 . Значения n_2/n_1 в интервале от 1,4 до 1,9 относятся к пластмассам, стеклу, текстильным волокнам и связующим веществам, а в интервале от 1,1 до 1,4 — к тем же материалам, но помещенным в жидкость или другую твердую среду. Более точные значения ρ_T (по сравнению с методом интерполяции) можно получить из опубликованных таблиц [441], либо непосредственно рассчитывать по уравнениям (3.3) и (3.4).

ТИПЫ ГЛЯНЦА

Глянец поверхности можно характеризовать степенью ее приближения к зеркальной поверхности. Совершенный рассеиватель, имеющий постоянную яркость независимо от угла наблюдения (даже при ненаправленном освещении), максимально отличается от зеркала; в этом случае говорят, что его глянец равен 0. Мато-

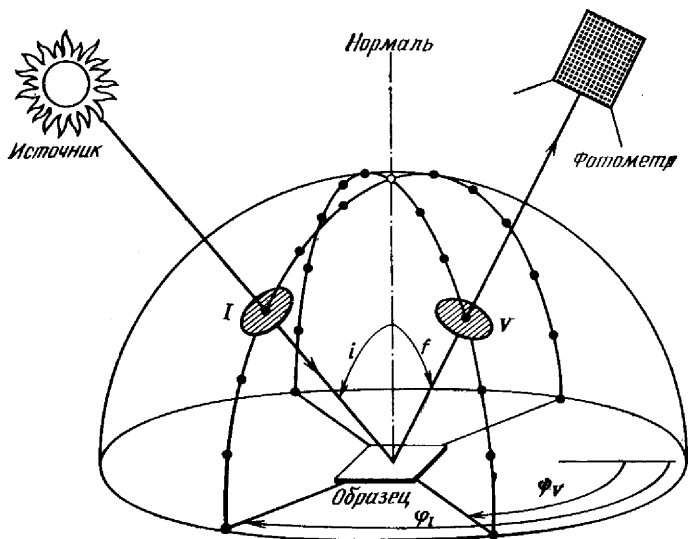


Рис. 3.4. Схема, показывающая принципиально важные элементы гониофотометра и их пространственное расположение.

Пучок света, падающий на образец, образуется источником с апертурной диафрагмой I . Световой поток, воспринимаемый фотометром, ограничивается апертурной диафрагмой V . Направления освещения и наблюдения регулируются независимо в пределах полусферы над образцом. Положение источника с диафрагмой I определяется углом азимута φ_I и углом падения i . Положение фотометра с диафрагмой V определяется углом азимута φ_V и углом наблюдения f . Коэффициент отражения для заданного положения осветителя и приемника (φ_I , i , φ_V , f) определяется отношением потоков, воспринятых фотометром через диафрагму V , отраженных соответственно образцом и совершенным диффузным отражателем, установленным вместо образца (см. также рис. 2.2).

вые поверхности промокательной бумаги, спрессованной пластины окиси магния, тонкоматированного стекла и (в некоторых случаях) окрашенных пластин, являются хорошим приближением к идеально рассеивающей свет поверхности — поверхности с нулевым значением глянца. Такие поверхности отражают падающий поток равномерно по всем направлениям. Зеркальная поверхность отражает свет лишь под углом зеркального отражения. Промежуточные типы поверхностей имеют промежуточный характер распределения отраженного потока. Характер распределения можно

измерить на гониофотометре — приборе, измеряющем коэффициент отражения как функцию углов освещения и наблюдения. Гониофотометрическая характеристика является определяющей для глянца почти так же, как спектральная характеристика для цвета.

На рис. 3.4 дана схема гониофотометра, предназначенного для измерения коэффициентов отражения образца при всевозможных углах падения (i) и угла наблюдения (f) в пределах полусферы над образцом. Положение источника с апертурой I однозначно определяется заданным углом азимута (φ_I) и полярным углом (i). Аналогичное положение фотометра с апертурой V определяется углом азимута (φ_V) и полярным углом (f).

Очевидно, что получение полного комплекта гониофотометрических кривых образца представляет собой очень трудную, если не невыполнимую задачу. Как источник, так и фотометр должны принять всевозможные взаимонезависимые положения в пределах полусферы.

Предположим, что угол раствора конуса апертурных диафрагм I и V , отсчитываемый от центра образца, составляет 5° . Это означает, что мы работаем с довольно большими пространственными углами в $\sim 0,006$ ср для каждой апертурной диаграммы. Чтобы полностью охватить такой апертурой полусферу (2л ср) как можно точнее без перекрываний, требуется ~ 1000 различных положений фотометра. Если перемещать источник и фотометр в каждое из 1000 положений, то получится ~ 1 млн. измерений коэффициента отражения. Теперь рассмотрим *спектрогониофотометр*.

Спектрогониофотометр, естественно, представляет собой гониофотометр, работающий по тому же принципу, как показано на рис. 3.4. Однако между источником и апертурной диафрагмой I теперь установлен монохроматор так, что мы можем освещать образец монохроматическим светом любой длины волны из видимой области спектра. Если проводить измерение через 10 нм в интервале от 380 до 770 нм, получим значения кривой спектрального отражения в 40 точках. Таким образом, число (полный набор) спектрогониофотометрических измерений, охватывающих всю полусферу для всех положений источника и фотометра, достигает 40 млн.

Никто, конечно, и не думает выполнять такой объем измерений для одного образца. Существует ряд возможностей сократить число измерений без потери существенной информации о пространственном распределении отраженного образцом света.

Большинству образцов (накраски, пластмассы, текстиль) свойственны определенные виды симметрии в распределении отраженного света. Встречается круговая симметрия относительно нормали к образцу. Это означает, что угол азимута φ_I может быть постоянным, а углы падения i могут быть ограничены интервалом $0-90^\circ$. Встречается также симметрия относительно плоскости,

проходящей через направление i падающего луча и нормаль; таким образом, движение фотометра с апертурной диафрагмой V может быть ограничено половиной полусферы; φ_V охватывает 180° , а f — от 0 до 90° (рис. 3.5). Чтобы получить полный набор гониофотометрических кривых на таком упрощенном приборе при тех же размерах апертуры, как прежде, необходимо выполнить 10 000 измерений. Если требуются спектральные данные, то число

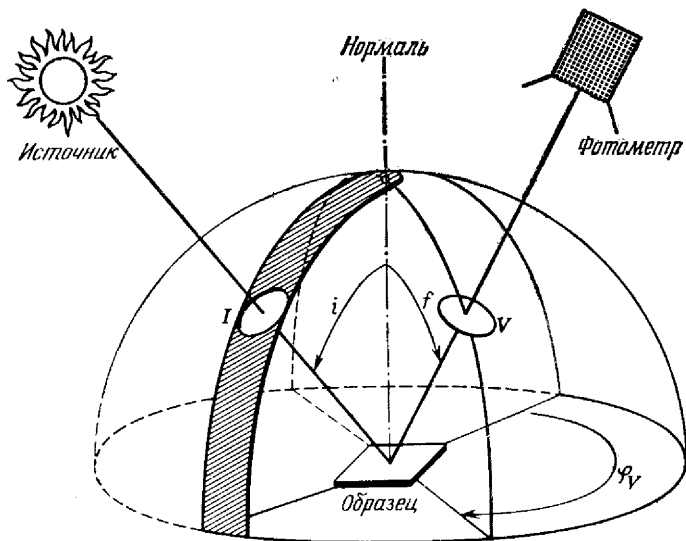


Рис. 3.5. Схема, показывающая основные элементы гониофотометра с ограниченным диапазоном перемещения источника и фотометра.

Источник может двигаться в пределах $1/4$ круга (i от 0 до 90°), а фотометр в пределах одной половины полусферы (φ_V от 0 до 180° и f от 0 до 90°). Упрощенный гониофотометр может дать полную гониофотометрическую информацию для образцов с симметричным распределением отраженного потока, таких, как накраски, бумага, пластмассы. Образцы текстиля, как правило, не обладают удовлетворительной симметрией.

измерений увеличится до 400 000. Хотя это всего лишь в 100 раз меньше, чем для предыдущего общего случая, все же это слишком много для практического применения. Требуется дальнейшее упрощение.

Опыт показывает, что наиболее интересные и информативные гониофотометрические данные для всех практически встречаемых случаев можно получить измерениями в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к образцу. Этой плоскостью, естественно, является плоскость зеркального отражения, возникающего при угле $f = -i$. Большинство выпускаемых в продажу гониофотометров упрощены с целью проведения таких измерений. Угол освещения i регулируется от 0 до 90° , а угол измерения —

в пределах 180° , т. е. от $+90$ до -90° . Такой предельно упрощенный гониофотометр позволяет сделать $18 \times 36 = 648$ измерений в отношении ранее упомянутых апертурных углов. Для получения спектральных коэффициентов отражения число измерений увеличивается в 40 раз и составляет $\sim 26\ 000$.

Рис. 3.6 иллюстрирует гониофотометрические кривые для двух образцов, когда угол падения i составляет 45° и углы наблюдения (измерения) изменяются от $+90$ до -90° . Длина радиус-вектора

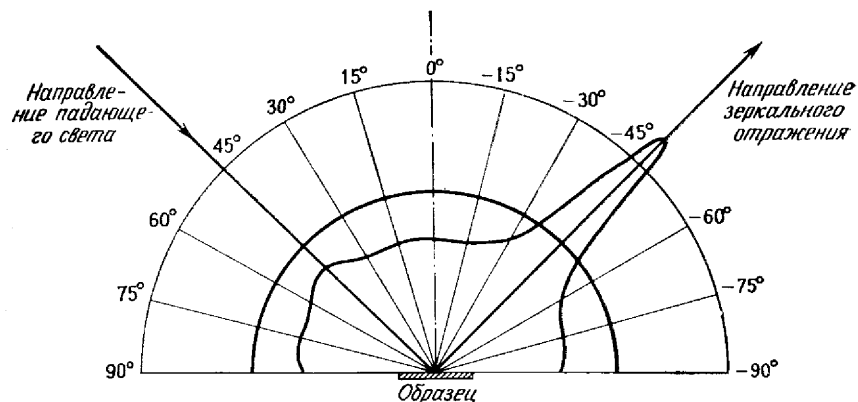


Рис. 3.6. Гониофотометрическая характеристика идеального рассеивателя (идеальный полукруг) и полуглянцевой образцы (имеет место пик в направлении зеркального отражения).

Угол падения — 45° , направление наблюдения от $+90$ до -90° . Линия направления падающего пучка света и линия направления наблюдения лежат в одной плоскости с нормалью к образцу.

каждой точки гониофотометрической кривой пропорциональна коэффициенту отражения в данном направлении. Идеальный полукруг представляет собой гониофотометрическую кривую совершенного рассеивателя, кривая с выпуклостью в направлении зеркального отражения является гониофотометрической характеристикой полуглянцевой образцы.

Существует множество промежуточных состояний поверхности между совершенно матовой и совершенно глянцевой. Один тип такого промежуточного состояния соответствует совершенно матовой поверхности, покрытой элементарными зеркальными площадками, одинаково ориентированными. Постепенно увеличивая размер каждого элементарного зеркала до их соприкосновения при перекрывании всей поверхности, можно получить один тип перехода от матовой поверхности к глянцевой. Такой тип почти соответствует изменению глянца, получаемому при полировке грубо-зернистой стеклянной поверхности. Свет, отраженный от такой поверхности, легко можно разделить гониофотометром на две

составляющие: одну — при угле зеркального отражения (зеркально отраженный свет), другую — равномерно распределенную независимо от угла наблюдения (диффузно отраженный свет). Эти же рассуждения относятся к стеклянкой поверхности, слегка матированной пескоструйкой. Иногда говорят, что отражение состоит из двух частей: зеркальной и диффузной.

Другой тип промежуточного состояния поверхности соответствует совокупности элементарных зеркальных элементов, покрывающих всю поверхность, но различно ориентированных по отношению к макроплоскости поверхности. С увеличением усредненного значения угла наклона элементарных зеркал распределение отраженного света все больше и больше приближается к равномерному. Такая серия поверхностей соответствует в известной мере поверхности грубой керамики при разной степени плавления. Кафель и стеклоэмали по металлу выявляют отклонение от идеального глянца такого же типа, как описано выше.

Гониофотометрические кривые таких поверхностей изменяются от острого пика при идеально зеркальном отражении через расширение пика при одновременном уменьшении его высоты и до такого состояния, когда коэффициент отражения почти постоянен независимо от угла наблюдения. Разделение отраженного света на зеркальную и диффузную составляющие в этом случае невозможно.

Большинство промышленных изделий, как правило, имеют более сложные промежуточные состояния поверхности между матовой и зеркальной.

Глянец красочного слоя обычно контролируется отношением пигмента к связующему веществу. При небольшой доле пигмента, например в эмалевых красках, все частицы пигмента равномерно покрыты ровной пленкой связующего вещества, создающей прекрасное подобие зеркальной поверхности. При уменьшении соотношения связующего вещества к пигменту высохшая красочная пленка не будет идеально ровной, а будет повторять в какой-то степени форму частиц пигмента. В результате образуется полуглянцевое покрытие. И наконец, если используется количество связующего вещества, достаточное только для того, чтобы связать частицы пигмента между собой, как это имеет место в водорастворимой краске, то поверхность, образованная преимущественно сухим пигментом, будет близка к идеальному рассеивателю света. Однако такая поверхность легко стирается с подложки.

Связь между глянцем краски и её практической пользой очевидна. Слабогляnceвая окраска желательна для интерьера, поскольку в этом случае не должно быть зеркальных бликов от источников света, создающих ощущение ослепительного блеска. Однако трудно получить матовую красочную пленку, которая была бы водостойкой. Следы кисти придают красочной пленке другой

тип глянца, зависящий от ориентации мазков. Краски, нанесенные с использованием растира вручную, создают аналогичный эффект. Краски, составленные так, чтобы в какой-то мере повторить эффект растира вручную, избежав при этом больших затрат, выявляют особую, присущую им характеристику глянца.

Ткани, вследствие своей специфической структуры, обладают сложными распределениями отраженного света, не обладающими круговой симметрией. Сами волокна могут быть глянцевыми; однако ткацкий процесс уже приводит к характерным изменениям этого глянца; отделка ткани перед продажей, последующие стирка и глажение влияют на их глянец. Максимум кривой коэффициента отражения тканевых материалов, сделанных из глянцевых или блестящих волокон, в результате их переплетений почти никогда не совпадает с максимумом кривой коэффициентов направленного зеркального отражения. Даже фетр обладает не четко выраженным максимумом при углах немного больших угла зеркального отражения. Это понятно из положений закона Френеля. Такую поверхность можно мысленно представить себе как совокупность элементарных зеркал, углы наклона которых случайны. Число микрзеркал, ориентированных так, что они отражают падающий свет как при меньших, так и больших углах, чем угол зеркального отражения относительно поверхности ткани, примерно одинаково. Очевидно, что зеркала, на которые свет падает под большими углами, отражают больше (рис. 3.3). Поэтому не остроконечный максимум наблюдается при углах, больших чем угол зеркального отражения. Эти же рассуждения относятся к почти матовым неканарным поверхностям, таким, как бумага для множительного аппарата и матовые пленки стеклоэмали или краски.

«Поверхность с ярковыраженной трехмерной структурой, например белый бархат или вид леса, рассматриваемого с самолета, могут обладать максимумом направленного отражения не при угле, близком к углу зеркального отражения, а при угле падения. Такие поверхности включают большие полости, которые освещаются светом, падающим под некоторым углом к поверхности. Свет, отражаемый этими полостями, неизбежно покидает их в направлении источника. Говорят, что эти поверхности имеют негативный глянец. Обратнотражающие устройства, представляющие собой прозрачные стеклянные шарики, погруженные в белую краску, являются образцом предельно-негативного глянца.

Для измерения коэффициентов обратного отражения необходимо в составе гониофотометра использовать специальный прибор. Для предотвращения помех, препятствующих попаданию падающего света в фотометр, необходимо предусмотреть расщепитель пучка. До сих пор проведено не так много экспериментов по обратному отражению поверхностей обычных про-

мышленных товаров (красок, пластмасс, различных типов бумаги и ткани). Однако имеются признаки, что у всех перечисленных выше товаров независимо от наличия матовой или глянцевой поверхности в некоторой степени проявляются обратноотражающие свойства.

Поверхности большей части промышленных товаров слишком сложны и не поддаются анализу на базе предложенных выше моделей. Вместе с тем во многих случаях их можно классифицировать по проявлению глянца. Субъективную оценку глянца называют глянецностью. В табл. 3.1 представлено пять различных типов глянецности [263, 277]. Каждому типу глянецности соответствует определенный характер распределения отраженного света. В табл. 3.1 показано, как на практике определяют показатели глянца, предназначенные для описания каждого типа субъективной оценки. Этот перечень типов глянецности, разумеется, не исчерпывает всех возможных случаев, он лишь показывает, что глянец далеко не простое свойство поверхности и что один-единственный показатель глянца не может выразить многообразные свойства поверхности. При рассмотрении гониофотометрических характеристик трудно определить, какая из двух поверхностей будет обладать более высоким глянцем, ибо суждение наблюдателя будет зависеть от направлений освещения и наблюдения, от угловых размеров источника, от того, на что обращает внимание наблюдатель. Однородность поверхности также будет влиять на суждение; из двух лакированных поверхностей с одинаково высоким зеркальным глянцем та, которая свободна от пузырьков, кажется более глянцевой. Аналогичное влияние оказывается на оценку блеска, контрастной глянецности: глянецности с отчетливостью изобращения, глянецности без ореола. Зависимость суждения от перечисленных факторов особенно явно выражена в случае высокоглянцевой отделки структурированных материалов, таких, как отделочная фанера. Если поверхность настолько однородна, что нет ни царапин, ни выбоин, ни пузырей, ни других видимых дефектов, то наблюдатель не может сфокусировать глаз на самой поверхности, однако он видит текстуру дерева через поверхность. Это называется глубиной отделки. Этот особый случай можно было бы назвать поверхностно-однородным глянцем. Хантер [269] опубликовал фотографии множества объектов для иллюстрации различных типов глянецности, приведенных в табл. 3.1.

Показатели глянца, строго говоря, не являются коэффициентами отражения, измеренными в зеркальном или близком к зеркальному направлениях. Измерение коэффициентов отражения всегда выполняется по отношению к совершенному отражающему рассеивателю при идентичных условиях освещения и наблюдения (рис. 2.2 и 2.3). Измерение показателя глянца выполняется по

Таблица 3.1

Вид глянецности	Измерение показателя глянца
Зеркальный глянец	Падающий поток Φ_1 (при 60°) = отраженному потоку от идеального зеркала; Φ_2 (при -60°) = потоку, отраженному от образца; показатель глянца = Φ_2/Φ_1
Блеск	Падающий поток Φ_1 (при 85°) = отраженному потоку от идеального зеркала; Φ_2 (при -85°) = потоку, отраженному от образца; показатель глянца = Φ_2/Φ_1
Контрастный глянец	Падающий поток Φ_1 (при 60°), Φ_2 (при -60°) = потоку, отраженному от образца; Φ_3 (при 0°) = потоку, отраженному от образца; показатель глянца = Φ_2/Φ_3
Отчетливость изобращения	Падающий поток Φ_1 (при i), Φ_2 (при $-i$) = потоку, отраженному от образца; угол наблюдения ($-i$) отличается от зеркального угла ($-i$) на несколько угловых минут; показатель глянца = степени изменения Φ_2 при изменении угла наблюдения (i)
Отсутствие ослеплости	Падающий поток Φ_1 (при i), Φ_2 (при $-i$) и Φ_3 (при $-i$) = потокам, отраженным от образца; угол наблюдения ($-i$) отличается от угла зеркального отражения ($-i$) на несколько градусов; показатель глянца = Φ_2/Φ_3

отношению к идеальному зеркалу. Такая методика общепринята. Показатель глянца идеального зеркала равен 1, а показатель глянца совершенного рассеивателя приближается к 0 при уменьшении апертуры наблюдения. Показатели глянца всех промежуточных поверхностей лежат в интервале между крайними значениями 1 и 0.

За исключением вопроса о стандарте отражения, принципы, обуславливающие гониофотометрию, применимы также к измерениям показателя глянца. Полный гониофотометрический набор показателей глянца данного образца можно получить фотометрическим измерением светового потока, отраженного от образца во всех направлениях (φ_V, f) и для всех положений (φ_I, i) источника (рис. 3.4). Чтобы получить показатели глянца образца в условиях освещения и наблюдения, определяемых (φ_I, i) и (φ_V, f), величина каждого измеренного таким образом потока делится на соответствующие значения потока, отраженного идеальным зеркалом. Световой поток, отраженный идеальным зеркалом, равен полному потоку, падающему на образец.

Однако и в этом случае полный набор показателей глянца получить невозможно. Если даже это и было бы возможно, то нужно еще разработать удовлетворительный метод уменьшения такого большого объема данных. На практике приходится ограничиться значительно уменьшенным набором гониофотометрических данных, выбирая лишь несколько направлений освещения и наблюдения и несколько фиксированных размеров апертур освещения и наблюдения.

Гониофотометры, которыми измеряют не столько коэффициенты отражения, сколько показатели глянца, более правильно было бы назвать измерителями глянца. Множество различных глянецметров упрощенного типа, а также различных шкал глянцеvitости разработаны и используются для различных промышленных материалов [18, 25, 30, 35, 51, 59, 155, 212, 213, 221, 222, 253, 256, 263, 269—271, 276, 277, 288, 290, 389, 439, 501, 503, 507, 586, 587, 741].

Существует множество промышленных инструкций по измерению глянца и большинство из них содержит подробную информацию, касающуюся выбора параметров конструкции соответствующих глянецметров. Некоторые, наиболее широко используемые, инструкции приведены ниже.

ASTM D523 — Зеркальный глянец. Эта инструкция была переведена на немецкий язык и используется как немецкий стандарт ДИН. Показатель глянца определяется при углах 20, 60 или 85° при заданной апертуре источника и фотометра. Область применения ограничивается главным образом красками.

ASTM D523 была использована в качестве модели для других инструкций, специально разработанных для измерения глянца других материалов.

ASTM C584 — зеркальный глянец глазурованных керамических изделий и подобных материалов при 60°.

ASTM D1455 — зеркальный глянец при 60° мастик для натирки полов.

ASTM D2457 — зеркальный глянец пластмассовых пленок.

ASTM D523 была дополнена двухпараметрическим методом измерения глянца, основанным на работе Нимеровой [503]. Эта инструкция вышущена как ASTM D1471 — двухпараметрический метод измерения зеркального глянца при 60°.

Другие инструкции по измерению глянца:

ASTM C346 — зеркальный глянец при 45° керамических материалов.

ASTM D1223 — зеркальный глянец бумаги и картона при 75°. Эта инструкция идентична инструкции TAPPI T480.

TAPPI 653 — зеркальный глянец лощеных бумаг (20°). Идентична инструкции ASTM D1834.

Измерение глянца в соответствии с оценкой глянца по отчетливости изображения [439] выполняется в соответствии с инструкцией ASTM C540 — Глянец, образующий изображение, для фарфоровых и эмалевых поверхностей.

Имеется несколько приборостроительных фирм, которые выпускают глянецметры, предназначенные для измерений глянца, в соответствии с одной или несколькими инструкциями. Эти фирмы обычно предлагают также и эталоны глянца для калибровки.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ГЛЯНЦЕМ И ЦВЕТОМ

Смешение красителей в соответствующей пропорции для получения желаемого цвета значительно осложняется тем, что необходимо бывает получить также желаемый глянец поверхности. Соответствие цвета между образцом краски и цветовым стандартом обычно проверяется при расположении их перед окном, выходящим на север, и рассмотрении их рядом друг с другом на столе в направлении, близком к нормали. Затем проверяется соответствие глянца при удалении до тех пор, пока образец и стандарт не сформируют изображение оконной рамы, вырисовывающейся на фоне неба. В таком положении наблюдатель может оценивать тип глянца, а именно: зеркальный глянец (по яркости зеркальных бликов), глянец с отсутствием ореола отражения (вблизи зеркального направления) или глянец, оцениваемый по отчетливости изображения.

Если наблюдатель найдет цветовое соответствие удовлетворительным, а зеркальный глянец слишком высоким, то он простым добавлением пигмента в краску может понизить глянец, но при этом исказится цвет. Следовательно, красочная формула также должна быть изменена. Чтобы исправить ее, наблюдатель должен обладать определенным опытом или удачливостью, либо тем и другим. Оставляя в стороне вопрос об ухудшении дисперсии пигмента в значительном его содержании, можно легко показать причину связи между цветом и глянцем. Если кусок полированного черного стекла имеет участок мелкозернистой поверхности, то этот участок будет казаться не черным, а серым. Свет, зеркально отраженный от полированной поверхности и не попавший в глаз наблюдателя при оценке цвета, рассеивается матовой поверхностью, так что попадает в глаз наблюдателя независимо от угла зрения. Этот поверхностно рассеянный свет имеет примерно такую же цветность, как источник света, и смешивается со светом, отраженным из глубины окрашенного слоя. При рассмотрении матовых участков черного стекла изменение цвета особенно поразительно, так как сама масса стекла совсем не отражает света. В случае темных цветных образцов добавление поверхностно-отраженного света также может оказаться весьма существенным. Эффект выражается в увеличении коэффициента отражения, снижении чистоты цвета при почти неизменной его доминирующей длине волны. Поскольку речь идет о простом оптическом смещении излучений, можно написать формулу, выражающую изменение цвета, вследствие изменения глянца, возникающего при увеличении доли поверхностно-отраженного света на ΔY . Если три координаты первоначального цвета равны X, Y, Z для стандартного источника D_{65} МКО (средний дневной свет), то координаты измененного цвета X', Y' и Z' будут

$$X' = X + \Delta X, \quad Y' = Y + \Delta Y, \quad Z' = Z + \Delta Z.$$

Если задано приращение ΔY координаты цвета Y (коэффициента яркости), то можно определить соответствующие приращения ΔX и ΔZ координат X и Z , так как поверхностно-отраженный свет имеет почти ту же цветность, что и сам источник. Координаты цвета источника находятся в соотношении $X_{D_{65}} : Y_{D_{65}} : Z_{D_{65}} = 0,9502 : 1,0000 : 1,0884$. Таким образом, получим $\Delta X = 0,9502 \Delta Y$ и $\Delta Z = 1,0884 \Delta Y$, откуда

$$\begin{aligned} X' &= X + 0,9502\Delta Y, \\ Y' &= Y + \Delta Y, \\ Z' &= Z + 1,0884\Delta Y. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Рис. 3.7 на графике цветности МКО 1931 г. иллюстрирует сдвиг цветности, вызванный увеличением ΔY . Пример, приведенный на

рис. 3.7, относится к образцу с координатами $X = 40,0, Y = 60,0, Z = 20,0$. Если предположить, что коэффициент яркости матированной поверхности увеличивается на 20%, то с помощью выражения (3.5) получим следующие значения координат цвета: $X' = 51,4, Y' = 72,0, Z' = 33,1$. Таким образом, находим, что матирование поверхности вызывает сдвиг цветности в направлении

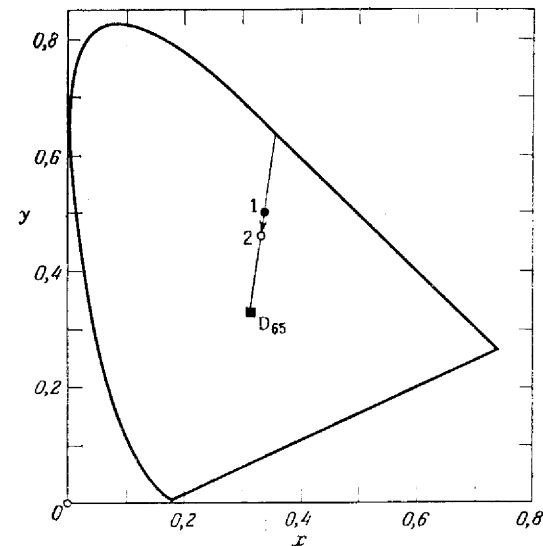


Рис. 3.7. Пример сдвига цветности для случая, когда образец с глянцевой поверхностью (точка 1) заматирован.

Утративший глянец образец светлее на величину ΔY , и его цветность (точка 2) сдвинута в сторону цветности стандартного источника D_{65} .

цветности источника D_{65} и уменьшение чистоты цвета, в то время как доминирующая длина волны остается неизменной. Этот результат хорошо совпадает с тем, что мы наблюдаем на практике. Матирование поверхности приводит к тому, что воспринимаемый цвет образца становится более светлым, менее насыщенным, однако цветовой тон сохраняется почти неизменным.

К сожалению, эта информация мало помогает колористу. Он должен внести соответствующие изменения в формулу краски, чтобы добиться цветового соответствия. Психофизик счел бы необходимым немного уменьшить содержание белого пигмента в краске. Однако это не может полностью решить вопроса.

Такое влияние глянца на цвет часто является причиной недоумений между теми, кто работает с красками, и теми, кто занимается измерениями. Очевидно, что при матировании поверхности цвет отраженного света, а следовательно, и реакция глаза, ме-

няется. Однако, поскольку формула краски остается неизменной, колорист скажет, что цвет также остался прежним. При этом он сам видит, что оба образца воспринимаются по-разному, но знает, что они имеют тот же цвет. Эту двойственность термина «цвет» можно показать на других примерах. Обратите внимание, что в пособиях по гармонии цветов для глянцевых и матовых образцов используются одинаковые обозначения цвета. Например, образец *Tra* представляет один и тот же цвет как в матовом, так и глянцевом варианте. Также и в текстильных атласах одинаковые обозначения и наименования цвета часто применяются для образцов с атласной отделкой и с отделкой в рубчик. В действительности — это обозначения красителей. Они показывают, что может делать один и тот же краситель при атласной отделке и отделке в рубчик. Естественно, что красильщик имеет в виду эти два варианта цвета для одного красителя, так как оба образца могут значительно различаться по координатам цвета, и для колориметриста один и тот же краситель дает разные цвета.

НЕПРОЗРАЧНОСТЬ ИЛИ КРОЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

При анализе кроющей способности красочных слоев следует разобраться, что происходит с той частью падающего светового

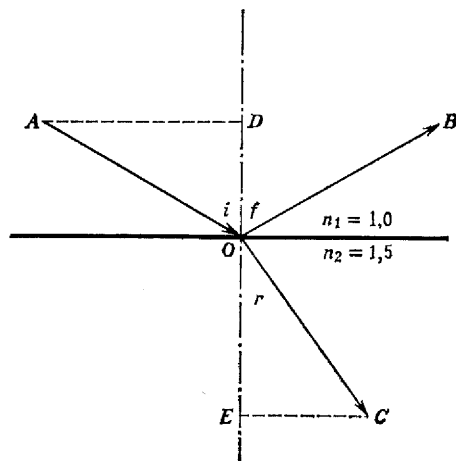


Рис. 3.8. Иллюстрация отклонения пучка света к нормали в результате преломления при вхождении в более плотную среду (закон Снеллиуса).

потока, которая не отразилась поверхностью слоя. Эта часть $(1 - \rho)$ проходит через поверхность, отклоняясь к нормали (рис. 3.8). Величина отклонения такова, что отношение синуса угла падения i к синусу угла преломления r обратно пропорцио-

нально отношению показателей преломления соответствующих сред:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.6)$$

Это выражение известно как *закон Снеллиуса*. На рис. 3.8 AO — направление падающего пучка света, а OB — отраженного пучка, так что угол падения i равен углу отражения f , но противоположен ему по знаку. Эти два пучка света находятся в среде с показателем преломления n_1 . OC — преломленный пучок света в среде с показателем преломления n_2 . Угол преломления r таков, что

$$\frac{\sin i (= \overline{AD}/\overline{AO})}{\sin r (= \overline{CE}/\overline{CO})} = \frac{n_2}{n_1}.$$

На рис. 3.8 отношение $n_2/n_1 = 1,5$, что соответствует границе раздела воздух (вакуум) — стекло.

Показатель преломления любого вещества зависит от длины волны падающего света. Для одних изменения больше, для других — меньше. Явление изменения показателя преломления с длиной волны монохроматического излучения, называемое дисперсией, лежит в основе образования спектра (рис. 2.1) при освещении призмы, изготовленной из прозрачного материала, однонаправленным пучком света сложного состава, например солнечного света.

Когда часть $(1 - \rho)$ падающего света пройдет через верхнюю границу раздела красочного слоя, его поток будет уменьшаться на постоянную величину для каждого элементарного участка пути. Это — *закон Бугера*. В совершенно мутной среде это изменение потока происходит в результате поглощения лучистой энергии средой, превращающей ее в тепло.

Рассмотрим теперь, что же произойдет, если преломленный пучок света встречается с частицами пигмента.

Если частица-кристалл, размер которого \sim в 10 раз больше длины волны лучистой энергии, то часть падающего потока отражается, а часть преломляется в соответствии с законом Френеля (3.3) и (3.4). Но так как частицы пигмента ориентированы по отношению к потоку случайно, первоначальная направленность света в этом случае утрачивается. Часть потока отражается, часть проникает в пигментные частицы и выходит спектрально видоизмененной под влиянием избирательного поглощения внутри частицы. И эти лучи идут в случайных направлениях до встречи с другими частицами. В результате поток рассеивается более или менее равномерно по всем направлениям в любой точке красочного слоя.

Если частица пигмента представляет собой фрагмент кристалла или группу фрагментов с размером значительно меньшим десяти-

кратной длины волны монохроматического излучения, то закон Френеля оказывается неприемлемым, т. е. как только размер пигментных частиц становится меньше десятикратной длины волны падающего потока, свет начинает их огибать, вместо того чтобы отразиться или преломиться в них. В этом случае часть потока поглощается, остальная часть рассеивается либо в обратном направлении, либо в стороны, однако преимущественно в прямом направлении. Законы такого рассеивания очень сложны и здесь рассматриваться не будут. Заинтересованный читатель может в библиографии Бильмайера и Ричардса [48] найти полезную информацию по этим вопросам. Здесь мы лишь отметим, что рассеяние количественно зависит от размеров пигментных частиц и частично от соотношения показателей преломления пигментных частиц и связующего. Для очень малых фрагментов, близких по величине к молекулярным размерам, рассеивающий эффект в значительной мере исчезает и пигментные частицы в связующем приобретают свойства молекулярных растворов. Следовательно, существует оптимальный размер пигментных частиц в отношении способности к светорассеиванию. Этот оптимальный диаметр частиц равен $\sim 0,4 \lambda$, т. е. $0,16-0,28 \mu\text{м}$ для длин волн видимой области спектра от 400 до 700 нм [523]. Существование такого оптимума является причиной повышенного интереса изготовителей красок к достижению требуемых размеров частиц. Результирующий эффект такого первичного и вторичного рассеяния последовательностью мелких пигментных частиц такой же, как эффект отражения типа Френеля от последовательности больших пигментных частиц. Поток, прошедший через верхнюю границу слоя, рассеивается более или менее равномерно во всех направлениях. Часть такого рассеянного потока достигает нижней границы красочного слоя и частично отражается от основы, на которой лежит красочный слой. Некоторая часть потока достигает верхней поверхности красочного слоя.

Для того чтобы наблюдатель обнаружил этот поток, его необходимо заставить снова проникнуть через верхнюю границу красочного слоя. Не весь поток, достигший нижней стороны верхней границы, может выйти. Часть его, отразившись от нижней стороны верхней границы, направляется обратно в слой.

Существует важный оптический закон, дающий возможность легко оценить это внутреннее отражение. Это закон обратимости, который утверждает, что все изменения, претерпеваемые пучком света, идущим в каком-то одном направлении, претерпеваются в равной степени и пучком света, идущим в противоположном направлении. Так, например, пучок света, идущий из C к O (рис. 3.8), в результате внутреннего отражения уменьшается на ту же величину, на которую уменьшается первоначальный пучок AO в результате внешнего отражения в направлении OB . Таким

образом, закон Френеля справедлив как для внешнего, так и для внутреннего отражения, однако пользоваться им надо осторожно: угол i в обоих случаях является углом, отсчитываемым в менее плотной среде (с показателем преломления n_1). Рис. 3.9 иллюстрирует, что происходит со светом, рассеиваемым частицами пигмента P , расположенными под верхней границей красочного слоя с показателем преломления $n_2 = 1,5$. Говорят, что свет от пигментной частицы P , идущий в направлении PC , падает на нижнюю сторону поверхности под критическим углом. Этим углом является угол

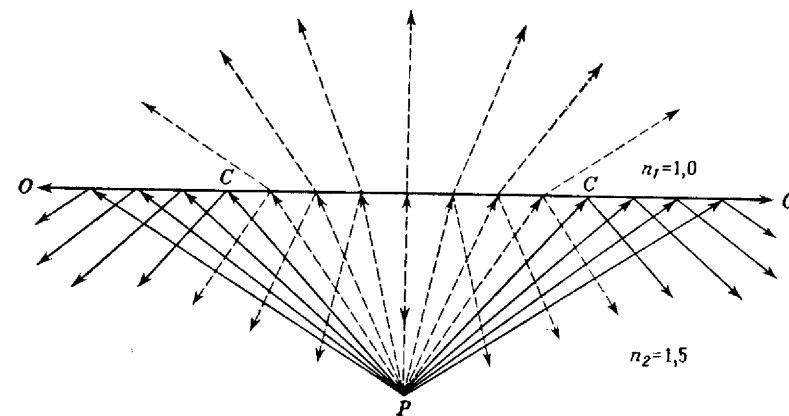


Рис. 3.9. Иллюстрация отклонения света от нормали в результате преломления при вхождении в менее плотную среду, а также полное внутреннее отражение света, падающего под углом больше критического.

r в более плотной среде, при котором луч уже не выходит наружу ($i = 90^\circ$). Подставляя в формулу (3.6) значения $i = 90^\circ$ и $n_2/n_1 = 1,5$, получим $1/\sin r = 1,5$, и критический угол для случая, показанного на нашем рисунке, будет равен углу, синус которого составляет $2/3$, т. е. примерно 42° . Пучок света, падающий под этим углом, пойдет в направлении CO (рис. 3.9). Свет от частицы P , падающий на поверхность снизу под углом, большим чем критический угол, полностью отразится. На рис. 3.9 эти пучки света показаны сплошными линиями. Свет, падающий под меньшими углами, частично отражается обратно в более плотную среду, а оставшаяся часть выходит наружу и может быть обнаружена наблюдателем. На рис. 3.9 эти пучки показаны пунктирными линиями.

Поток, отраженный обратно в более плотную среду нижней стороной верхней границы ($OCCO$), встретит другие пигментные частицы, и та часть вторично рассеянного потока, которая возвращается к границе при углах меньше критического, частично

выходит наружу и может попасть в поле зрения наблюдателя. Очевидно, что многократное отражение и рассеяние играют важную роль в проявлении цвета красочных слоев.

Допуская, что поток, падающий на нижнюю сторону верхней границы красочного слоя, является идеально диффузным, можно усреднить коэффициенты внутреннего отражения Френеля по всем углам падения, чтобы сравнить поток, претерпевший много-

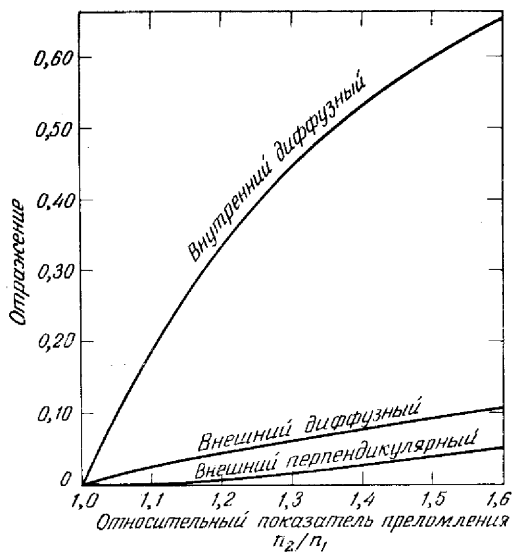


Рис. 3.10. Внутреннее и внешнее отражения идеально диффузного падающего потока в зависимости от соотношения показателей преломления n_2/n_1 [328]. Приведено также отражение для случая нормального падения.

кратное отражение в слое, с потоком, вышедшим наружу. На рис. 3.10 [328] даны результаты такого усреднения в зависимости от отношения показателей преломления n_2/n_1 . Для сравнения на графике приведены аналогичные результаты усреднения для внешнего отражения рассеянно-падающего потока, описываемого формулами (3.3) и (3.4), а также для внешнего отражения при нормальном падении света в соответствии с уравнением (3.1). Из графика рис. 3.10 видно, что около 60% диффузного потока, падающего снизу на плоскую границу красочного слоя $n_2/n_1 = 1,5$, отражается обратно, и лишь немногим более 40% потока выходит наружу.

Способность красочного слоя скрывать цвет основы зависит главным образом от числа и размеров пигментных частиц на единице площади, от их светопоглощающих и светорассеивающих

свойств. Таким образом, если красочный слой не содержит пигментных частиц, его кроющая способность зависит только от поглощения и рассеяния света связующим. Большинство таких слоев (слой прозрачного лака, прозрачных пластмасс и т. д.) по существу не являются кроющими. Однако если слой содержит множество пигментных частиц на единицу площади, каждая из которых либо сильно поглощает, либо сильно рассеивает (либо то и другое), то слой будет обладать значительной кроющей способностью. Пигментные частицы светлых слоев должны обладать высоким рассеянием при относительно малом поглощении. Поскольку светорассеивающая способность частиц зависит от отношения показателей преломления пигмента и связующего вещества, ценность пигментов, показатель преломления которых намного отличается от показателя преломления среды, совершенно очевидна. Пигменты, показатель преломления которых лишь немного отличается от показателя преломления обычных связующих веществ, дают красочные слои с малой или нулевой кроющей способностью (например, двуокись кремния в льняном масле). В табл. 3.2 указаны приблизительные значения показателя преломления для нескольких связующих веществ, используемых при изготовлении красок, и некоторых белых пигментов [175]. Высокое значение показателя преломления двуоксида титана объясняет тот переворот в лакокрасочной промышленности, который был вызван его применением. В настоящее время этот пигмент широко используется в производстве мыла, бумаги, стекловидной эмали, пластмасс и краски. Более высокий показатель преломления рутиловой кристаллической формы двуоксида титана объясняет повышенный интерес к выработке этой формы и пониженный интерес к анатазной форме. Рутиловая форма немного более желтовата, чем анатазная [295]. Поэтому для бумаги и мыла анатазная кристаллическая форма TiO_2 все же предпочтительнее: пониженная кроющая способность терпима из-за менее желтого оттенка.

Для определения кроющей способности красок использовались различные методы. Кроющая способность слоя в какой-то мере связана с его светопрозрачностью, т. е. слой, совсем не пропускающий падающий свет, будет полностью скрывать цвет основы. Такие слои называют непрозрачными. В качестве одной из ранее используемых мер кроющей способности краски принимали величину, обратную той толщине слоя, при которой нить накала лампы не видна через слой. Эта мера, действительно, определяет то количество частиц на единицу площади, которое достаточно, чтобы воспрепятствовать прямому прохождению через слой любого луча света без рассеяния. Вместе с тем такой метод не всегда дает правильное представление о светорассеивающих свойствах частиц. Однако для контроля серийно выпускаемой продукции определение кроющей способности посредством измерения светопропус-

Таблица 3.2

Показатели преломления некоторых веществ, используемых в качестве связующего в красочных слоях, а также некоторых белых пигментов

Вещества	Показатель преломления $n = \frac{\text{Скорость света в вакууме}}{\text{Скорость света в веществе}}$
Вакуум	1,0000
Воздух	1,0003
Соевое масло	1,48
Очищенное льняное масло	1,48
Тунговое масло	1,52
Вишиловая смола	1,48
Шеллак	1,52
Канифоль	1,52
Фенолформальдегид	1,54
Мочевина	1,66
Диатомит	1,45
Двуокись кремния	1,55
Сульфат кальция	1,59
Сульфат бария (BaSO_4)	1,64
Литопон	1,84
Свинцовые белила (сернокислые)	1,93
Свинцовые белила (углекислые)	1,94—2,09
Окись цинка (ZnO)	2,02
Окись сурьмы	2,09—2,29
Сульфат цинка (ZnS)	2,37
Двуокись титана (TiO_2) (анатазная форма)	2,55
Двуокись титана (TiO_2) (рутиловая форма)	2,76

кания может быть весьма полезным [388]. Наиболее распространенным методом является метод прямого испытания. Испытуемый образец краски наносится, например, на черно-белое шахматное поле. Причем наносят такое количество краски, при котором рисунок становится невидимым. Кроющая способность краски определяется, как величина, обратная толщине слоя, укрывающего рисунок.

Этому методу присущ ряд недостатков. Метод зависит от точности определения толщины слоя, которая необходима для скрытия рисунка. Даже при нормализованном освещении искусственным дневным светом суждения наблюдателей о необходимой толщине слоя могут расходиться, т. е. конечные результаты испытания довольно неопределенны. Это привело к разработке методов определения кроющей способности, основанных на измерении отражения красочного слоя на белой R_w и на черной R_b подложках. Отношение R_b/R_w принято называть коэффициентом контраста.

Значение коэффициента контраста, равное 0,98, обычно принимается за показатель полной укрывистости. Если известна зависимость коэффициента контраста от толщины слоя, то измерение этого коэффициента для некоторой толщины позволяет рассчитать ту толщину, которая необходима для достижения значения коэффициента контраста, равного 0,98. Величина, обратная этой толщине, есть мера кроющей способности. Для любого красочного слоя сам по себе коэффициент контраста определяет, в какой степени будет скрыт фон. Хороший обзор различных методов определения кроющей способности дан Гарднером и Свардом [175].

Непрозрачность листа бумаги обычно выражается; коэффициентом контраста R_b/R_w , где отражение белой основы берется равным 0,89. Коэффициент контраста называют также непрозрачностью (над белым) [293]. Иногда пользуются отношением R_b/R_∞ , которое называется печатной непрозрачностью, здесь R_∞ — отражение бумаги, измеренное в стопе. Печатную непрозрачность также называют непрозрачностью в стопе [293]. Международная организация по стандартизации создала стандарт на непрозрачность (в стопе) ISO 2471 — Бумага и карты; определение непрозрачности (в стопе) — метод определения диффузного отражения. Техническая ассоциация по производству древесной массы и бумаги (TAPPI) выпустила инструкцию, известную под названием метода TAPPI T425, который также относится к непрозрачности (над белым); см. также рис. 3.12. Хороший обзор приборов, используемых для измерения непрозрачности бумаги, подготовили Дирт и сотр. [128].

Как международные, так и национальные инструкции, посвященные измерению непрозрачности бумаги, обычно ограничиваются белыми или близкими к белым образцами. Однако в этом ограничении, по-видимому, нет необходимости. По утверждению Баддэ [79], с помощью существующей техники можно выполнить достаточно точные измерения непрозрачности сильно окрашенных бумаг в широком интервале непрозрачности.

Может показаться, что оптическая теория кроющей способности красочного слоя теряет справедливость, если пучок света утрачивает свою первоначальную направленность, встречая либо малую светорассеивающую частицу, либо большую частицу пигмента неправильной формы, однако это не так. Как будет показано ниже, теория Кубелки — Мунка позволяет глубже взглянуть в поведение светорассеивающих материалов.

ТЕОРИЯ КУБЕЛКИ — МУНКА

Если мы уверены, что в конечном итоге действие пигментных частиц приводит к полному рассеянию светового потока во всех направлениях либо в результате отражения Френеля, либо све-

торассеяния, то мы можем использовать аналитические методы для получения теоретических соотношений, представляющих практический интерес. Заметим, что потоком, проходящим в направлении параллельно границе слоя, можно пренебречь, ибо через каждый элемент поверхности внутри слоя, перпендикулярный к границе, налево проходит столько же света, сколько направо, следовательно, эти потоки можно не учитывать. Даже на краях образца поток, идущий параллельно верхней границе, мож-

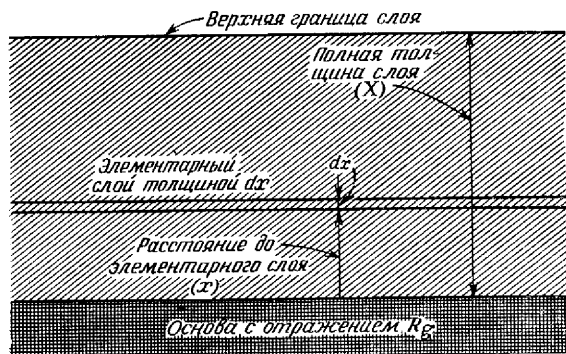


Рис. 3.11. Математическая модель Кубелки — Мунка для анализа рассеивания и пропускания света светорассеивающим слоем.

но не учитывать, так как для красочных слоев горизонтальные размеры образцов велики по сравнению с вертикальными, и потому краевым эффектом можно пренебречь.

Поэтому будем исходить из упрощенной картины, представляя весь свет двумя рассеянными потоками, один из которых идет вниз через слой, а второй одновременно идет вверх. Рассмотрим, что произойдет с потоком i , идущим вниз через некоторый элементарный слой, расположенный параллельно границе красочного слоя (рис. 3.11). Толщину элементарного слоя dx будем считать малой по сравнению с толщиной X ¹⁾ всего красочного слоя, но достаточно большой по сравнению с диаметром пигментных частиц. Поэтому принимать во внимание действие отдельных частиц не будем, а будем учитывать их усредненное действие. Это действие выражается в уменьшении идущего вниз потока за счет поглощения света на величину $Kidx$, а также за счет изменения

¹⁾ Символы x и X , относящиеся к толщине, к сожалению, совпадают с символами, используемыми для обозначения одной из координат цветности x , y , z и одной из цветовых координат X , Y , Z . Аналогично символ i для потока, идущего вниз, совпадает с символом, используемым для обозначения угла падения. Однако такая обычная практика, по-видимому, не привела к путанице.

направления света в обратную сторону вследствие его рассеяния на величину $Sidx$, где K характеризует часть идущего вниз потока, потерянного из-за поглощения в элементарном слое, а S — потерянную из-за изменения направления в результате рассеяния. K и S известны как коэффициенты поглощения и рассеяния красочного слоя.

Рассмотрим теперь, как изменится поток j , идущий вверх, при прохождении через тот же элементарный слой толщиной dx . Этот поток ослабляется на величину $Kjdx$ и $Sjdx$ за счет поглощения и рассеяния аналогичным образом, но часть потока $Sidx$, изменив направление из-за рассеяния света, идущего вниз, добавится к потоку, идущему вверх. Поэтому полное изменение dj идущего вверх потока будет

$$dj = -(S + K)jdx + Sidx, \quad (3.7)$$

а полное изменение $-di$ идущего вниз потока

$$-di = -(S + K)idx + Sjdx. \quad (3.8)$$

dj и di противоположны по знаку, так как направления двух потоков противоположны. Следует считать dx положительным приращением x , учитывая, что $x = 0$ соответствует неосвещенной стороне красочного слоя.

Дифференциальные уравнения (3.7) и (3.8) полностью описывают изменения, происходящие с потоками i и j при прохождении любого элементарного слоя красочной пленки. Если нам известны либо i , либо j в каком-то одном элементарном слое (например, у верхней границы) и если нам известны коэффициенты поглощения K и рассеяния S , характеризующие сочетание пигмент — связующее красочного слоя, то можно перейти от одного слоя к следующему как вверх, так и вниз в соответствии с уравнениями и выразить i и j , как функции переменной x . Однако более чем для двух слоев эти расчеты становятся длинными и запутанными.

ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

Применяя методы расчета к решению дифференциальных уравнений (3.7) и (3.8), Кубелка и Мунк [376] получили общее выражение для коэффициента отражения R , как функции толщины X любого красочного слоя с известными коэффициентами поглощения и рассеяния K и S , лежащего на основе с коэффициентом отражения R_g :

$$R = \frac{(R_g - R_\infty)/R_\infty - R_\infty (R_g - 1/R_\infty) e^{SX(1/R_\infty - R_\infty)}}{R_g - R_\infty - (R_g - 1/R_\infty) e^{SX(1/R_\infty - R_\infty)}}, \quad (3.9)$$

где R_∞ — отражение красочного слоя такой толщины, что дальнейшее, даже значительное ее увеличение не в состоянии сколько-

нибудь заметно изменить отражение света слоем; e — основание натуральных логарифмов ($= 2,71828\dots$). Отметим, что коэффициент поглощения K не присутствует в уравнении (3.9) явно, но входит в выражение для R_∞ , которое зависит от отношения коэффициентов поглощения и рассеяния K/S , т. е.

$$\frac{\cdot K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty}. \quad (3.10)$$

Как увидим ниже, выражение (3.10) широко используется в промышленности при определении красочных рецептов. Другие варианты этого выражения предложены Футом [156, 157]:

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \left(\frac{K^2}{S^2} + \frac{2K}{S} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

и Саундерсоном [575]:

$$R_\infty = \frac{1}{1 + K/S + (K^2/S^2 + 2K/S)^{1/2}}. \quad (3.12)$$

Фут [158] опубликовал краткую таблицу, выражающую значения K/S в зависимости от R_∞ , и любезно предоставил нам полную таблицу, которая приведена в табл. Г Приложения.

Уравнение (3.9) не учитывает отражение от верхней границы слоя (первое ограничение). Поэтому оно строго справедливо лишь для красочных слоев, погруженных в среду с таким же показателем преломления, как у связующего самого слоя; например, для слоя краски или пластмассы, погруженного в глицерин, что практически не представляет интереса. Однако акварели, бумага и текстиль представляют собой красочные слои, рассеяние которых вызвано соприкосновением частиц пигмента с воздухом. Можно считать, что связующим веществом в таких слоях является воздух. Поэтому уравнение (3.9) с успехом можно применить к слоям акварельной краски, к бумаге и текстилю.

Второе ограничение уравнения (3.9) связано с допущением, что коэффициенты поглощения и рассеяния (S и K) постоянны по всей толщине слоя. Это допущение не справедливо для матовых и полуматовых красочных пленок, так как в элементарные слои, расположенные вблизи верхней границы, проникает воздух; оно не справедливо также и для красочных пленок с избирательным распределением частиц, в которых обычно мелкие пигментные частицы всплывают на поверхность.

Третье ограничение связано с допущением, что пигментные частицы красочного слоя ориентированы произвольно так, что вызывают почти идеальное рассеяние светового потока внутри слоя. Поэтому для тонких слоев краски, пигментные частицы которых имеют форму хлопьев (например, алюминиевые или бронзовые краски) и располагаются преимущественно горизонтально, уравнение (3.9) неприменимо.

Четвертое ограничение состоит в том, что падающий световой поток сам должен быть идеально диффузным, т. е. все элементарные слои в уравнениях (3.7) и (3.8) рассматриваются в одинаковых условиях, а поскольку внутренний элементарный слой получает диффузные потоки как сверху, так и снизу, то и верхний элементарный слой также должен получать сверху диффузный поток. Дантлей [143] разработал общую теорию, не требующую таких ограничений. По его теории свойства материала определяются четырьмя константами вместо двух констант уравнения (3.9).

Последнее, наиболее существенное ограничение уравнения (3.9) состоит в том, что оно справедливо лишь для монохроматического света. Если S и K незначительно изменяются с длиной волны (что имеет место для красочного слоя, близкого к белому), то уравнение (3.9) пригодно для расчета отражения света, состоящего из смеси монохроматических излучений. При расчете отражения света другими красочными слоями уравнение (3.9) следует применять для каждой спектральной составляющей в отдельности.

Несмотря на эти ограничения, уравнение (3.9) ценно из-за универсальности. Оно обобщает множество важных, но менее общих формул, которые непосредственно из уравнения (3.9) вывести нельзя; например, коэффициент S нельзя вывести из уравнения (3.9). Глядя на громоздкость формулы (3.9), можно удивляться тому, что не используются другие, более ранние и простые теоретические решения Стокса [639], Брюса [74], Ченона и др. [90], Гуревича [207], Смита [610], Зильберштейна [601], Райда и Купера [564]. Объясняется это тем, что в формуле Кубелки — Мунка содержится три параметра, которые привычны для технологических красочников: R_∞ — отражение слоя бесконечной толщины, R_b — отражение слоя на черной основе и R_b/R_w — коэффициент контраста. Для расчета величин, выражаемых уравнением (3.9), используются таблицы показательной функции e^x . Впоследствии эти выражения были представлены в виде частных графических решений по примеру Стила [618].

Одно такое графическое решение Джадда [322], имеющее очевидную практическую ценность, широко использовалось в промышленности. График построен в координатах: R_0 — отражение красочного слоя на идеально черной основе с нулевым отражением ($R_g = 0$) (ось ординат) и коэффициент контраста — R_0/R_{R_g} (ось абсцисс). На этом графике даны линии постоянного R_∞ и линии постоянного произведения S на толщину слоя X (произведение SX называется рассеивающей способностью). На рис. 3.12 дано такое решение для величины укрывистости по TAPP1, отложенной по оси абсцисс при $C_{0,89} = R_0/R_{0,89}$. Ордината при $C_{0,89} = 1$ — геометрическое место точек, представляющих собой совершенно непрозрачные красочные слои. Все линии постоянных значений

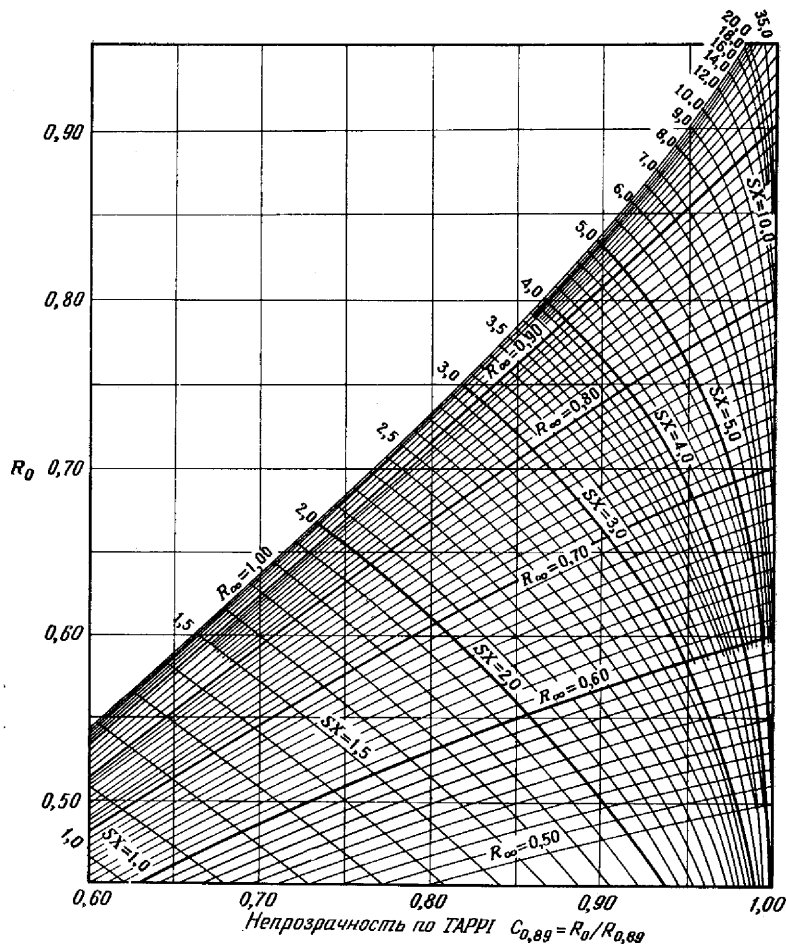


Рис. 3.12. Номограмма отражения — непрозрачности для белой основы с отражением 0,89 [322].

Линии, идущие вправо вверх, соответствуют постоянным значениям R_{∞} ; линии, идущие влево вверх, — постоянным значениям рассеивающей способности SX . Первое семейство линий позволяет определить изменение непрозрачности $C_{0,89}$ и отражения R_0 красочного слоя на черной основе в зависимости от толщины X , второе семейство позволяет определить изменение свойств красочного слоя при добавлении черного.

Номограмма рассчитана по формуле Кубелки — Мунка, она выражает:

- 1) зависимость отражения, непрозрачности по ТАРРІ и печатной непрозрачности от толщины слоя;
- 2) переход от непрозрачности по ТАРРІ к печатной непрозрачности, и наоборот;
- 3) рассеивающую способность SX от отражения и от непрозрачности по ТАРРІ.

R_{∞} идут слева направо с уклоном вверх, показывая по величине R_0 , как постепенно укрывается черная основа с нарастанием толщины красочного слоя. Так, например, двигаясь по линии постоянного значения R_{∞} до величины $SX = 2$, можно определить, как увеличится R_0 слоя на черной основе и как увеличится непрозрачность $C_{0,89}$ при увеличении толщины красочного слоя в два раза. Например, если $R_{\infty} = 0,80$, а рассеивающая способность $SX = 2,0$, то $R_0 = 0,642$, а непрозрачность $C_{0,89} = 0,763$. Удвоение рассеивающей способности ($SX = 4,0$) при неизменном R_{∞} соответствует удвоению толщины красочного слоя и дает значения $R_0 = 0,747$ и $C_{0,89} = 0,913$, т. е. отражение и непрозрачность увеличились. Линии постоянных значений рассеивающей способности SX соответствуют изменениям отражения и непрозрачности, вызванным увеличением коэффициента поглощения K в результате, например, добавления несветорассеивающего пигмента типа сажи.

Два других графических решения такого типа были опубликованы Джаддом [322]: одно — с абсциссой $R_0/R_{0,80}$, второе — с абсциссой $R_0/R_{0,70}$. Первое полезно, в частности, для контроля укрывистости красок по широко распространённым тестам, в которых белые поля имеют отражение, близкое к 0,80; второе — для контроля силикатных цементов, употребляемых в стоматологии. Были опубликованы и другие графические решения для промежуточных случаев, когда отражение белой основы изменяется от 0,70 до 0,89 [322]. Нордман [511] разработал частное графическое решение, дающее геометрическое место равных значений SX на графике с координатами R_0 и R_{∞} .

Совсем недавно цифровые вычислительные машины стали привычным средством быстрого и точного нахождения нужного решения. Графические решения постепенно теряют свою ценность.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Взаимосвязь между отражением и непрозрачностью стала предметом дальнейших исследований. В 1935 г. Стил [618] записал формулу Кубелки — Мунка в гиперболических функциях. Эми и сотр. [19] приспособили теорию Смита [610] для составления рецептур красок. Ингл [289], заинтересовавшись составлением рецептур пластмасс желаемого цвета, провел сравнительный математический анализ формул, полученных Стоксом [639], Брюсом [74], Смитом [610], Кубелкой — Мунком [376] и Эми и сотр. [19]. Он показал, что формулы Смита — Эми и Стокса — Брюса являются частными случаями формулы Кубелки — Мунка. Кубелке оставалось лишь освободить технологов от необходимости пользоваться частными графическими решениями. Кубелка в своей удивительной работе вывел четкие наглядные выражения для всех переменных, которые в экспоненциальной форме выглядели в урав-

нении (3.9) весьма громоздко, и доказал, что формула Гуревича [207] для пропускания, так же как формула Джадда [322], описывающая влияние различных белых основ на коэффициент контраста, выводятся из основных дифференциальных уравнений (3.7) и (3.8).

Точные решения, найденные Кубелкой, дали возможность непосредственно решать всевозможные задачи, касающиеся связи между отражением и непрозрачностью красочных слоев. Простая форма этих решений была получена Стиллом [618] в результате введения гиперболических функций. Нет сомнения, что неподготовленный читатель может испугаться непривычных обозначений и названий гиперболических функций sh , ch и cth и пропустить последующее изложение. Но любой заинтересованный изготовитель или потребитель, имеющий дело с красочными слоями, не должен пугаться этих математических обозначений. Технолог-колорист может узнать об этих функциях все, что ему необходимо, в течение 5 мин. sh и есть сокращенное обозначение выражения $(e^u - 1/e^u)/2$; ch и есть сокращенное обозначение выражения $(e^u + 1/e^u)/2$; их сумма, очевидно, есть показательная функция e^u ; cth и — отношение ch и sh и. Таблицы значений sh и, ch и, cth и общедоступны; функция sh и называется гиперболическим синусом и, ch и — гиперболическим косинусом и; cth и — гиперболическим котангенсом и.

Табл. 3.3 дает определения символов, используемых в решениях Кубелки. Некоторые из них были уже даны выше, а некоторые являются сокращениями часто повторяющихся выражений различных решений. Табл. 3.4 обобщает известные в настоящее время решения. Она скопирована непосредственно из статьи Кубелки [377].

Можно развить теорию Кубелки — Мунка так, чтобы ее можно было распространить на случаи с меньшими ограничениями. Тогда она станет более полезной для лакокрасочной промышленности. В 1954 г. Кубелка [378] дал точные решения уравнений (3.7) и (3.8) для случая неоднородной мутной среды. Кубелка сумел показать, что в этом случае можно использовать подход, аналогичный тому, который был использован для однородной среды; однако расчеты становятся значительно более сложными, за исключением некоторых частных случаев.

Для начала посмотрим, что произойдет с отражением и пропусканием в уравнениях (3.14) и (3.15), если слой становится все менее и менее рассеивающим. Если коэффициент рассеяния S мал по сравнению с коэффициентом поглощения K , то из определений табл. 3.3 видно, что

$$a = \frac{(S+K)}{S} \text{ стремится к } \frac{K}{S} \text{ и}$$

$$b = (a^2 - 1)^{1/2} \text{ также стремится к } \frac{K}{S}.$$

Таблица 3.3

Определение символов, использованных в табл. 3.4

Символ	Определение
R_g	Отражение основы, на которой лежит красочный слой
R	отражение слоя, лежащего на основе с отражением R_g
R_0	отражение слоя, лежащего на идеально черной основе с $R_g = 0$
R_I	отражение слоя, лежащего на идеально белой основе с $R_g = 1$
X	толщина слоя
$R_\infty \equiv (R)_X \rightarrow 0$	отражение слоя такой толщины, что дальнейшее увеличение толщины не меняет отражения
T_i	внутреннее пропускание слоя
$S \equiv (dR_0/dX)_{X \rightarrow 0}$	коэффициент рассеяния, степень увеличения отражения с толщиной очень тонкого слоя для диффузно падающего света
$K \equiv (dT_i/dX)_{X \rightarrow 0}$	коэффициент поглощения, степень уменьшения пропускания с толщиной очень тонкого слоя для диффузнопадающего света
$a \equiv (S+K)/S$	эквивалентно $(1/R_\infty + R_\infty)/2$, откуда $R_\infty = a - (a^2 - 1)^{1/2}$
$b \equiv (a^2 - 1)^{1/2}$	— эквивалентно $(1/R_\infty - R_\infty)/2$, откуда $R_\infty = a - b$
sh и	сокращение для $(e^u - 1/e^u)/2$, гиперболический синус и
ch и	сокращение для $(e^u + 1/e^u)/2$, гиперболический косинус и; sh и + ch и = e^u
cth и	сокращение для $(e^u + 1/e^u)/(e^u - 1/e^u)$, гиперболический котангенс и; cth и = $(ch$ и / sh и)
$arsh$	обратные гиперболические функции:
$arch$	если $v = sh$ и, тогда $u = arsh$ и, то же самое и для $arch$ и $arch$

Подставив в уравнения (3.14) и (3.15) $a = b = K/S$, получим

$$R_0 = \frac{S}{K(1 + cth KX)},$$

$$T_i = \frac{1}{(sh KX + ch KX)}.$$

Из полученных выражений видно, что R_0 явно стремится к нулю при $S \rightarrow 0$; таким образом, уравнение (3.14), как и предполагалось, показывает, что нерассеивающий слой, находящийся на черной основе ($R_g = 0$), тоже имеет отражение $R_0 = 0$. Из выражений гиперболического синуса и косинуса (табл. 3.3) видно, что знаме-

Таблица 3.4

Формулы Кубелки [377], показывающие взаимосвязь между параметрами, приведенными в табл. 3.3

Характеристика	Формула	Уравнение
$R = f(SX, R_g, R_\infty)$	$R = \frac{1 - R_g(a - b \operatorname{cth} bSX)}{a - R_g + b \operatorname{cth} bSX}$	3.13
$R_0 = f(SX, R_\infty)$	$R_0 = 1/(a + b \operatorname{cth} bSX)$	3.14
$T_i = f(SX, R_\infty)$	$T_i = b/(a \operatorname{sh} bSX + b \operatorname{ch} bSX)$	3.15
$SX = f(R, R_{g0}, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \left(\operatorname{arcth} \frac{a-R}{b} - \operatorname{arcth} \frac{a-R_g}{b} \right)$	3.16
$SX = f(R_0, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \operatorname{arcth} \frac{1 - aR_0}{bR_0}$	3.17
$SX = f(T_i, R_\infty)$	$SX = \frac{1}{b} \left(\operatorname{arsh} \frac{b}{T_i} - \operatorname{arsh} b \right)$	3.18
$R_0 = f(T_i, R_\infty)$	$R_0 = a - (T_i^2 + b^2)^{1/2}$	3.19
$T_i = f(R_0, R_\infty)$	$T_i^2 = (a - R_0)^2 - b^2$	3.20
$R_\infty = f(R_0, T_i)$	$a = \frac{1 + R_0^2 - T_i^2}{2R_0} \text{ (Гуревич)}$	3.21
$R = f(R_0, R_g, R_\infty)$	$R = \frac{R_0 - R_g(2aR_0 - 1)}{1 - R_0R_g}$	3.22
$R_0 = f(R, R_g, R_\infty)$	$R_0 = \frac{(R - R_g)}{1 - R_g(2a - R)}$	3.23
$R_\infty = f(R, R_0, R_g)$	$a = \frac{1}{2} \left[R + \frac{R_0 - R + R_g}{R_0R_g} \right]$	3.24
$R = f(R_0, T_i, R_g)$	$R = \frac{R_0 + T_i^2 R_g}{1 - R_0R_g}$	3.25
$T_i = f(R, R_0, R_g)$	$T_i^2 = (R - R_0)(1/R_g - R_0)$	3.26
$R = f(R_1, R_0, R_g)$	$R = \frac{R_0(1 - R_g) + R_1R_g(1 - R_g)}{1 - R_0R_g} \text{ (Джадд)}$	3.27
$R_1 = f(R, R_0, R_g)$	$R_1 = \frac{R - R_0 + R_0R_g(1 - R)}{R_g(1 - R_0)} \text{ (Джадд)}$	3.28

натель выражения T_i превращается в e^{KX} , и тогда $T_i = e^{-KX}$. Следует отметить, что коэффициент поглощения K для идеально диффузного потока, как показал Кубелка [377], в два раза выше, чем для направленного.

Если коэффициент поглощения K пропорционален концентрации красителя в слое, то вместо K можно написать cK_1 , где K_1 — коэффициент поглощения слоя единичной концентрации красите-

ля, тогда $T_i = e^{-cK_1X}$ или $\ln(1/T_i) = cK_1X$. Для слабо мутных сред пропускание не точно следует этому закону, отклонения от него можно определить по графику, изображенному на рис. 3.13. На графике рис. 3.13 по оси ординат отложена величина

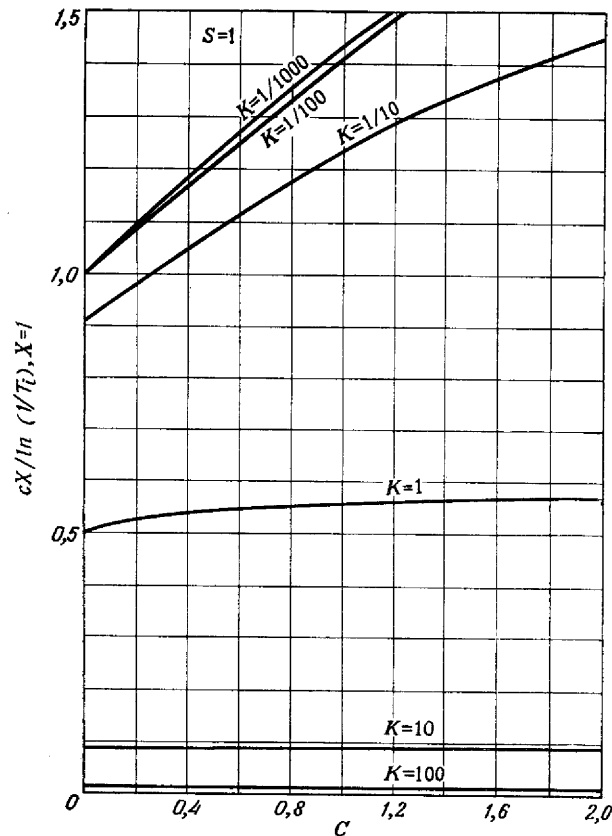


Рис. 3.13. Изменение величины, обратной показателю ослабления $[\ln(1/T_i)]1/cX$ от поглощения и рассеяния при концентрации c .

Каждая кривая относится к единичной толщине ($X=1$) и к постоянному отношению (K/S) коэффициентов поглощения и рассеяния. Необходимо обратить внимание на то, что для более светорассеивающих слоев ($K/S < 1$) пропускание увеличивается при больших значениях концентрации, так как рассеянный свет не теряется, а многократно рассеивается в прямом направлении.

$cX/\ln(1/T_i)$, а по оси абсцисс — концентрация c красителя в слое. Горизонтальные линии соответствуют случаям, когда коэффициент рассеяния мал по сравнению с коэффициентом поглощения; другие кривые рассчитаны по уравнению (3.15) для отношений K/S , указанных на графике. Зная пропускание в отношении диффузно

падающего потока для двух слоев, различающихся лишь концентрацией красителя, можно, воспользовавшись таким графиком, приближенно найти отношение K/S . Графики такого типа с прямой аппроксимацией таких кривых были использованы для анализа данных о пропускании растворов сахара, однако они могут использоваться также для эмалей, лаков, пластмасс.

Для мутных сред понятие «коэффициент поглощения» или поглощение для величины $\ln(1/T_i)$ не подходит, так как оно характеризует как поглощающую, так и рассеивающую способности среды. Можно употребить, например, такой термин как «коэффициент ослабления». Величина $[\ln(1/T_i)]/cX$ иногда используется для характеристики поглощения и рассеивания под названием коэффициента ослабления.

Рассмотрим вкратце случаи, когда коэффициент поглощения K настолько мал, что его можно принять равным 0. Тогда из уравнения (3.18) следует, что R_∞ стремится к 1. Значение коэффициента отражения слоя R , как функции рассеивающей способности SX , и отражения R_g можно рассчитать по уравнению (3.9). Однако если в уравнение (3.9) подставить $R_\infty = 1$, то мы получим неопределенное выражение для R , т. е. $R = 0/0$. Чтобы найти значение R , мы должны исходить из положения, что R_∞ постепенно приближается к 1, т. е. $R_\infty \rightarrow 1$. Для этого возьмем производные числителя (N) и знаменателя (D) уравнения (3.9) по R_∞ , т. е. dN/dR_∞ , и затем положим, что $R_\infty = 1$. Отношение

$$\left(\frac{dN}{dR_\infty} / \frac{dD}{dR_\infty} \right)_{R_\infty=1}$$

дает величину отражения R для случая $R_\infty = 1$ или $K = 0$.

В результате получим выражение

$$R_{(K=0)} = \frac{SX(1-R_g) + R_g}{SX(1-R_g) + 1}.$$

Отметим, что для толщины слоя $X = 0$, $R_{(K=0)} = R_g$. Для $R_g = 0$, т. е. для идеально черной основы, формула упрощается:

$$R_{(K=0)} = \frac{SX}{SX+1}.$$

ПРОСТЕЙШИЕ ЧИСЛОВЫЕ ПРИМЕРЫ

На нескольких примерах покажем, как пользоваться некоторыми из формул, полученных из теории Кубелки — Мунка, для решения вопросов, связанных с отражением и непрозрачностью красочных слоев. Значения $\sinh u$ даны в табл. Д Приложения.

Пример 1. Предположим, что отражения образца бумаги, измеренные на черной основе ($R_g = 0$) и на белой основе ($R_g = 0,89$),

равны $R_0 = 0,642$ и $R_{0,89} = 0,841$. Необходимо найти коэффициент поглощения K , коэффициент рассеяния S и R_∞ бумаги.

Из первой колонки табл. 3.4 видно, что в соответствии с уравнением (3.24) R_∞ дано в функции R , R_0 и R_g

$$a = \frac{1}{2} \left[0,841 + \frac{0,642 - 0,841 + 0,89}{0,642 \cdot 0,89} \right] = \frac{0,841 + 1,209}{2} = 1,025.$$

Из определения a (табл. 3.3) $R_\infty = a - (a^2 - 1)^{1/2} = 1,025 - 0,051^{1/2} = 0,800$. Эту задачу можно решить графически с помощью рис. 3.12; оба результата хорошо согласуются.

Чтобы найти коэффициент рассеяния S , нужно воспользоваться данными первой колонки табл. 3.4, из которых следует, что SX можно найти из уравнений (3.16) или (3.17). Воспользуемся обеими формулами. Сначала нужно рассчитать величину b .

Из выражения для b (табл. 3.3) видно, что $b = (a^2 - 1)^{1/2} = 0,051^{1/2} = 0,225$; b можно также найти как $a - R_\infty = 1,025 - 0,800 = 0,225$. Подставляя $R_g = 0$ и $R = 0,642$ в уравнение (3.16), находим

$$\begin{aligned} SX &= \frac{1}{0,225} \left(\operatorname{arcth} \frac{1,025 - 0,642}{0,225} - \operatorname{arcth} \frac{1,025}{0,225} \right) = \\ &= \frac{\operatorname{arcth} 1,702 - \operatorname{arcth} 4,556}{0,225} = \frac{0,674 - 0,223}{0,225} = 2,00. \end{aligned}$$

Возвращаясь к уравнению (3.17), найдем

$$SX = \frac{1}{0,225} \left(\operatorname{arcth} \frac{1 - 1,025 \cdot 0,642}{0,225 \cdot 0,642} \right) = \frac{\operatorname{arcth} 2,37}{0,225}.$$

По табл. Д Приложения найдем $SX = 0,450/0,225 = 2,00$, т. е. то же значение, что мы нашли по уравнению (3.16).

Наконец, чтобы найти коэффициент поглощения K , воспользуемся выражением для a , из которого следует $K = S(a - 1) = 2,00(1,025 - 1)/X = 0,050/X$. Другой способ нахождения K по уравнению (3.10), из которого следует $K = 2,00(1 - 0,800)^2/2 \cdot 0,800 = 2,00 \cdot 0,040/1,600X = 0,050/X$, т. е. то же самое. Этим заканчивается решение примера 1.

Пример 2. Решим теперь обратный пример 1. Предположим, что нам известны $R_\infty = 0,800$ и рассеивающая способность $SX = 2,0$ красочного слоя. Требуется найти отражение R_0 на черной основе и непрозрачность по ТАРРИ $R_0/R_{0,89}$.

Из первой колонки табл. 3.4 известно, что уравнение (3.14) дает R_0 в функции R_∞ и SX . Мы должны сначала найти величины a и b из табл. 3.3:

$$a = \frac{1/0,80 + 0,80}{2} = \frac{1,25 + 0,80}{2} = 1,025,$$

$$b = \frac{1/0,80 - 0,80}{2} = \frac{1,25 - 0,80}{2} = 0,225.$$

Тогда из уравнения (3.14) получим

$$R_0 = \frac{1}{1,025 + 0,225 \operatorname{ctgh} 0,225 \cdot 2,00} = \frac{1}{1,025 + 0,225 \cdot 2,370} = \\ = \frac{1}{1,558} = 0,642.$$

Из примера 1 мы уже знаем, что это решение правильное.

Для определения непрозрачности по ТАРПИ $R_0/R_{0,89}$ воспользуемся выражением (3.13), положив $R_g = 0,89$, тогда

$$R = \frac{1 - 0,89 (1,025 - 0,225 \operatorname{ctgh} 0,225 \cdot 2,00)}{1,025 - 0,89 + 0,225 \operatorname{ctgh} 0,225 \cdot 2,00} = \\ = \frac{1 - 0,89 (1,025 - 0,533)}{1,558 - 0,89} = \frac{1 - 0,438}{0,668} = 0,841.$$

Из примера 1 нам известно, что это решение также правильное. Этим заканчивается пример 2.

Пример 3. Требуется найти отражение R_0 на черной основе и непрозрачность по ТАРПИ для листа бумаги из примеров 1 и 2, но удвоенной плотности (удвоенного удельного веса).

Решение такое же, как в примере 2, за исключением того, что $SX = 4,00$ вместо 2,00. Из уравнения (3.14)

$$R_0 = \frac{1}{1,025 + 0,225 \operatorname{ctg} 0,225 \cdot 4,00} = \\ = \frac{1}{1,025 + 0,225 \cdot 1,396} = \frac{1}{1,339} = 0,747.$$

Это решение совпадает с величиной R_0 , которую можно определить по графику рис. 3.12.

Уравнение (3.13) принимает вид

$$R = \frac{1 - 0,89 (1,025 - 0,314)}{1,339 - 0,89} = \frac{1 - 0,633}{0,449} = 0,817,$$

непрозрачность по ТАРПИ будет равна $R_0/R_{0,89} = 0,747/0,817 = 0,914$, что очень близко к непрозрачности (0,913), отсчитываемой по рис. 3.12. Этим заканчивается решение примера 3.

Пример 4. Бумага из примера 3 имеет печатную непрозрачность $R_0/R_\infty = 0,747/0,80 = 0,933$. Предположим, что печатная непрозрачность или непрозрачность в стопе должна быть 88%. Требуется определить: на сколько можно уменьшить удельный вес бумаги, чтобы получить заданное значение непрозрачности при промышленном допуске на величину печатной непрозрачности в 2%?

Для решения этой задачи отметим, что R_0 , R_∞ и S нам уже известны. Требуется найти X/X_3 , где X_3 — удельный вес бумаги

в примере 3. Воспользуемся уравнением (3.17). Для печатной непрозрачности 88%, плюс 2% допуска, R_0/R_∞ должно быть равно 0,90. Но так как $R_\infty = 0,80$, необходимое значение R_0 равно $0,80 \times 0,90 = 0,72$, а $SX_3 = 4,0$. Тогда из уравнения (3.17) получим

$$SX = \frac{4,0X}{X_3} = \frac{1}{0,225} \left(\operatorname{arcth} \frac{1 - 1,025 \cdot 0,72}{0,225 \cdot 0,72} \right), \\ \frac{X}{X_3} = \frac{1}{0,900} (\operatorname{arcth} 0,262/0,162) = 1,111 (\operatorname{arcth} 1,613).$$

Из табл. Д Приложения находим, что значение u , для которого гиперболический котангенс $\operatorname{cthu} = 1,613$, равно 0,725. Таким образом, $X/X_3 = 1,111 \times 0,725 = 0,805$. Это означает, что допустимо уменьшение удельного веса бумаги примерно на 20%. Полученный результат можно проверить, определяя R_0 по графику рис. 3.7 для $SX = 4,0 \times 0,805 = 3,22$. Полученное значение R_0 , равное 0,720, обеспечивает заданное значение непрозрачности $R_0/R_\infty = 0,720/0,800 = 0,90$, как и требовалось по условиям задачи.

Пример 5. Допустим, что коэффициент рассеяния слоя акварельной краски $S = 4,0$, а коэффициент поглощения $K = 0,10$. Требуется найти коэффициент контраста $C_{0,80} = R_0/R_{0,80}$ единичной толщины слоя ($X = 1$).

По определению из табл. 3.3 находим $a = (S + K)/S = 4,1/4,0 = 1,025$, аналогично примеру 1 находим $b = 0,225$ и $R_\infty = 0,800$. Тогда отражение на черной основе R_0 , как и в примере 3, будет 0,747. Отражение на белой основе для $R_g = 0,80$ найдем из уравнения (3.13), подставив $R_g = 0,80$,

$$R = \frac{1 - 0,80 \cdot 0,741}{1,339 - 0,80} = \frac{0,431}{0,539} = 0,800;$$

этот результат правильный, так как уже известно, что для этого слоя $R_\infty = 0,800$ точно такое же, как и отражение слоя при любой толщине. Коэффициент контраста $R_0/R_{0,80}$ будет равен $0,747/0,800 = 0,933$.

Этот результат можно получить также из уравнений (3.27) и (3.28). Из уравнения (3.28) находим R_1 , подставив $R_g = 0,89$, $R_{0,89} = 0,817$ (из примера 3) и $R_0 = 0,747$:

$$R_1 = \frac{0,817 - 0,747 + 0,747 \cdot 0,89 (1 - 0,817)}{0,89 (1 - 0,747)} = \frac{0,192}{0,225} = 0,852.$$

Тогда из уравнения (3.27) получим

$$R = \frac{0,747 (1 - 0,80) + 0,852 \cdot 0,80 (1 - 0,747)}{1 - 0,747 \cdot 0,80} = \frac{0,321}{0,402} = 0,80;$$

результаты совпадают, однако прямое решение с помощью уравнения (3.13) проще, так как основано на использовании гиперболических функций.

Пример 6. Предположим, что красочный слой в примере 5 лежит на стекле и освещается диффузно. Какая часть падающего диффузного потока входит в стекло?

Задачу можно решить с помощью уравнения (3.20) или (3.26). Из уравнения (3.20) получим

$$T_i^2 = (1,025 + 0,747)^2 - 0,225^2 = 0,0267,$$

$$T_i = 0,163.$$

Из уравнения (3.26) получим

$$T_i^2 = (0,800 - 0,747) \left(\frac{1}{0,800} - 0,747 \right) = 0,0267,$$

$$T_i = 0,163.$$

Результаты совпадают.

Пример 7. Сколько требуется слоев единичной толщины ($X = 1$) акварельной краски из примеров 5 и 6 для получения полной укрывистости, определяемой соотношением $R_0/R_{0,80} = 0,98$?

Так как $R_{0,80} = R_\infty = 800$, $R_0 = 0,98 \cdot 0,80 = 0,784$, задачу легко решить с помощью уравнения (3.17), подставив $S = 4,0$:

$$4,0X = \frac{1}{0,225} \left(\operatorname{arcth} \frac{1 - 1,025 \cdot 0,784}{0,225 \cdot 0,784} \right),$$

$$X = 1,111 \operatorname{arcth} 1,112 = 1,111 \cdot 1,468 = 1,6;$$

мы видим, что двух слоев более чем достаточно.

Пример 8. Предположим, что слой акварельной краски из примеров 5 и 7 должен обеспечить 84% отражения при толщине, соответствующей полной укрывистости. Очевидно, что эта краска сама по себе не может удовлетворять этим условиям, так как R_∞ равно только 0,80. Однако изготовитель краски может взять специальную белую пигмент с R_∞ , равным 96%, и сделать такую акварельную краску на этом пигменте, которая обеспечивает при толщине ($X = 1/4$) отражение на черной основе $R_0 = 0,80$. Какой процент примеси этой специальной белой краски потребуется, чтобы смесь красок обеспечила необходимое отражение 84%?

Сначала с помощью уравнения (3.17) нужно определить коэффициент рассеяния специальной краски; для этого надо рассчитать величины a и b в соответствии с их определением в табл. 3.3:

$$a = \frac{1/0,96 + 0,96}{2} = 1,0008,$$

$$b = \frac{1/0,96 - 0,96}{2} = 0,0408.$$

Тогда из уравнения (3.17)

$$\frac{S}{4} = \frac{1}{0,0408} \left(\operatorname{arcth} \frac{1 - 1,0008 \cdot 0,80}{0,0408 \cdot 0,80} \right),$$

$$S = \frac{4(\operatorname{arcth} 6,11)}{0,0408}.$$

Из табл. Д Приложения для $\operatorname{cthu} = 6,11$ найдем $u = 0,165$; таким образом, $S = 4 \times 0,165/0,0408 = 16,2$.

Теперь найдем K , зная a и S из выражения для a в табл. 3.3

$$K = S(a - 1) = 16,2 \cdot 0,0008 = 0,013.$$

Специальная краска лучше исходной, так как она гораздо лучше рассеивает свет (ср. коэффициенты рассеяния 16,2 и 4,0), а также потому, что она поглощает очень мало света (ср. коэффициенты поглощения 0,013 и 0,10). Высокое значение отношения S/K обеспечивает специальной краске очень большое значение $R_\infty = 0,96$. При любом смешивании акварельных красок S и K смеси являются средними величинами S и K компонентов, взятых в объемно-весовом соотношении. Задачу можно решить, пользуясь значениями R_∞ в функции K/S , данными из табл. Г Приложения.

Доля специальной краски в смеси	Смесь			
	S	K	K/S	R_∞
0,0	4,00	0,1000	0,02500	0,800
0,2	6,44	0,0826	0,01283	0,852
0,4	8,88	0,0652	0,00734	0,886
0,6	11,32	0,0478	0,00422	0,912
0,8	13,76	0,0304	0,00221	0,936
1,0	16,20	0,0130	0,00080	0,961

Отметим, что 20%-ная примесь специальной краски повышает R_∞ смеси больше, чем требуется для достижения желаемого значения $R_\infty = 84\%$. Интерполяция показывает, что необходимая доля примеси составляет 16%. Этим заканчивается решение примера 8.

Из этих восьми примеров ясно, как следует пользоваться формулами табл. 3.4 для решения задач, связанных с отражением и непрозрачностью. Ясно также, что можно обойтись без использования частных графических решений уравнения (3.9), подобных показанным на рис. 3.12, хотя они и удобны для выполнения типовых расчетов. Математический анализ, данный Кубелкой в 1948 г. [377], избавил лакокрасочную промышленность от необходимости использования графических решений; он привел так-

е соотношения, по которым графические решения получить гораздо легче, чем по уравнению (3.9) в случае, если лакокрасочная промышленность найдет такие графики полезными. Использование небольших цифровых настольных калькуляторов показывает, что они являются очень удобным средством выполнения расчетов, требуемых при решении вышеприведенных примеров.

СОСТАВЛЕНИЕ РЕЦЕПТУРЫ КРАСОК

Воспроизвести цвет, желательный для заказчика по представленному образцу, можно различными способами. Наиболее распространенный способ состоит в подборе имеющихся в распоряжении пигментов и красителей для получения соответствия с помощью метода проб и ошибок. Чтобы получить кроющий или близкий к кроющему слой, требуется как минимум четыре составляющих для достижения требуемой окраски. Изменение пропорций четырех составляющих дает три степени свободы для получения цветового соответствия. Так, один пигмент, например белый, не дает никакой степени свободы. Красочный слой может быть только белым. Добавление другого пигмента, например черного, дает одну степень свободы. Красочный слой теперь может стать любым из ряда голубовато-серого при изменении соотношений белого и черного пигментов. Добавление третьего пигмента, например красного, позволит получить любой из двумерной серии цветов, преимущественно красного оттенка. Добавление четвертого пигмента обеспечит уже трехмерное изменение таким образом, что в четком подборе соотношений четырех составляющих можно получить красочный слой, точно совпадающий по цвету с образцом, или его цвет лежит в пределах гаммы цветов, которые могут быть получены этими четырьмя составляющими.

Если требуется получить не кроющий красочный слой, позволяющий в большей или меньшей степени видеть основу, то уровень прозрачности уже дает одну степень свободы и потому достаточно только трех составляющих в смеси. Трехкомпонентные смеси пригодны для окраски текстиля. Если выбранные из-за их доступности красители отличаются от тех, которые использовались при изготовлении образцов, что обычно имеет место, цветовое соответствие может быть метамерным. Это означает, что если цвета составленного красителя и цвет образца будут совпадать при некотором заданном освещении, использованном при составлении рецептуры, то при другом освещении они могут более или менее различаться.

Другой способ достижения цветового соответствия состоит в том, чтобы найти те красители, которые использовались при изготовлении образцов, а затем подобрать требуемые соотношения. Этим способом можно ограничиться спектрофотометрическими

измерениями. Решение будет простым. Спектральная кривая отражения или пропускания полученного образца должна быть такой же, как у оригинала, и тогда будет достигнуто цветовое соответствие независимо от освещения и наблюдателя, оценивающего это соответствие.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРАСЯЩИХ ВЕЩЕСТВ

Очень часто первый шаг в составлении рецептуры красок состоит в определении красящих веществ, использованных при изготовлении того или иного красочного слоя.

Важной и, к сожалению, иногда главной функцией промышленной исследовательской лаборатории является выяснение того, что делают другие предприятия. Идентификация красящих веществ, использованных в рецептуре других предприятий, составляет часть этой деятельности.

Прозрачные среды. Если слой не является светорассеивающим, то определить компоненты красителя сравнительно просто, пото-

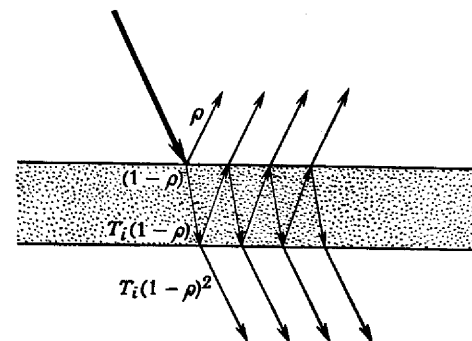


Рис. 3.14. Многократное отражение света между верхней и нижней границей светорассеивающего плоскопараллельного слоя.

му что пучок света не теряет своей направленности и его можно проследить. Слой такого типа, не закрепленный на подложке, отражает часть ρ падающего света верхней границей в соответствии с уравнениями (3.4) и (3.5), где ρ обозначает $\rho_{\text{н}}$, $\rho_{\text{л}}$, или R_T в зависимости от рассматриваемого варианта. Оставшаяся часть $(1 - \rho)$ проходит внутрь, а часть его $T_i(1 - \rho)$ достигает нижней границы, где T_i — внутреннее пропускание слоя. Часть его испытывает многократные отражения от верхней и нижней границ слоя, как показано на рис. 3.14.

Сложив все потоки, вышедшие наружу через верхнюю и нижнюю границы слоя, можно получить формулы для отражения

и пропускания несветорассеивающего слоя для потока, падающего почти перпендикулярно к поверхности:

$$R_0 = \rho + \rho(1-\rho)^2 T_i^2 (1 + \rho^2 T_i^2 + \rho^4 T_i^4 + \dots) = \rho + \frac{\rho(1-\rho)^2 T_i^2}{1 - \rho^2 T_i^2}, \quad (3.29)$$

$$T = T_i(1-\rho)^2 (1 + \rho^2 T_i^2 + \rho^4 T_i^4 + \dots) = \frac{T_i(1-\rho)^2}{1 - \rho^2 T_i^2}. \quad (3.30)$$

Уравнения (3.29) и (3.30) применимы к прозрачным слоям стекла, желатини или пластмассы. Если показатель преломления слоя равен $n = 1,5$, то отражение от верхней границы ρ при почти перпендикулярном падении света, найденное из уравнения (3.1), равно 0,04 (или 4%). Уравнение (3.29) показывает, что отражение почти непоглощающего слоя ($T_i = 1$), находящегося над черным фоном ($R_g = 0$), но оптически с ним не связанного, почти вдвое больше, чем отражение ρ только от верхней границы, т. е. составляет $\sim 8\%$. С другой стороны, если слой поглощает большую часть потока ($T_i \rightarrow 0$), прошедшего в слой, то отражение R_0 равно отражению только от верхней границы и составляет лишь 4%.

Уравнение (3.30) дает связь между пропусканием T и внутренним пропусканием T_i . Для слоя стекла или пластика $T_i \approx T/0,92$; это приближенное значение часто используется. Если кювета, наполненная раствором, сравнивается с кюветой, наполненной только растворителем, по спектрофотометрическим данным, то отношение двух значений пропусканий (часто называемое пропускающей способностью) весьма близко к T_i раствора; и этим часто пользуются для определения T_i различных растворов.

Изменение внутреннего пропускания T_i от изменения толщины слоя X и концентрации c для несветорассеивающего красящего вещества (красителя) выражается просто:

$$T_i = e^{-cK_1 X}, \quad (3.31)$$

где K_1 — коэффициент поглощения для единичной концентрации ($c = 1$), e — основание натуральных логарифмов ($= 2,71828\dots$). Для $c = 1$ уравнение (3.31) известно под названием закона Бугера. Для постоянной толщины X это уравнение известно под названием закона Бера. Если изменение концентрации раствора красителя или любого химического компонента вызывает изменение K_1 , говорят, что раствор не подчиняется закону Бера.

Окраска прозрачных слоев характеризуется зависимостью K_1 от длины волны. Прологарифмировав уравнение (3.31), найдем

$$K_1 = \frac{-\ln T_i}{cX}. \quad (3.32)$$

Если на графике рис. 3.15 по оси ординат отложить $-\ln T_i$, а по оси абсцисс cX , то изменение внутреннего пропускания про-

зрачного окрашенного слоя с изменением концентрации c и толщины слоя X будет представлено семейством прямых, проходящих через начало координат. Наклон каждой прямой определяет коэффициент поглощения соответствующего красителя при единичной концентрации. Произведение cX является мерой количества красящего вещества на единице поверхности слоя, поэтому ($-\ln T_i$) также является его мерой, причем константой пропорциональности, связывающим эти две меры, является коэффициент

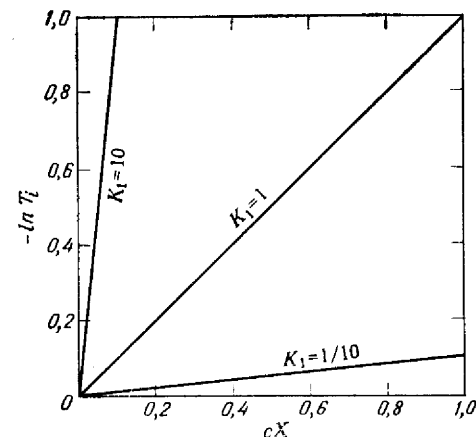


Рис. 3.15. Графическое определение коэффициента поглощения K_1 красителя с концентрацией c от внутреннего пропускания T_i светорассеивающего слоя толщиной X .

Коэффициент поглощения определяется по крутизне прямой на графике с осями координат cX и $-\ln T_i$.

поглощения K_1 для единичной концентрации. Любое отклонение данных, нанесенных на график, от прямой линии, проходящей через начало координат, показывает, что K_1 не является постоянной величиной, не зависящей от концентраций, т. е. краситель не подчиняется закону Бера [219]. Этот тип графика применим к прозрачным растворам, прозрачным связующим веществам, лаковым пленкам, к прозрачным слоям стекла и пластика. Он часто используется в абсорбциометрии (иногда ошибочно называемой химической колориметрией [436]) для определения концентрации одного из компонентов раствора. Он также используется для выражения на логарифмической шкале спектрального пропускания как функции длины волны. Некоторые пилющие спектрофотометры сконструированы так, что спектрофотометрические данные можно (в случае необходимости) получить непосредственно в желаемой форме. Если кювета с растворителем помещена в пучок света сравнения, то спектрофотометр регистрирует пропускаю-

щую способность, являющуюся хорошим приближением к внутреннему пропусканию (T_i), либо непосредственно в значениях T_i , либо в логарифмическом выражении этой величины. Натренированный технолог-колорист по характеру кривой может распознать

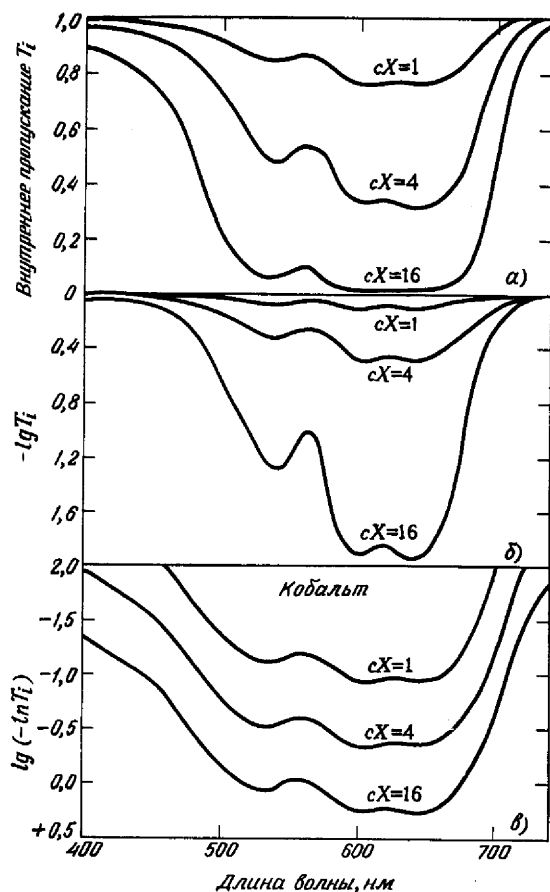


Рис. 3.16. Спектральное внутреннее пропускание T_i для трех синих стекол как функция длины волны в трех видах.

а — непосредственно в виде T_i ; б — в виде $-\lg T_i$; в — $\lg(-\lg T_i)$. Последняя диаграмма может быть названа оптической характеристикой красящего вещества. Необходимо отметить, что формы трех кривых на этом графике идентичны.

многие красители и даже двухкомпонентные смеси таких красителей. Однако существует еще более удобный способ построения графиков по таким данным. Прологарифмировав обе части уравнения

(3.32), получим

$$\lg(-\lg T_i) = \lg K_1 + \lg cX. \quad (3.33)$$

Для любой спектрофотометрической кривой толщина красочного слоя X и концентрация красителя c являются постоянными, не зависящими от длины волны. Отложив $\lg(-\lg T_i)$ по оси ординат, а длину волны λ по оси абсцисс, получим кривую, форма которой не зависит от количества присутствующего красителя [436, 600]. Как видно из уравнения (3.33), форма кривой зависит исключительно от изменения K_1 с длиной волны. Таким способом можно дать оптическую характеристику красителю или смеси красителей. При любой другой толщине и концентрации тот же самый краситель должен повторить свою оптическую характеристику и таким образом показать свою идентичность.

На рис. 3.16 даны три группы спектрофотометрических данных кобальтового стекла, построенных тремя различными способами. Первая группа относится к единичному количеству красящего вещества $cX = 1$, вторая относится к $cX = 4$, третья — к $cX = 16$.

В первом способе графического отображения непосредственно использованы значения величины внутреннего пропускания T_i . Этот график показывает, что первая группа данных соответствует слабому синему цвету, вторая — среднему и третья — глубокому синему.

Во втором способе использованы логарифмические значения внутреннего пропускания T_i . Причем десятичные логарифмы также годятся для построения кривых, как натуральные логарифмы с основанием e ; из-за удобства они даже чаще используются, чем натуральные. Из второго графика ясно видно, что верхняя кривая относится к одной четвертой единичной концентрации красящего вещества, которой соответствует средняя кривая, а нижняя кривая — к учетверенному содержанию этого вещества. Каждая ордината верхней кривой равна $1/4$ ординаты средней кривой и $1/16$ ординаты нижней кривой (при их измерении от верхней границы графика).

Специалист по красочным слоям узнает по любой из верхних шести кривых, что красящим веществом является кобальт, хотя запись и несколько замаскирована.

Нижний график, представляющий $\lg(-\lg T_i)$ как функцию длины волны λ , безошибочно выявляет кобальт в трех идентичных оптических характеристиках. Расположение кривых по высоте показывает количество красящего вещества. Заметим, что для любой длины волны ординаты трех рядом лежащих кривых отличаются на величину 0,602, равную $\lg 4$.

Если слой, не являющийся светорассеивающим, состоит из нескольких компонент, то его пропускание также находится по

уравнению (3.31). Произведение cK_1 является суммой произведений $(cK_1)_p, (cK_1)_q, (cK_1)_r, \dots$ для отдельных составляющих p, q, r, \dots , если между составляющими нет химического взаимодействия. Для определения смеси технолог-колорист должен попытаться найти составляющие p, q, r, \dots , для которых коэффициенты поглощения K_1 известны как функции длины волны λ , и должен взвесить их в таких соотношениях, чтобы в сумме воспроизвести кривую неизвестной смеси на графике $(-\lg T_i)$. Весовые соотношения определяют искомые концентрации. Лучший способ нахождения составляющих заключается в расположении областей минимального пропускания спектра, называемых полосами поглощения. Стирне [615, 616] дает исчерпывающую инструкцию с многочисленными числовыми примерами, касающуюся анализа прозрачных сред с использованием графика $\lg(-\lg T_i)$ как функции длины волны.

В 1962 г. Батлер [88] показал, что распознавание прозрачного красящего вещества по малому количеству образца, слишком разбавленного для того, чтобы отличие спектрального внутреннего пропускания от 100% поддавалось бы измерению, может быть выполнено введением достаточного количества белого пигмента для получения слоя со спектральным пропусканием $\sim 0,1\%$, что соответствует условиям уравнения (3.15). Таким образом, неизвестный раствор становится связующим белой краски. Мы обнаруживаем, что изменение спектрального пропускания этой белой красочной пленки с длиной волны вполне поддается измерению. Таким образом, можно рассчитать коэффициент поглощения K в функции длины волны с помощью уравнения (3.21) и осуществить идентификацию. Увеличение чувствительности на два порядка вызвано увеличением пути, пройденного световым лучом через связующее от верхней до нижней границы слоя, претерпевшим многократное рассеяние от светонепоглощающих белых пигментных частиц.

Мутные среды. Строго говоря, все окрашенные слои — мутные т. е. все они несколько рассеивают падающий на них свет. Например, синий цвет неба и моря в тропической зоне обусловлен светорассеиванием. Только вакуум, строго говоря, является несветорассеивающей средой. Однако воздушная среда, о которой речь шла выше, рассеивает сравнительно мало проходящего через нее света, поэтому уравнение (3.31) к таким средам можно применять без значительных ошибок. Теперь обратимся к слоям, для которых уравнение (3.31) неприменимо даже для приближенных вычислений. Иначе говоря, мы не будем рассматривать слабо мутные среды (такие, как растворы сахара), а рассмотрим сильно светорассеивающие среды (слои бумаги, краска, эмали), которые представляют большой практический интерес.

Многие из этих сред обладают такими светорассеивающими и светопоглощающими свойствами, которые позволяют применить для их анализа теорию Кубелки — Мунка. Нефлюоресцирующий слой, поглощающий и рассеивающий свет из-за наличия в нем небольших светорассеивающих элементов, можно охарактеризовать коэффициентами поглощения K и рассеяния S , являющимися функциями длины волны для видимой области спектра. Отношение K/S можно найти по измерениям на спектрофотометре отражения R_∞ полностью кроющего слоя данного красящего вещества с последующим применением уравнения (3.10) и табл. Г Приложения. Коэффициент рассеяния S может быть получен несколькими способами в соответствии с уравнениями (3.16)—(3.18).

1. Измерить отражение R слоя известной толщины X и R_∞ на основе с известным отражением R_g и подсчитать S по (3.16).
2. Измерить отражение R_0 слоя известной толщины X и R_∞ на неотражающей основе с $R_g = 0$ и подсчитать S по (3.17). Это частный случай уравнения (3.16).
3. Измерить пропускание T_i слоя известной толщины X и R_∞ и подсчитать S из (3.18).

Зная R_∞ , по уравнению (3.10) находят K/S ; определив коэффициент рассеяния S по уравнениям (3.16)—(3.18), можно определить коэффициент поглощения K .

Если определить таким образом коэффициенты поглощения и рассеяния неизвестного образца как функции длины волны, то задача технолога-колориста сводится к нахождению известного красящего вещества или комбинации известных красящих веществ, коэффициенты поглощения и рассеяния которых имеют такую же зависимость от длины волны, как и неизвестное вещество. Если это выполнимо, то распифровку неизвестного красящего вещества можно считать законченной. Коэффициент рассеяния красящего вещества, состоящего из нескольких компонент, является (как и коэффициент поглощения) суммой коэффициентов всех составляющих [140, 527]. Эта простая аддитивность коэффициентов делает метод Кубелки — Мунка применимым для составления рецептуры красочных слоев. Аддитивность коэффициентов была использована для решения примера 8 с помощью табл. 3.4. Это настолько важно, что мы запишем соотношения подробно:

$$\begin{aligned} K &= (cK_1)_p + (cK_1)_q + (cK_1)_r + \dots, \\ S &= (cS_1)_p + (cS_1)_q + (cS_1)_r + \dots \end{aligned} \quad (3.34)$$

Таким образом технолог попытается найти известные красители, чтобы взвешенные суммы коэффициентов поглощения и рассеяния для любой длины волны равнялись соответствующим коэффициентам неизвестного красителя. Эту процедуру необходимо использо-

вать, если определяется непрозрачность или кроющая способность слоя или если коэффициент рассеяния смеси сильно меняется с изменением соотношений компонентов.

Если красочный слой совершенно непрозрачен и содержит известное постоянное количество светорассеивающего вещества, то задача значительно упрощается. В этом случае необходимо иметь дело лишь с отношением коэффициентов поглощения и рассеяния K/S . Этому условию удовлетворяют текстильные материалы, окрашенные разными красителями, которые достаточно хорошо могут быть представлены красками, состоящими из белил и добавочных подцветок (тонеров), коэффициенты рассеяния которых настолько малы, что ими можно пренебречь по сравнению с коэффициентом рассеяния белой краски. Из уравнения (3.10) видно, что функция $(1 - R_\infty)^2/2R_\infty$ определяется в основном количеством красителя или добавленного нерассеивающего пигмента. Оптическая характеристика красителя или пигмента находится вычерчиванием графика $\lg(1 - R_\infty)^2/2R_\infty$ как функции длины волны λ [2, 616]. Для определения красящих веществ неизвестного образца технолог использует способы, основанные на других методах физического (например, на определении коэффициентов преломления) и химического анализов. Но наиболее удобным способом является спектрофотометрический.

Читателю, заинтересованному анализом прозрачных сред, снова рекомендуем книгу Стирнса [616], в которой дано исчерпывающее описание методов анализа мутных сред. Другие полезные статьи, касающиеся проблем расшифровки красящих веществ, опубликованы де Бернардо и Резником [429], Дунканом [142], Джонстоном [306, 308], а также Зальцманом и Ки [565].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРАСОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Вероятно, колориметрической проблемой № 1 в промышленности является проблема нахождения соотношений трех или более компонент, требуемых для воспроизведения цвета образца, заданного потребителем. 35 лет назад состоялся симпозиум по проблемам цвета, в котором участвовало около 150 специалистов в области красок, пигментов и красителей (как изготовителей, так и технологов), инженеров по освещению и специалистов по пластмассам. Четыре известных в своих странах докладчика два часа занимали аудиторию вопросами, касающимися спектрофотометрии: системы МКО, эталонов цвета, влияния освещения на цвет объектов, фотоэлектрической колориметрии и т. д. Аудиторию несколько утомили эти проблемы, и когда в конце симпозиума председатель перешел к вопросам, их было задано немного (скорее из вежливости), и дискуссия практически прекратилась. Предсе-

датель действительно обратил внимание аудитории на присутствие в зале экспертов, которые могли разъяснить все то, что она хотела бы знать о цвете. Тогда один специалист по краскам встал и сказал: «Что я хочу, так это фотоэлектрический колориметр, который может определить соотношение пигментов, необходимых для воспроизведения цвета образца». Как по волшебству сонливость аудитории исчезла, и последующая дискуссия стала интересной и целенаправленной.

Нет простого решения этой проблемы. Этому препятствует сложное взаимодействие красочного слоя с лучистой энергией, в результате которого проявляется его цвет. Существует несколько различных по сложности теорий для описания светорассеивающих свойств красочных слоев. Среди них, может быть наиболее простой, является теория Кубелки — Мунка, рассмотренная выше. Однако она вовсе не простая и применима не во всех случаях, встречающихся на практике. Интегрирование дифференциальных уравнений (3.7) и (3.8), заложенных в основу теории Кубелки — Мунка, показывает, что решения достаточно сложны (табл. 3.4) и ограничения по применимости этих уравнений довольно жестки. Намного легче ответить на вопрос: как получить заданный цвет с помощью тех или иных смесей излучений нежелательным смешением пигментов? Цветное телевидение дает решения такой задачи со скоростью более миллиона в секунду. Если координаты желаемого цвета X, Y, Z известны, то требуемое решение дается простой линейной трансформацией пропорций аддитивного смешения красного, зеленого и синего первичных излучений телевизионного приемника. За исключением способов автотипной печати [217, 218, 642, 738], все отрасли промышленности, связанные с красочными слоями, в поисках решения аналогичных задач продвигаются черепашьями шагами. Однако в последние годы для определения цветовых смесей, соответствующих заданным цветам, были использованы цифровые вычислительные машины, ускоряющие процесс составления рецептуры. Об этом более подробно речь пойдет ниже.

Выше упоминалось, что существуют два основных способа определения соотношений красящих веществ, необходимых для воспроизведения цвета заданного образца. Один из них, часто используемый и относящийся к чисто эмпирическому методу проб и ошибок, дает в той или иной степени метамерное решение задачи. Другой, вероятно, реже используемый способ основан на вышерассмотренной расшифровке красящих веществ. Между этими двумя способами существует ряд промежуточных; некоторые из них настолько отработаны, что оказались эффективными при применении цифровых вычислительных машин. Прогресс в развитии способов составления рецептур с помощью цифровых вычислительных машин отражен в обзорных статьях Брокса [65] и Галла [172].

Метод проб и ошибок. При выборе основных компонент красящих веществ учитывается их стоимость, наличие и стабильность. Если речь идет о слое малярных или печатных красок, то делают небольшую пробу, записывая весовые соотношения составных частей. Затем постепенно колорист добавляет ту составляющую, которой, на его взгляд, недостает в смеси для воспроизведения цвета. Если достигнуто достаточно хорошее приближение к цвету заданного образца, то сумма весов в записи для каждой составляющей даст искомую формулу краски. Затем по найденному рецепту готовят большое количество смеси, и если, как это обычно имеет место, процесс выполнен не совсем точно, то полученная смесь не будет точно такого же цвета, как заданный образец. Не желая добавлять значительных количеств основных компонент (чтобы не увеличивать веса заказанного количества краски), колорист корректирует цвет добавлением малых доз красящих веществ, обладающих высокой красящей способностью. Такие красящие вещества называют тонерами, а саму операцию — поддвечиванием. Это — прямой метод, и в руках опытного колориста он часто является самым дешевым, если процедура не занимает слишком много времени. Неопытный колорист иногда составляет смеси из 7 или 8 компонент вместо 4—5. Самый большой недостаток этого метода состоит в том, что не сохраняются записи о пробных смесях, составляемых в процессе достижения конечного цветового соответствия. Колорист видит цвет, но не измеряет его. Эта информация накапливается (если она вообще накапливается) лишь в памяти колориста и является частью того опыта, благодаря которому он постепенно приобретает профессиональные навыки в более точной оценке требуемого компонента.

Определение рецептуры красителей для бумаги и текстиля, а также рецептуры пигментов для пластмасс и керамики аналогично вышеописанному. Каждая среда выдвигает свои собственные специфические проблемы предварительного испытания по малым пробам.

Использование системы МКО. Четкий ответ на замечание о несовершенстве процедуры записи необходимо искать в предварительной разработке системы смешения красящих веществ. Если необходимо составить рецептуры цветов для множества образцов с использованием определенного набора ограниченного количества красящих веществ, то такое исследование может быть оправданным. Метод состоит в создании цветовой гаммы системы путем изготовления образцов при систематических вариациях соотношений компонент. Такие образцы могут служить средством сравнения, помогая колористу в составлении рецептуры так, чтобы уже первая проба была почти правильной; однако нестойкость этих образцов препятствует их использованию в течение длительного времени. Для получения устойчивой во времени информации каж-

дый образец подвергается фотометрическим измерениям и для него определяются координаты цвета (X, Y, Z) МКО и цветности (x, y) МКО. Графическое отображение этих данных представляет собой номограмму, по которой можно определить соотношение компонент, которое необходимо для воспроизведения цвета, заданного цветовыми координатами МКО. Тогда, если заказчик приносит образец желаемого цвета, его также измеряют и определяют для него цветовые координаты, а затем и требуемые соотношения компонент.

Этот метод был применен к стеклам, таким, как стекла Ловибонда (рис. 2.37). Он был применен также к бумагам [156, 157] и к краскам [118, 141].

Объем работ по построению таких номограмм в координатах (X, Y, Z), (x, y, Y) или их трансформации может быть весьма значительным, и прежде чем приступить к такой работе, нужно оценить потенциальные выгоды, которые можно из этого извлечь. Любое изменение набора выбранных красящих веществ повлечет за собой изменение номограммы. Иные комбинации красящих веществ, которые, например, могли бы быть желательны для уменьшения степени метамерности между образцом и его дубликатом, с помощью первоначальной номограммы изучить нельзя.

Если многокомпонентные смеси подчиняются простому закону аддитивности в отношении коэффициентов рассеяния и поглощения в соответствии с уравнением (3.34), то номограмму можно рассчитать по значениям K и S для компонент, не изготавливая смеси вообще [141]. Величину R_∞ можно найти как функцию длины волны для каждой смеси с помощью (3.11) или табл. Г Приложения. Однако это снова приводит нас к использованию метода Кубелки — Мунка при составлении цветowych смесей для практически важных светорассеивающих материалов.

Цифровые вычислительные машины довольно успешно вытесняют графические методы составления рецептур, однако сочетание номограмм с вычислительными машинами иногда может оказаться полезным [36].

Применение метода Кубелки — Мунка. Рассмотренная выше теория Кубелки — Мунка чаще всего используется для прогнозирования цветового соответствия. В литературе описано множество случаев, подтверждающих ценность теории Кубелки — Мунка. В более ранних исследованиях 1937 г. Стиль [619] показал, что теория дает хорошие результаты при расчетах добавлений наполнителя в бумагу; Гаррисон [223] показал применимость теории при окраске бумаги; Нолан [510] показал, что теория может быть распространена на прогнозирование цвета бумажных листов, окрашенных смесью красящих веществ. В том же году Джадд [322] применил эту теорию для эмалей на металле и для стоматологических силикатных цементов. Саундерсону [575] удалось предска-

зать цвет пигментированных непрозрачных пластмасс. В 1944 г. Парк и Стирнс [521] установили применимость этой теории для расчета окраски текстиля и бумаги, а в 1949 г. Дункан [141] успешно использовал ее для получения красочных пленок. Ванденаккер [667] в 1949 г. и позже Стениус [620] обнаружили пригодность теории Кубелки — Мунка при изучении диффузного отражения света от бумаги.

Эти ранние исследования явно показали практическую применимость вышеупомянутой теории. К приобретаемой бумаге предъявляют вполне определенные требования, касающиеся ее отражающей способности и непрозрачности. Бумага должна быть достаточно светлой; если это не так, то черный шрифт на такой бумаге оказывается плохо читаемым. Бумага должна быть довольно непрозрачной, если это не так, то отпечаток на обороте или на расположенном ниже листе будет виден насквозь, мешая чтению текста на лицевой стороне. При приобретении красок, близких к белым, к ним также предъявляют определенные требования, касающиеся отражающей и кроющей способностей. Они должны обладать определенной максимальной отражающей способностью, иначе они не будут соответствовать назначению белых красок; кроме того, они должны обладать высокой кроющей способностью, иначе потребуется покрывать основу слишком толстыми слоями краски, чтобы скрыть нежелательный цвет этой окрашиваемой основы. Поставщики красок и бумаги, используя графические решения формулы Кубелки — Мунка, такие, как показаны на рис. 3.12, могут непосредственно определить, что нужно делать, чтобы наиболее экономично корректировать рецептуры для удовлетворения предъявляемым требованиям. Если требования, предъявляемые к рецептуре по отражающей способности, выполнены и смесь экономична, но при этом требования к непрозрачности удовлетворены неполностью, то изготовитель бумаги по данным рис. 3.12 может определить, следует ли добавить в смесь дешевый черный краситель или необходимо добавить некоторое количество относительно дорогого пигмента двуокиси титана.

Подобные экономические соображения применимы и к краскам. Так же как и для бумаги, значительно дешевле достичь желаемой непрозрачности или кроющей способности добавлением сильно светопоглощающего вещества (например, сажи), нежели добавлением белого вещества с высокой кроющей способностью. Приобретая краски, близкие к белым, потребитель фактически платит за коэффициент рассеяния S . Предположим, две конкурирующие краски имеют различные значения R_∞ , которые чуть выше требуемого. При незначительных затратах R_∞ каждой краски может быть доведено до требуемого значения добавлением черного пигмента. В результате добавления черного пигмента уменьшится значение R_0 и увеличится коэффициент контраста $R/R_{0,89}$ в соот-

ветствии с линиями постоянных значений SX на рис. 3.12. Если другие свойства (устойчивость, постоянство, время сушки и др.) одинаковы, то относительная ценность двух красок для потребителя обратно пропорциональна толщине сырого слоя, требуемого для получения заданной кроющей способности; это означает, что если одна из красок обеспечивает заданную кроющую способность при двойной толщине сырого слоя, то потребитель должен купить ее в 2 раза больше для выполнения своей работы. Отметим, что на рис. 3.12 обе краски после коррекции добавлением черного пигмента располагаются на одной линии постоянных значений R_∞ . Толщина слоя, необходимая для достижения заданного значения кроющей способности (а, следовательно, коэффициента контраста), определяется исключительно рассеивающей способностью SX . Если величина S у одной краски меньше, чем у другой, то для достижения заданной кроющей способности потребуется соответственно большая толщина X . Таким образом, коэффициент рассеяния S непосредственно определяет ту площадь, которая может быть окрашена одним галлоном ($\sim 3,8$ л) данной краски, т. е. коэффициент рассеяния прямо пропорционален оправданной стоимости краски. Лучшей из приобретенных красок будет та, для которой отношение коэффициента рассеяния к стоимости галлона краски максимально.

Все эти исследования выполнены более 25 лет тому назад и, вероятно, стимулировали промышленность к более интенсивному применению теории Кубелки — Мунка и к ее дальнейшему развитию применительно к широкому ассортименту материалов и красящих веществ. Современная литература об использовании теории Кубелки — Мунка и ее производных обширна и непрерывно увеличивается. Для читателя, желающего изучить этот предмет более глубоко, рекомендуем следующий список литературы: [9, 11, 12, 15, 36, 41, 46, 49, 65, 75, 123, 121, 122, 131, 142, 154, 172, 173, 203, 257, 308, 391, 558, 571, 582, 607, 616, 640, 658].

Типичная процедура прогнозирования соответствия цвета смеси красок заданному цвету при использовании теории Кубелки — Мунка состоит в следующем [172]:

1. Сбор основных входных данных

1.1. Изготовление стандартных образцов с заданными компонентами при заданных концентрациях.

1.2. Определение спектрального отражения стандартных образцов с помощью спектрофотометра.

1.3. Расчет основных оптических характеристик стандартных образцов.

1.4. Хранение основных оптических характеристик в вычислительной машине.

2. Расчет рецептуры

2.1. Определение спектрального отражения и координат цвета образца-оригинала, цвет которого требуется воспроизвести.

2.2. Введение показателей образца-оригинала в вычислительную машину.

2.3. Вывод основных оптических данных подходящего набора стандартных образцов для определения требуемых компонент.

2.4. Расчет рецептуры, т. е. необходимых концентраций компонент смеси.

3. Контроль прогнозируемого цветового соответствия

3.1. Изготовление дубликата образца на основе рассчитанной рецептуры.

3.2. Определение координат цвета дубликата-образца и цветовых различий.

3.3. Определение допуска цветовых различий между дубликатом и оригиналом.

4. Корректировка рецептуры (если она требуется)

4.1. Умножение отклонения между координатами цвета дубликата и оригинала на корректирующую матрицу для получения соответствующих отклонений в концентрациях компонент.

4.2. Добавление рассчитанных отклонений концентраций к первоначальной рецептуре для получения скорректированной рецептуры.

4.3. Повторение операций, начиная с 3.1.

Рассмотрим более детально некоторые операции вышеприведенной процедуры.

Успех любого прогнозирования цветового соответствия зависит в значительной степени от качества выполнения первой операции, т. е. от качества подготовки и калибровки компонент. Стандартные образцы должны быть подготовлены точно таким же образом, как и последующие смеси красящих веществ, используемых для достижения цвета оригинала. В частности, очень важно, чтобы субстрат (основа) был тем же самым. Оптические показатели стандартного образца фактически всегда зависят от оптических показателей субстрата, на который наносятся красящие вещества. В некоторых случаях может иметь значение даже происхождение типа субстрата. Например, оптические показатели ряда красителей, нанесенных на некоторые типы материи из акрилата, не могут быть использованы для расчета рецептуры смеси для окраски волокон акрилата другого происхождения; степень цветового соответствия будет неудовлетворительной [172].

К калибровке образца-оригинала, т. е. образца, заданного потребителем для получения соответствующего по цвету дубликата, следует относиться внимательно. Необходим высококачественный спектрофотометр; измерения спектрального отражения оригинала должны проводиться с такой же высокой точностью, как и измерения стандартных образцов красящих веществ.

Для расчета начальной рецептуры (операция 2.4) из системы уравнений (3.10) и (3.34) получаем

$$\frac{(1-R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{K}{S} = \frac{(cK_1)_p + (cK_1)_q + (cK_1)_r}{(cS_1)_p + (cS_1)_q + (cS_1)_r} \dots \quad (3.35)$$

Это уравнение предусматривает, конечно, не только простую аддитивность коэффициентов рассеяния и поглощения, но также их увеличение прямо пропорционально концентрации компонент красящего вещества.

Если белый пигмент подкрашен небольшими пропорциями цветного пигмента, недостаточными для заметного изменения коэффициента рассеяния, или если используются малые количества красителей (c_p , c_q , c_r . . .) для окраски текстиля или бумаги, то эти величины с достаточной точностью могут быть определены по (3.35).

Коэффициенты рассеяния можно произвольно выбрать равными 1 [141], тогда если коэффициенты поглощения $(K_1)_p$, $(K_1)_q$, $(K_1)_r$. . . определены относительно коэффициентов рассеяния $(S_1)_p$, $(S_1)_q$, $(S_1)_r$. . ., то знаменатель выражения (3.35) станет равным 1, поскольку пропорции C_p , C_q и C_r . . . дают в сумме 1. Этот анализ относительно прост; он приводит к решению системы уравнений для определения пропорций c_p , c_q , c_r

К сожалению, простой закон аддитивности и пропорциональности, положенный в основу уравнения (3.35), в большинстве других случаев несправедлив. Отношение K/S , рассчитанное по величине R_∞ для заданной длины волны, обычно зависит от концентрации c красящего вещества (рис. 3.17). Таким образом, необходимо расширить основные оптические данные, включив для каждого из компонент красящего вещества оптические характеристики для ряда концентраций.

Другие трудности применения теории Кубелки — Мунка для прогнозирования цветового соответствия вызваны потерями при отражении на границе раздела воздух — красочный слой, которые не учитываются основной теорией. В некоторых случаях, например для слабопигментированных толстых слоев, имеющих приблизительно ровную верхнюю границу, следует также учитывать внутреннее отражение (рис. 3.9 и 3.10), так как фактическое отражение от образца, измеренное в воздухе R' , значительно отличается от значения R , используемого в формулах Кубелки — Мунка. Величина отражения R соответствует измерениям при погружении образца в жидкость с равным показателем преломления [143, 575].

Саундерсон [575] вывел связь между R и R' в простом виде:

$$R' = \frac{\rho + (1-\rho)(1-\rho_1)R}{1-\rho_1R}, \quad (3.36)$$

где ρ_i — внутреннее отражение для более или менее диффузного потока, падающего на нижнюю сторону верхнего слоя. Заметьте сходство с уравнением (3.29). Если поток, падающий на нижнюю сторону верхнего слоя, идеально диффузный, а верхний слой — оптически плоский, то величина ρ_i может быть найдена по коэффициенту преломления n_2 слоя на рис. 3.5 в предположении, что n_1 воздуха равняется 1,00. Результаты измерения величины ρ_i , проведенного для литых пластмасс косвенным путем, показывают,

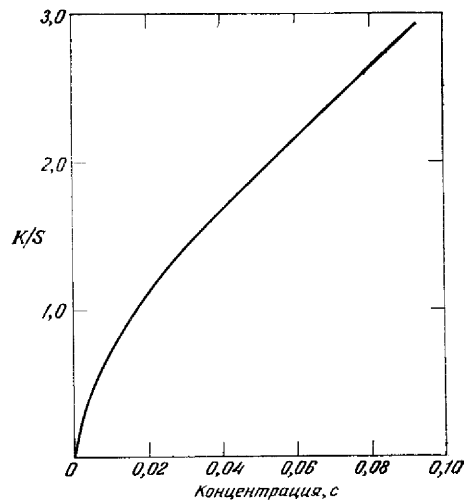


Рис. 3.17. Отношение K/S как функция концентрации красящего вещества c . В этом примере показано значительное отклонение от линейности.

что эта величина, примерно равная 0,4, несколько меньше значения, соответствующего диффузному потоку, падающему на нижнюю сторону верхней ровной границы. Эти расхождения Саундерсон приписывает отклонению по литой поверхности от оптически плоской и некоторому преобладанию потока в направлении нормали к поверхности. Однако в 1960 г. Брокс [64] показал, что теоретические и экспериментальные данные согласуются гораздо лучше, чем это нашел Саундерсон; в самом деле, остаточные расхождения достаточно малы, чтобы их можно было считать погрешностями эксперимента. В 1960 г. Брокс [64] расширил исследования, рассмотрев другие случаи, в том числе изменяя условия освещения и наблюдения. Он снова показал, что данные теории и эксперименты хорошо совпадают.

Учет поверхностного и внутреннего отражения обычно приводит к улучшению пропорциональной зависимости между K/S и концентрацией c , однако некоторые противоречия такого типа часто остаются. При смешении пигментов обычно вводится кор-

рекция поверхностного и внутреннего отражения, в то время как для смеси красителей текстиля подобная коррекция часто бывает мало ощутима, а поэтому не применяется. В последнем случае концентрация красящего вещества выражается в концентрации красильной ванны, а не в значениях концентрации красящего вещества внутри или на поверхности волокон [172]. Волокна никогда не поглощают краситель из красильной ванны строго пропорционально его концентрации в этой ванне. Таким образом, никогда не существует линейной зависимости между поглощением и концентрацией, и коррекция поверхностного внутреннего отражения не исправляет это положение. Вместо этого найден более эффективный метод введения базовых оптических данных, перекрывающих целый ряд значений концентраций для каждого компонента смешанного красителя.

Программы вычислительных машин, составленные для выполнения процедуры прогнозирования цветового соответствия на базе заданного набора входных оптических данных, могут быть несколько усложнены, если желательна их универсальность. Ранее наблюдалась четкая тенденция к приспособлению малых и средних цифровых вычислительных машин для целей прогнозирования цвета, причем часто отдавалось предпочтение применению так называемых специализированных вычислительных машин. Эти машины и сейчас находят применение, будучи непосредственно соединенными с автоматическими спектрофотометрами или фотоэлектрическими колориметрами. Однако в последние годы появилась тенденция к использованию универсальных вычислительных машин, которые обычно представляют собой большие быстродействующие машины с большим объемом памяти. Универсальная вычислительная машина может эксплуатироваться как в самой организации, так и в коммерческом вычислительном центре через телетайпную связь. Аренда такой машины обычно означает, что нужно платить за фактически затраченное машинное время, например, на основе ежемесячных расчетов. Галл [172] оценил, что стоимость расчета одной рецептуры сравнима с половиной почасовой оплаты лаборанта. Полные программы для таких машин можно приобрести на различных фирмах, занимающихся программным обеспечением.

Допустим, что для предполагаемых задач мы уже определили полный набор входных оптических данных для исходных компонент. Предположим далее, что приобретена и программа, которая одновременно с основными оптическими данными введена в память универсальной вычислительной машины. Связь с машиной установлена по телетайпу. Как только определены спектры отражения и координаты цвета оригинала-образца, подлежащего воспроизведению, мы устанавливаем связь с машиной и выполняем вышеприведенную процедуру, начиная с операции 2.2.

Базовые оптические данные могут содержать калибровочные данные до 12 различных компонент смещения, поэтому необходимо сообщить машине, какие комбинации из 3—4 или более компонент следует использовать при расчете рецептуры. Желательно ограничить число комбинаций, чтобы уменьшить стоимость машинного времени. Некоторый опыт дает преимущества на этой стадии, предохраняя машину, например, от попыток воспроизведения синего цвета образца смещением трех близких желтых компонент. Если подходящее решение найдено и передано вычислительной машине, то время, необходимое для выдачи рецептуры, составляет несколько секунд. Затем начинается операция 3.

Теперь нужно изготовить смесь красящих веществ в соответствии с рассчитанной рецептурой и сверить цвет каждой такой смеси с цветом оригинала. Для этого обычно проводятся измерения спектра отражения и координат цвета изготовленной смеси и последующее их сравнение с ранее полученными данными оригинала.

Прежде всего ожидается соответствие координат цвета, а также соответствие или в крайнем случае небольшое различие спектральных кривых отражения смеси и заданного оригинала. В идеальном случае должно быть полное совпадение кривых при всех длинах волн, так как при различии кривых возможны недоразумения с метамерией цветов даже при совпадении цветовых координат. Конечно, такие пожелания, как правило, не выполняются. Координаты цвета не точно соответствуют координатам цвета оригинала, и по спектральной кривой отражения мы обнаружим различную степень метамерности. Существуют различные причины слабого, но неприемлемого несоответствия координат цвета: погрешности измерения, трудности изготовления образцов, оптические данные компонент недостаточно представлены и недостаточная точность теории смещения красящих веществ Кубелки — Мунка в отношении данной смеси. Причины, приводящие к метамерности, кроются в выборе компонент, которые в зависимости от случая могут или не могут быть идентичны тем компонентам, которые использовались в оригинале.

Из первого набора рассчитанных рецептур можно выбрать ту, которая обладает наименьшей степенью метамеризма. Такой выбор можно осуществить с помощью дополнительных расчетов по методу, предложенному МКО [102] (см. выше раздел о метамеризме). Однако с выбранной рецептурой необходима еще некоторая дополнительная работа, так как мы не можем мириться с различиями в координатах цвета смеси и оригинала. Чтобы улучшить цветовое соответствие, мы должны выполнить операцию 4, связанную с применением *корректирующей матрицы*.

Во многих случаях, в частности, когда требуемая коррекция мала, можно считать, что связь между различиями в координатах цвета ΔX , ΔY , ΔZ и предполагаемыми изменениями concentra-

ций Δc_p , Δc_q , Δc_r , . . . линейна, т. е.

$$\begin{aligned}\Delta X &= \frac{\partial X}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial X}{\partial c_q} \Delta c_q + \frac{\partial X}{\partial c_r} \Delta c_r + \dots, \\ \Delta Y &= \frac{\partial Y}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial Y}{\partial c_q} \Delta c_q + \frac{\partial Y}{\partial c_r} \Delta c_r + \dots, \\ \Delta Z &= \frac{\partial Z}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial Z}{\partial c_q} \Delta c_q + \frac{\partial Z}{\partial c_r} \Delta c_r + \dots.\end{aligned}\quad (3.37)$$

В уравнении (3.37) коэффициенты $\partial X/\partial c_p$, . . . , являются частными производными координат цвета X , Y , Z образца-оригинала по концентрациям c_p, \dots , компонент, использованных в рецептуре смеси. Эти коэффициенты иногда могут быть найдены с удовлетворительной точностью при расчете изменений X , Y , Z , вызванных малыми изменениями концентраций c_p , . . . (порядка 1%). Лучший, но несколько более сложный, метод заключается в том, что сначала нужно определить частные производные спектрального отражения $R(\lambda)$ смеси по концентрациям, т. е. определить $\partial R(\lambda)/\partial c_p$ и т. д., и затем преобразовать эти коэффициенты в те, которые использованы в (3.37), применив функцию цветового соответствия стандартного наблюдателя МКО для одного из стандартных источников МКО [11, 172, 203].

Для заданных значений ΔX , ΔY , ΔZ и коэффициентов $\partial X/\partial c_p$, . . . , требуемая коррекция Δc_p , Δc_q , Δc_r , . . . , может быть найдена решением уравнений (3.37) относительно этих величин. Отметим, что для получения однозначного решения этих уравнений мы можем иметь не более трех красящих веществ, охваченных этими уравнениями, и, кроме того, определитель, образованный коэффициентами, должен отличаться от 0. Во многих случаях эти условия выполняются автоматически. Если включено более трех красящих веществ, коррекция может быть выполнена только по трем краскам, оставляя без изменения концентрации остальных. Если определитель равен или близок к 0, то нельзя выполнить коррекцию этим методом. В этом случае нередко приходится заменять один или несколько компонентов другими красящими веществами и рассчитать совсем новую рецептуру.

Алгоритм решения системы уравнений (3.37), предполагающий однозначность решения относительно Δc_p , Δc_q , Δc_r , включает в себя обращение матрицы коэффициентов $(\partial X/\partial c_p, \dots)$ и перемножение значений ΔX , ΔY , ΔZ с обратной матрицей. Эта уже упомянутая выше обратная матрица названа *корректирующей*.

Скорректированная рецептура используется для изготовления нового образца, его калибруют и вновь сравнивают с оригиналом. На втором этапе расчета уже больше возможностей, что соответствие будет приемлемым и дальнейшей коррекции не потребуются.

Данное выше описание метода прогнозирования цветового соответствия, выполняемого на базе теории Кубелки — Мунка с по-

мощью цифровой вычислительной машины, следует считать в известной степени схематичным. Полная процедура может быть несколько более сложной, и часто программа для вычислительной машины содержит много тонкостей, которые колорист может успешно использовать. Примеры программ, предназначенных для прогнозирования цветового соответствия, даны Гуджерли [203] и Галлом [172].

Теория Кубелки — Мунка или некоторые ее варианты широко используются в промышленности для предопределения цветового соответствия. Цветовое соответствие для красок, пластмасс и текстиля выполняется с помощью вычислительных машин очень быстро и экономично, а предопределенная рецептура с одной или двумя коррекциями дает в большинстве случаев удовлетворительные результаты. Однако имеются специфические условия, когда этот метод нельзя использовать.

Бывает, когда смесь красящих веществ не ведет себя заранее известным способом; некоторые красящие вещества могут быть химически несовместимы или основа может оказаться неподходящей для применения данных красящих веществ.

Имеют место случаи, когда трудно повторно точно изготовить и (или) воспроизвести образцы. Спектрофотометрическую калибровку стандартных образцов тоже бывает трудно или невозможно выполнить. Примером могут служить гониохроматические образцы, такие, как металлизированные краски или металлизированные виниловые ткани [47, 241].

Кроме того, бывает, когда красящие вещества флюоресцируют или когда требуется получить цветовое соответствие для флюоресцирующих материалов. Эти случаи создают для колориста значительные трудности, и, кажется, до сих пор они полностью не разрешены [10].

Печатные краски также трудно поддаются предопределению цветового соответствия. Цветная пленка неоднородна, и оптические показатели основы (обычно бумаги) трудно описать в цифровом виде, так как она меняется от пачки к пачке. Тем не менее намечается прогресс и в этом направлении [14].

Использование других анализов. Одним из основных предположений, используемых в теории Кубелки — Мунка, является предположение о том, что светорассеивающие частицы по сравнению с элементарным слоем толщиной dX , рассматриваемым в уравнениях (3.7) и (3.8), относительно малы. Можно легко себе представить красочные слои, в которых это условие не соблюдается. Например, когда пигментные частицы так велики, что сами становятся непрозрачными, теория Кубелки — Мунка совсем не применима. В этом случае следует учитывать только отражение от верхнего слоя частиц, а R_∞ всего слоя можно рассчитать по законам смешения цветов с их усреднением. Так, например, R_∞ слоя,

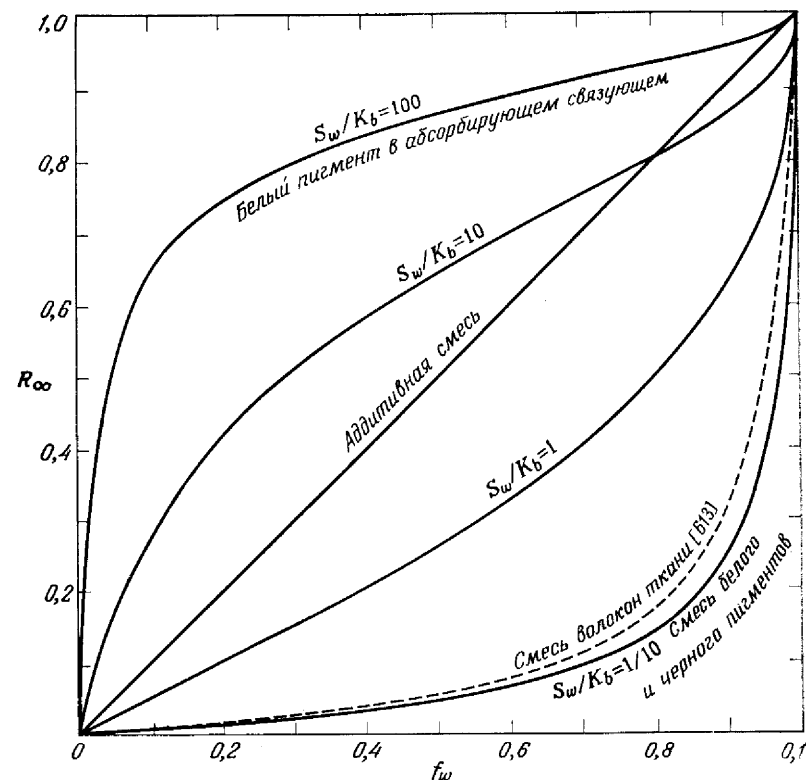


Рис. 3.18. Величина R_∞ как функция относительного содержания светопоглощающего белого красящего вещества.

Красящие вещества, подчиняющиеся анализу Кубелки — Мунка, показаны четырьмя кривыми, соответствующими различным отношениям коэффициента поглощения черного к коэффициенту рассеяния белого. Приведены также кривые соответствующие смешению усреднением и смешению черных и белых текстильных волокон по Стирнсу [613].

состоящего из бусинок белого и черного стекла, связано с пропорциями, указывающими на содержание черных и белых бусинок f_b и f_w , и соответствующими им значениями R_b и R_w

$$R_\infty = f_b R_b + f_w R_w,$$

где $f_b + f_w = 1$. Эта же формула относится также к черным точкам, отпечатанным на белой бумаге при автотипном печатном процессе. Для абсолютно черных частиц ($R_b = 0$) в сочетании с абсолютно белыми ($R_w = 1$) выражение упрощается:

$$R_\infty = f_w.$$

На рис. 3.18 показано, насколько отклоняются законы аддитивного смешения от смешения цветов по теории Кубелки — Мунка для систем с очень крупными пигментными частицами [141]. Прямая линия соответствует аддитивному смешению для системы

из идеально черных и идеально белых крупных частиц ($R_\infty = f_w$). Сплошные кривые соответствуют смесям с разными пропорциями идеально белых и идеально черных пигментов, рассчитанным в соответствии с теорией Кубелки — Мунка (3.9). Для идеально черного пигмента коэффициент рассеяния $S_b = 0$, а для идеально белого пигмента коэффициент поглощения $K_w = 0$. Черный пигмент определяет коэффициент поглощения смеси $f_b K_b$, а белый — коэффициент рассеяния смеси $f_w S_w$. Величина K/S смеси, следовательно, равна $f_b K_b / f_w S_w$; с учетом, что $f_b + f_w = 1$, $K/S = (1 - f_w) K_b / f_w S_w$. Значение R_∞ такой идеальной краски можно найти для всех значений K/S по таблице Г Приложения. Рис. 3.18 дает зависимость R_∞ от относительного содержания идеально белого пигмента f_w для четырех значений S_w/K_b . Верхняя кривая $S_w/K_b = 100$ с достаточно высокой точностью соответствует значениям R_∞ краски, состоящей из смеси льняного масла с белым пигментом, где K_b — коэффициент поглощения масла. Отметим, что введение нескольких процентов белого пигмента повышает R_∞ до значения, примерно равного 50%.

Нижняя кривая, $S_w/K_b = 0,1$ приблизительно соответствует смеси обычных черных и белых пигментов. Отметим, что в данном случае 50% белого пигмента повышает R_∞ менее чем на 5%, в то время как небольшая часть (1%) черного пигмента, смешанного с белым, снижает R_∞ со 100 до 95%. Принимая это во внимание, говорят, что красящая сила обычных черных пигментов выше, чем у обычных белых.

Для любого двухкомпонентного красочного слоя график зависимости R_∞ от f_w показывает, с какой надежностью можно применять теорию Кубелки — Мунка. Если кривая такого слоя почти совпадает с одной из семейства кривых, четыре из которых показаны на рис. 3.18 сплошными линиями, то применима теория Кубелки — Мунка и формулу для воспроизведения цвета смеси красок можно получить описанным выше способом.

График зависимости R_∞ от f_w , показанный на рис. 3.18, дает всю информацию, необходимую для прогнозирования цвета смесей, составленных из белого и цветного пигментов. Вместе с тем необходимо напомнить, что для любой смеси пигментов отношения, показанные на рис. 3.18, определяются для каждой длины волны в отдельности независимо от того, имеем ли мы дело с грубыми частицами, подчиняющимися законам аддитивного смешения, или тонкими частицами, следующими законам Кубелки — Мунка.

На рис. 3.18 представлена кривая, характеризующая еще один тип смешения красящих веществ. Поглощение красителей различными текстильными волокнами осложняется столь многими факторами, что когда ткань изготавливается из смеси волокон, то на практике сначала окрашивают большие партии волокон в цвет, близкий к желаемому, затем добиваются окончательного соот-

ветствия цвета смешением волокон в соответствующих пропорциях. Такие смешения подчиняются теории Кубелки — Мунка только в общем виде, несколько отклоняясь от стороны аддитивного смешения. В 1944 г. Стирнс [617] эмпирически разработал функцию для R_∞ , которая является аддитивной для смеси текстильных волокон так же, как функция $(1 - R_\infty)^2 / 2R_\infty$ является аддитивной для смеси, которая подчиняется теории Кубелки — Мунка в соответствии с уравнением (3.35) [521, 616, 617].

Теория Кубелки — Мунка иногда упоминается как теория двух потоков в мутных средах [48]. Как мы видели выше, теория учитывает световые потоки, проходящие через среду в прямом и обратном направлениях; таким образом, в каждой точке среды оценивают только две величины. Теория, основная идея которой фактически возвращает нас к работе Шустера 1905 г. [591], допускает, что падающий свет диффузный; допущение, которое нельзя считать приемлемым для всех практических случаев. Часто используется параллельный свет, который в мутной среде ведет себя по-иному. Для описания систем с такими условиями были развиты теории 3—4 потоков в мутных средах [29, 143, 461, 462, 601, 669].

Понятно, что теория четырех потоков более сложна, чем теория двух потоков Кубелки — Мунка, и главным образом из-за этого она не нашла широкого применения. В ней использованы два коэффициента поглощения, три коэффициента рассеяния и дополнительные коэффициенты, описывающие отражение на границах раздела.

На тенденцию к созданию более эффективных теорий мутных сред уже указывает применяемая терминология. Мы перешли от теории двух потоков к теориям 3—4 потоков, вместе с тем уже предлагаются теории шести и более потоков. Однако их детальное рассмотрение не входит в задачу данной книги.

Справедливо, что предположение, лежащее в основе теории двух потоков Кубелки — Мунка, никогда полностью не выполняется для реальных покрытий, окрасок, бумаг или пластмасс в условиях, как их видит потребитель. Однако, несмотря на споры вокруг этого вопроса, погрешности прогнозирования цветового соответствия, выполненного на базе теории Кубелки — Мунка, часто весьма незначительны. Нужно ли в этом случае создавать более точные модели? Нужно ли использовать простую модель в качестве первого шага и заканчивать методом проб и ошибок? Абсолютная истина, как правило, слишком сложна, что снижает ее практическую значимость. Если истина труднодоступна, весьма вероятно неудача в ее достижении. Каждое предприятие должно найти компромисс между простотой и точностью. В частности, следует отвергнуть систему, которая при высокой стоимости всегда находит рецептуру для желаемого цвета, хотя и со столь малыми погрешностями, что их невозможно измерить. «Слишком точный цвет может быть слишком дорогим, чтобы быть хорошим» [342].

Таблица А1

Некоторые важные энергетические фотометрические (радиометрические) понятия и единицы

Энергия излучения (лучистая энергия)	<p><i>Энергия излучения</i> представляет собой энергию, распространяющуюся (в свободном пространстве и некоторых материальных средах) в виде электромагнитных волн или потоков частиц (фотонов)</p>	<p>Спектральная плотность Функция (или кривая) спектрального распределения Функция (или кривая) $[S(\lambda)]$ относительного спектрального распределения</p>	<p>содержащим указанную точку, к площади ортогональной проекции этого элемента поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению</p>
Излучение	<p><i>Излучение</i> есть процесс испускания или передачи энергии излучения (при ее распространении). Однако часто излучением называют и саму энергию излучения</p>	<p><i>Спектральной плотностью</i> на данной длине волны некоторой энергетической (или фотометрической) величины, например энергии излучения, называют отношение количества этой величины для волн, сосредоточенных в бесконечно малом спектральном интервале вокруг данного значения, к ширине этого интервала. Изменение спектральной плотности с изменением длины волны носит название <i>функции спектрального распределения величины</i>. <i>Функция (или кривая) относительного спектрального распределения</i> есть изменение спектральной плотности с длиной волны (частотой), но измеренное в каких-либо произвольных единицах. Другими словами, эта функция (или кривая) определяет только относительные значения величины для различных длин волн (частот)</p>	
Поток излучения (P_e , P , Φ или F)	<p><i>Монохроматическое излучение</i> — это энергия излучения, характеризуемого одним значением частоты электромагнитного колебания. На практике этот термин употребляют в более широком смысле, используют для обозначения энергии излучения, частоты колебания которого заключены в столь узком интервале значений, что его можно достаточно точно описать одним единственным значением частоты или длины волны</p>	<p>Апертурный коэффициент отражения (β) (в точке поверхности для части отраженного света, содержащего внутри заданного конуса с вершиной в этой точке, и для падающего света заданного спектрального состава и заданного пространственного распределения)</p>	<p><i>Примечание 1.</i> Очень широко используются выражения «спектральное распределение энергии» и «относительное спектральное распределение энергии»</p>
Энергетическая светимость (в точке поверхности) (M_e или M)	<p><i>Спектр излучения</i> — <i>излучение</i>, представленное в виде совокупности составляющих его монохроматических излучений</p>	<p>Коэффициент яркости (β) (в точке поверхности в некотором направлении для заданных условий освещения)</p>	<p><i>Апертурный коэффициент отражения</i> предмета представляет собой отношение потока излучения, отраженного в направлениях, заключенных внутри определенного конуса с вершиной в данной точке объекта, к потоку излучения, отраженному в пределах того же конуса идеальным рассеивателем (см. ниже), и освещенным в точности так же</p>
Энергетическая освещенность; облученность в точке поверхности (E_e или E)	<p><i>Потоком излучения</i>, или средней мощностью излучения, называют энергию излучения, испускаемую или поглощаемую некоторой поверхностью, или переносимую через эту поверхность за единицу времени</p>	<p>Коэффициент отражения (ρ)</p>	<p><i>Коэффициент яркости</i> можно рассматривать как предельный случай апертурного коэффициента отражения, когда телесный угол конуса выбирается предельно малым (близким к нулю). В этих условиях коэффициент яркости есть частное от деления энергетической яркости объекта к энергетической яркости идеального рассеивателя (т. е. рассеивателя, коэффициент отражения которого равен 1 и который рассеивает падающую на него энергию излучения равномерно по всем направлениям)</p>
Энергетическая сила света (источника в некотором направлении) (J_e или I)	<p><i>Энергетическая светимость</i> в точке поверхности есть частное от деления потока излучения, испускаемого бесконечно малым элементом поверхности, который содержит данную точку, к площади этого элемента</p>	<p>Коэффициент пропускания (τ)</p>	<p><i>Коэффициент отражения</i> является другим предельным случаем понятия апертурного коэффициента отражения: телесный угол конуса, в котором измеряется отраженный поток излучения, берется равным 2π (полусфера). Коэффициент отражения есть частное от деления потока излучения, отраженного от объекта в пределах указанного конуса, к потоку излучения, падающему на объект</p>
Энергетическая яркость L_e	<p><i>Энергетическая освещенность</i> в точке поверхности представляет собой отношение потока излучения, падающего на бесконечно малый элемент поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого элемента</p>	<p>Коэффициент пропускания (τ)</p>	<p><i>Коэффициент пропускания</i> есть отношение прошедшего через объект потока излучения к падающему на него потоку</p>
Энергетическая яркость L_e	<p><i>Энергетическая сила света</i> (источника в данном направлении) есть частное от деления потока излучения, испускаемого точечным источником (или бесконечно малым элементом протяженной поверхности) в бесконечно малый телесный угол, содержащий указанное направление, к величине этого телесного угла</p>	<p>Коэффициент пропускания (τ)</p>	<p><i>Коэффициент пропускания</i> есть отношение прошедшего через объект потока излучения к падающему на него потоку</p>
Энергетическая яркость L_e	<p><i>Энергетическая яркость</i> в точке поверхности и в данном направлении есть отношение энергетической силы света, создаваемой в данном направлении бесконечно малым элементом поверхности,</p>	<p>Коэффициент пропускания (τ)</p>	<p><i>Коэффициент пропускания</i> есть отношение прошедшего через объект потока излучения к падающему на него потоку</p>

Энергетические фотометрические (радиометрические) понятия и определяющие их уравнения [736]

Термин	Символ	Определяющее уравнение	Пояснительные замечания и формулы (см. иллюстрация ниже)	Единица измерения
Энергия излучения				Дж
Поток (мощность измерения)	P_e		$d^2P_e = L_e \frac{dA_1 \cos \varepsilon_1 + dA_2 \cos \varepsilon_2}{r^2}$	Вт
Энергетическая светимость	M_e	$M_e = \frac{dP_e}{dA_1}$	= потоку от элемента dA_1 поверхности источника, падающему на элемент dA_2 поверхности приемника dA_1 — элемент поверхности источника	Вт·см ⁻²
Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	$E_e = \frac{dP_e}{dA_2}$	dA_2 — элемент поверхности приемника	»
Энергетическая сила света	I_e	$I_e = \frac{dP_e}{d\omega_1}$	$d\omega_1$ — элемент телесного угла с вершиной (1) на поверхности источника	Вт·ср ⁻¹
Энергетическая яркость	L_e	$L_e = \frac{d^2P_e}{dA_1 \cos \varepsilon_1 d\omega_1} = \frac{d^2E_e}{dA_2 \cos \varepsilon_2 d\omega_2} = \frac{d(E_e)n}{d\omega_2}$	ε_1 — угол между заданным направлением (1) — (2) и нормалью n_1 к dA_1 ε_2 — угол между заданным направлением (1) — (2) и нормалью n_2 к dA_2 $d\omega_2$ — элемент телесного угла с вершиной (2) на поверхности приемника $dA_1 \cos \varepsilon_1$ — ортогональная проекция dA_1 на плоскость, перпендикулярную данному направлению (1) — (2) $dA_2 \cos \varepsilon_2$ — ортогональная проекция dA_2 на плоскость, перпендикулярную данному направлению (1) — (2) $d(E_e)n = \frac{dL_e}{dA_2 \cos \varepsilon_2}$	Вт·см ⁻² ·ср ⁻¹

Телесный угол

$$\omega = \frac{S}{r^2}$$

ср

 S — участок поверхности сферы
 r — радиус сферы, а также расстояние между (1) на dA_1 и (2) на dA_2

$$d\omega_1 = \frac{dA_2 \cos \varepsilon_2}{r^2}$$

$$d\omega_2 = \frac{dA_1 \cos \varepsilon_1}{r^2}$$

Частота

с⁻¹

Длина волны

1/с

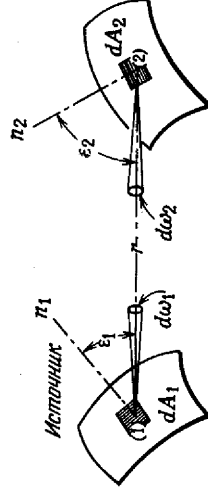
Волновое число

см

см⁻¹

Примечание.

Если энергетические или фотометрические (радиометрические) величины рассматриваются в малом спектральном интервале, их соответствующие символы помечаются индексами ν , λ или ν' . Например, $L_{e\lambda} = dL_e/d\lambda$, что означает, что имеется в виду спектральная энергетическая яркость, т. е. энергетическая яркость, взятая в интервале длин волн $d\lambda$ с центром на длине волны λ .



Приемник

$$S/r^2 = 1 = \text{един. стереоугла}$$

а

б

а — иллюстрация пояснительных замечаний;
б — единица измерения величины телесного угла, 1 ср.

Фотометрические величины

Свет

Функция относительной дневной световой эффективности $[V(\lambda)]$ (стандартного фотометрического наблюдателя для дневного зрения)

Функция относительной ночной световой эффективности $[V'(\lambda)]$ (фотометрического стандартного наблюдателя для ночного зрения)

Световой поток (F) люмен (лм)

Свет есть энергия излучений, способных вызывать зрительное ощущение у человека-наблюдателя

Функция относительной дневной световой эффективности представляет собой отношение потока излучения длины волны λ_m к потоку излучения другой длины волны λ , когда эти два потока создают одинаковые зрительные ощущения при определенных фотометрических условиях дневного освещения; λ_m выбирается так, чтобы максимальное значение отношения указанных потоков было равно 1. Если не оговорено обратное, для определения функции относительной дневной световой эффективности используют величины, характеризующие дневное зрение стандартного фотометрического наблюдателя, свойства которого определены МКО

Функция относительной ночной световой эффективности представляет собой отношение потока излучения длины волны λ_m к потоку излучения другой длины волны λ , когда эти два потока создают одинаковые зрительные ощущения при определенных фотометрических условиях, соответствующих ночному освещению; λ_m выбирается так, чтобы максимальное значение отношения указанных потоков было равно единице. Если не оговорено обратное, для определения функции относительной ночной световой эффективности используются величины, характеризующие ночное зрение стандартного фотометрического наблюдателя, свойства которого определены МКО

Световым потоком называют величину, определяющую ту часть потока излучения, которая действует на приемник, спектральная чувствительность которого выражается стандартной функцией относительной световой эффективности. Если не оговорено обратное, световой поток определяют для условий дневного зрения, выражая его через поток излучения следующей формулой, принятой МКО:

$$F = K_m \int_{\lambda} P_{\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Здесь $P_{\lambda} d\lambda$ есть поток излучения в интервале длин волн, равном $d\lambda$ и содержащем длину волны λ , а $V(\lambda)$ — функция относительной дневной световой эффективности. Множитель K_m определяет максимальную световую эффективность (или максимальное отношение светового потока к потоку излучения); он соответствует длине волны, для которой $V(\lambda) = 1$. Единицей светового потока является люмен, определяемый как световой поток, испускаемый точечным источником (или бесконечно малым элементом поверхности протяженного источника), создающим одинаковую по всем направлениям силу света, равную 1 кд внутри телесного угла, равного 1 ср

Световая эффективность (K) [$K(\lambda)$], (K_m)

Сила света (I) (источника в некотором направлении), кд

Яркость (B) или (L) (в точке поверхности и в некотором направлении)

Освещенность (E) (в точке поверхности)

Светимость (M) (в точке поверхности)

Коэффициент яркости (Y) (в точке поверхности неосвещаемого тела в некотором направлении для заданных условий освещения)

Коэффициент пропускания (T)

Световая эффективность энергии излучения есть отношение светового потока к соответствующему потоку излучения. Символ K обозначает световую эффективность любого потока излучения, которое может состоять из монохроматических излучений любых длин волн. Символ $K(\lambda)$ обозначает световую эффективность для монохроматического потока излучения с длиной волны λ . Символом K_m принято обозначать максимальную световую эффективность монохроматического потока излучения, которая достигается при длине волны $\lambda = \lambda_m$, соответствующей максимальному значению функции $V(\lambda) = 1$. K_m равна ~ 680 лм/Вт

Сила света в данном направлении есть отношение светового потока, испускаемого точечным источником (или бесконечно малым элементом протяженной поверхности) внутри бесконечно малого конуса, содержащего данное направление, к телесному углу, определяющему этот конус. Единица силы света называется кандела. Сила света, испускаемого при температуре затвердевания платины элементом dA см² поверхности эталона черного тела в направлении нормали к этому элементу, равна (по определению) 60 дА кд

Яркость в точке поверхности и в данном направлении есть отношение силы света в данном направлении, создаваемой бесконечно малым элементом поверхности, содержащим рассматриваемую точку, к ортогональной проекции площади этого элемента на плоскость, перпендикулярную данному направлению

Освещенность в точке поверхности есть отношение светового потока, падающего на бесконечно малый элемент поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого элемента

Светимость в точке поверхности есть отношение светового потока, испускаемого бесконечно малым элементом поверхности, содержащим рассматриваемую точку, к площади этого элемента

Коэффициент яркости объекта есть отношение его яркости к яркости совершенного отражающего рассеивателя, т. е. рассеивателя, коэффициент отражения которого равен 1 и который рассеивает падающую на него световую энергию равномерно по всем направлениям. Это фотометрическое понятие представляет собой аналог энергетического фотометрического (радиометрического) понятия *коэффициент яркости*

Коэффициент пропускания прозрачного объекта есть отношение проходящего через этот объект светового потока к потоку, падающему на объект

Фотометрические понятия и определяющие их уравнения [736]

Термин	Символ	Определяющее уравнение	Поясительные замечания	Единицы измерения
Световой поток	F	$F = KP_e$ ($F = K_m \int_{\lambda} P_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda$)	P_e — поток излучения (Вт) K — световая эффективность (лм/Вт)	лм
Сила света	I	$I = \frac{dF}{d\omega_1}$	$d\omega_1$ — элемент телесного угла с вершиной (1) на поверхности источника	кд (лм·ср ⁻¹)
Яркость	L	$L = \frac{d^2F}{dA_1 \cos \varepsilon_1 d\omega_1} =$ $= \frac{dI}{dA_1 \cos \varepsilon_1} =$ $= \frac{d^2E}{dA_2 \cos \varepsilon_2 d\omega_2} =$ $= \frac{dl_n}{d\omega_2}$	dA_1 — элемент поверхности источника ε_1 — угол между данным направлением (1) — (2) и нормалью n_1 к dA_1 $dA_1 \cos \varepsilon_1$ — ортогональная проекция dA_1 на плоскость, перпендикулярную данному направлению (1) — (2) dE_n — освещенность на элементарной площадке, являющейся проекцией на плоскость, перпендикулярную направлению (1) — (2) $d\omega_2$ — элемент телесного угла с вершиной (2) на поверхности приемника	кд·м ⁻² (лм·м ⁻² ·ср ⁻¹)
Освещенность	E	$E = \frac{dF}{dA_2}$	dA_2 — элемент поверхности приемника	лм·м ⁻²
Светимость	M	$M = \frac{dF}{dA_1}$		»
Функция световой эффективности	$K(\lambda)$	$K(\lambda) = K_m V(\lambda)$	$V(\lambda)$ — функция относительной дневной световой эффективности (стандартного фотометрического наблюдателя для дневного зрения) K_m — максимальная световая эффективность, равная ~ 680 лм/Вт при длине волны $\lambda = 555$ нм, на которой $V(\lambda) = 1$	лм/Вт

Примечания

Если фотометрические величины рассматриваются в малых спектральных интервалах, соответствующие им символы помечаются индексом λ или ν : например, $I_{\lambda} = dI_{\lambda}/d\Omega$ есть световая яркость (т. е. яркость излучения, отнесенная к единичному интервалу длины волны) на длине волны λ . Геометрические величины, упомянутые в этой таблице, проиллюстрированы рисунками к табл. А2, в которой перечислены энергетические и фотометрические (радиомерческие) величины и определяющие их уравнения. Для выражения яркости и освещенности в других, часто используемых единицах измерения, метрических и неметрических, отличающихся от указанных в настоящей таблице, следует обратиться к табл. А5, посвященной переводным коэффициентам.

Переводные

1. Переводные коэффициенты для

	Люкс	Фот	Миллифот
1 люкс =	1	10^{-4}	10^{-1}
1 фот =	10^4	1	10^3
1 миллифот =	10	10^{-3}	1
1 фут — кандела =	$1,076 \cdot 10$	$1,076 \cdot 10^{-3}$	1,076

2. Переводные коэффициенты для

	Нит	Стильб	Апостильб	Ламберт	Миллиламберт
1 Нит =	1	10^{-4}	3,142	$3,142 \cdot 10^{-4}$	$3,142 \cdot 10^{-1}$
1 Стильб =	10^4	1	$3,142 \cdot 10^4$	3,142	$3,142 \cdot 10^3$
1 Апостильб =	$3,183 \cdot 10^{-1}$	$3,183 \cdot 10^{-5}$	1	10^{-4}	10^{-1}
1 Ламберт =	$3,183 \cdot 10^3$	$3,183 \cdot 10^{-1}$	10^4	1	10^3
1 Миллиламберт =	3,183	$3,183 \cdot 10^{-4}$	10	10^{-3}	1
1 Фут-ламберт =	3,426	$3,426 \cdot 10^{-4}$	1,076 · 10	$1,076 \cdot 10^{-3}$	1,076
1 Кандела на кв. фут =	$1,076 \cdot 10$	$1,076 \cdot 10^{-3}$	3,382 · 10	$3,382 \cdot 10^{-3}$	3,382
1 Кандела на кв. дюйм =	$1,550 \cdot 10^3$	$1,550 \cdot 10^{-1}$	$4,869 \cdot 10^3$	$4,869 \cdot 10^{-1}$	$4,869 \cdot 10^2$

Другие (так называемые эквивалентные) единицы измерения яркости:

1 «эквивалентный» фот = 1 ламберту = $(1/\pi)$ кд/см²

1 «эквивалентный» люкс (люкс на белом) = 1 блонделю = 1 апостильбу = $(1/\pi)$ кд/м²

1 «эквивалентная» фут-свеча = 1 фут-ламберту = $(1/\pi)$ кд/фут²

Таблица А5

коэффициенты
единиц измерения освещенности

Фут-свеча	Люмен (на единицу площади поверхности)	Обозначение
$9,290 \cdot 10^{-2}$		лк
$9,290 \cdot 10^2$	= 1 лм/см ²	ф
$9,290 \cdot 10^{-1}$	= 10^{-3} лм/см ²	мф
1	= 1 лм/фут ²	фут — кд

единиц измерения яркости

Фут-ламберт	Кандела, кв. фут	Кандела, кв. дюйм	Кандела на единицу площади поверхности	Обозначение
$2,919 \cdot 10^{-1}$	$9,290 \cdot 10^{-2}$	$6,452 \cdot 10^{-4}$	= 1 кд/м ²	нт
$2,919 \cdot 10^3$	$9,290 \cdot 10^2$	6,452	= 1 кд/см ²	сб
$9,290 \cdot 10^{-2}$	$2,957 \cdot 10^{-2}$	$2,054 \cdot 10^{-4}$	= $(1/\pi)$ кд/м ²	асб
$9,290 \cdot 10^2$	$2,957 \cdot 10^2$	2,054	= $(1/\pi)$ кд/см ²	Л
$9,290 \cdot 10^{-1}$	$2,957 \cdot 10^{-1}$	$2,054 \cdot 10^{-3}$	= $10^{-3} (1/\pi)$ кд/см ²	мЛ
1	$3,183 \cdot 10^{-1}$	$2,210 \cdot 10^{-3}$	= $(1/\pi)$ кд/фут ²	фЛ
3,442	1	$6,944 \cdot 10^{-3}$	= 1 кд/фут ²	кд · фут ⁻²
$4,524 \cdot 10^2$	$1,44 \cdot 10^2$	1	= 1 кд/дюйм ²	кд · дюйм ⁻²

Примечание. Чтобы значение величины, указанное в одной из единиц, приведенных в крайней левой колонке таблицы, выразить в какой-либо из единиц, перечисленных в верхнем ряду ниже заголовка таблицы, следует умножить имеющееся значение на число, которое находится на пересечении ряда, начинающегося с исходной единицы, и колонки, начинающейся с требуемой единицы. Например, X фут — ламбертов = $X \cdot 3,426 \cdot 10^{-4}$ стильбов.

Приведения кривых сложения МКО 1931 г. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ на относительные спектральные распределения стандартных излучений МКО А, В, С¹⁾

Длина волны, λ (нм)	Стандартное излучение А			Стандартное излучение В			Стандартное излучение С		
	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$
380	0.001	0.000	0.006	0.003	0.000	0.014	0.004	0.000	0.020
90	0.005	0.000	0.023	0.013	0.000	0.060	0.019	0.000	0.089
400	0.019	0.001	0.093	0.056	0.002	0.268	0.085	0.002	0.404
10	0.071	0.002	0.340	0.217	0.006	1.033	0.329	0.009	1.570
20	0.262	0.008	1.256	0.812	0.024	3.899	1.238	0.037	5.949
30	0.649	0.027	3.167	1.983	0.081	9.678	2.997	0.122	14.628
40	0.926	0.061	4.647	2.689	0.178	13.489	3.975	0.262	19.938
450	1.031	0.117	5.435	2.744	0.310	14.462	3.915	0.443	20.638
60	1.019	0.210	5.851	2.454	0.506	14.085	3.362	0.694	19.299
70	0.776	0.362	5.116	1.718	0.800	11.319	2.272	1.058	14.972
80	0.428	0.622	3.636	0.870	1.265	7.396	1.112	1.618	9.461
90	0.160	1.039	2.324	0.295	1.918	4.290	0.363	2.358	5.274
500	0.027	1.792	1.509	0.044	2.908	2.449	0.052	3.401	2.864
10	0.057	3.080	0.969	0.081	4.360	1.371	0.089	4.833	1.520
20	0.425	4.771	0.525	0.541	6.072	0.669	0.576	6.462	0.712
30	1.214	6.322	0.309	1.458	7.594	0.372	1.523	7.934	0.388
40	2.313	7.600	0.162	2.689	8.834	0.188	2.785	9.149	0.195
550	3.732	8.568	0.075	4.183	9.603	0.084	4.282	9.832	0.086
60	5.510	9.222	0.036	5.840	9.774	0.038	5.880	9.841	0.039
70	7.571	9.457	0.021	7.472	9.334	0.021	7.322	9.147	0.020
80	9.719	9.228	0.018	8.843	8.396	0.016	8.417	7.992	0.016
90	11.579	8.540	0.012	9.728	7.176	0.010	8.984	6.627	0.010
600	12.704	7.547	0.010	9.948	5.909	0.007	8.949	5.316	0.007
10	12.669	6.356	0.004	9.436	4.734	0.003	8.325	4.176	0.002
20	11.373	5.071	0.003	8.140	3.630	0.002	7.070	3.153	0.002
30	8.980	3.704	0.000	6.200	2.558	0.000	5.309	2.190	0.000
40	6.558	2.562	0.000	4.374	1.709	0.000	3.693	1.443	0.000
650	4.336	1.637	0.000	2.815	1.062	0.000	2.349	0.886	0.000
60	2.628	0.972	0.000	1.655	0.612	0.000	1.361	0.504	0.000
70	1.448	0.530	0.000	0.876	0.321	0.000	0.708	0.259	0.000
80	0.804	0.292	0.000	0.465	0.169	0.000	0.369	0.134	0.000
90	0.404	0.146	0.000	0.220	0.080	0.000	0.171	0.062	0.000
700	0.209	0.075	0.000	0.108	0.039	0.000	0.082	0.029	0.000
10	0.110	0.040	0.000	0.053	0.019	0.000	0.039	0.014	0.000
20	0.057	0.019	0.000	0.026	0.009	0.000	0.019	0.006	0.000
30	0.028	0.010	0.000	0.012	0.004	0.000	0.008	0.003	0.000
40	0.014	0.006	0.000	0.006	0.002	0.000	0.004	0.002	0.000
750	0.006	0.002	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000
60	0.004	0.002	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
70	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Суммы (X, Y, Z)	109.828	100.000	35.547	99.072	100.000	85.223	98.041	100.000	118.103
(x, y, z)	0.4476	0.4075	0.1449	0.3485	0.3517	0.2998	0.3101	0.3163	0.3736

1) В приводимых таблицах для десятичных дробей сохранены обозначения, принятые в американской литературе; дробная часть от целой отделяется не запятой, а точкой. — Прим. ред.

Проведения кривых сложения МКО 1931 г. $x(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ на относительные спектральные распределения стандартных излучений МКО D_{55}, D_{65}, D_{75}

Длина волны, λ (нм)	Стандартное излучение D_{55}			Стандартные излучения D_{65}			Стандартные излучения D_{75}		
	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$
380	0.004	0.000	0.020	0.006	0.000	0.031	0.009	0.000	0.040
90	0.015	0.000	0.073	0.022	0.001	0.104	0.028	0.001	0.132
400	0.083	0.002	0.394	0.112	0.003	0.531	0.137	0.004	0.649
10	0.284	0.008	1.354	0.377	0.010	1.795	0.457	0.013	2.180
20	0.915	0.027	4.398	1.188	0.035	5.708	1.424	0.042	6.840
30	1.834	0.075	8.951	2.329	0.095	11.365	2.749	0.112	13.419
40	2.836	0.187	14.228	3.456	0.228	17.336	3.965	0.262	19.889
450	3.135	0.354	16.523	3.722	0.421	19.621	4.200	0.475	22.139
60	2.781	0.574	15.960	3.242	0.669	18.608	3.617	0.746	20.759
70	1.857	0.865	12.239	2.123	0.989	13.995	2.336	1.088	15.397
80	0.935	1.358	7.943	1.049	1.525	8.917	1.139	1.656	9.683
90	0.299	1.942	4.342	0.330	2.142	4.790	0.354	2.302	5.147
500	0.047	3.025	2.606	0.051	3.342	2.815	0.054	3.538	2.979
10	0.089	4.819	1.516	0.095	5.131	1.614	0.099	5.372	1.690
20	0.602	6.755	0.744	0.627	7.040	0.776	0.646	7.249	0.799
30	1.641	8.546	0.418	1.686	8.784	0.430	1.716	8.939	0.437
40	2.821	9.267	0.197	2.869	9.425	0.201	2.900	9.526	0.203
550	4.248	9.750	0.086	4.267	9.796	0.086	4.271	9.804	0.086
60	5.656	9.467	0.037	5.625	9.415	0.037	5.584	9.346	0.037
70	7.048	8.804	0.019	6.947	8.678	0.019	6.843	8.549	0.019
80	8.517	8.087	0.015	8.305	7.886	0.015	8.108	7.698	0.015
90	8.925	6.583	0.010	8.613	6.353	0.009	8.387	6.186	0.009
600	9.540	5.667	0.007	9.047	5.374	0.007	8.700	5.168	0.007
10	9.071	4.551	0.003	8.500	4.265	0.003	8.108	4.068	0.003
20	7.658	3.415	0.002	7.091	3.162	0.002	6.710	2.992	0.001
30	5.525	2.279	0.000	5.063	2.089	0.000	4.749	1.959	0.000
40	3.933	1.537	0.000	3.547	1.386	0.000	3.298	1.289	0.000
650	2.398	0.905	0.000	2.147	0.810	0.000	1.992	0.752	0.000
60	1.417	0.524	0.000	1.252	0.463	0.000	1.151	0.426	0.000
70	0.781	0.286	0.000	0.680	0.249	0.000	0.619	0.227	0.000
80	0.400	0.146	0.000	0.346	0.126	0.000	0.315	0.114	0.000
90	0.172	0.062	0.000	0.150	0.054	0.000	0.136	0.049	0.000
700	0.089	0.032	0.000	0.077	0.028	0.000	0.069	0.025	0.000
10	0.047	0.017	0.000	0.041	0.015	0.000	0.037	0.013	0.000
20	0.019	0.007	0.000	0.017	0.006	0.000	0.015	0.006	0.000
30	0.011	0.004	0.000	0.010	0.003	0.000	0.009	0.003	0.000
40	0.006	0.002	0.000	0.005	0.002	0.000	0.004	0.002	0.000
750	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000
60	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
70	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Суммы (X, Y, Z)	95.642	100.000	92.085	95.017	100.000	108.813	94.939	100.000	122.558
Цветности (x, y, z)	0.3324	0.3476	0.3200	0.3127	0.3291	0.3581	0.2990	0.3150	0.3860

Проведения кривых сложения МКО 1964 г. $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ на относительные спектральные распределения стандартных излучений МКО, А, В, С

Длина волны, λ (нм)	Стандартное излучение А			Стандартное излучение В			Стандартное излучение С		
	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000
90	0.003	0.000	0.011	0.007	0.001	0.029	0.009	0.001	0.043
400	0.025	0.003	0.111	0.070	0.007	0.313	0.103	0.011	0.463
10	0.132	0.014	0.605	0.388	0.040	1.786	0.581	0.060	2.672
20	0.377	0.040	1.795	1.137	0.119	5.411	1.708	0.179	8.122
30	0.682	0.083	3.368	2.025	0.249	9.997	3.011	0.370	14.865
40	0.968	0.156	4.962	2.729	0.442	13.994	3.969	0.643	20.349
450	1.078	0.260	5.802	2.787	0.673	14.997	3.914	0.945	21.058
60	1.005	0.426	5.802	2.350	0.997	13.568	3.168	1.343	18.292
70	0.737	0.698	4.965	1.585	1.500	10.671	2.062	1.952	13.887
80	0.341	1.076	3.274	0.674	2.125	6.470	0.849	2.675	8.144
90	0.076	1.607	1.968	0.137	2.880	3.528	0.167	3.484	4.268
500	0.020	2.424	1.150	0.032	3.822	1.812	0.037	4.398	2.085
10	0.218	3.523	0.650	0.299	4.845	0.894	0.327	5.284	0.976
20	0.750	4.854	0.387	0.927	6.002	0.478	0.971	6.285	0.501
30	1.644	6.086	0.212	1.920	7.103	0.247	1.973	7.302	0.255
40	2.847	7.267	0.104	3.214	8.207	0.117	3.275	8.362	0.119
550	4.326	8.099	0.033	4.711	8.818	0.035	4.744	8.882	0.036
60	6.198	8.766	0.000	6.382	9.025	0.000	6.322	9.041	0.000
70	8.277	9.002	0.000	7.936	8.630	0.000	7.653	8.322	0.000
80	8.645	7.407	0.000	8.361	7.163	0.000	8.108	6.947	0.000
90	8.919	6.199	0.000	8.537	5.934	0.000	8.259	5.740	0.000
600	9.257	5.422	0.000	8.707	5.100	0.000	8.318	4.872	0.000
10	8.550	4.381	0.000	7.946	4.071	0.000	7.530	3.858	0.000
20	7.038	3.271	0.000	6.463	3.004	0.000	6.076	2.824	0.000
30	5.107	2.236	0.000	4.641	2.032	0.000	4.325	1.894	0.000
40	3.475	1.448	0.000	3.109	1.295	0.000	2.872	1.197	0.000
650	2.081	0.835	0.000	1.848	0.741	0.000	1.703	0.683	0.000
60	1.202	0.475	0.000	1.053	0.416	0.000	0.962	0.380	0.000
70	0.666	0.261	0.000	0.575	0.225	0.000	0.520	0.203	0.000
80	0.321	0.125	0.000	0.275	0.107	0.000	0.248	0.097	0.000
90	0.139	0.054	0.000	0.120	0.046	0.000	0.108	0.042	0.000
700	0.069	0.027	0.000	0.059	0.023	0.000	0.053	0.021	0.000
10	0.034	0.013	0.000	0.029	0.011	0.000	0.026	0.010	0.000
20	0.013	0.005	0.000	0.012	0.004	0.000	0.010	0.004	0.000
30	0.007	0.003	0.000	0.006	0.002	0.000	0.006	0.002	0.000
40	0.004	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000
750	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
60	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Суммы (X, Y, Z)	95.800	100.000	90.980	94.825	100.000	107.381	94.428	100.000	120.721
Целенности (x, y, z)	0.3341	0.3487	0.3172	0.3138	0.3309	0.3553	0.2996	0.3173	0.3831

Произведения кривых сложения МКО 1964 г. $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ на относительные спектральные распределения стандартных излучений МКО D_{55} , D_{65} , D_{75}

Длина волны, λ (нм)	Стандартное излучение D_{55}			Стандартное излучение D_{65}			Стандартное излучение D_{75}		
	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)$	$S(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000	0.004
90	0.008	0.001	0.035	0.011	0.001	0.049	0.014	0.002	0.062
400	0.102	0.011	0.458	0.136	0.014	0.613	0.165	0.017	0.744
10	0.507	0.052	2.330	0.667	0.069	3.066	0.805	0.083	3.698
20	1.277	0.134	6.075	1.644	0.172	7.820	1.958	0.205	9.311
30	1.864	0.229	9.203	2.348	0.289	11.589	2.754	0.338	13.593
40	2.866	0.464	14.692	3.463	0.560	17.755	3.947	0.639	20.236
450	3.170	0.765	17.056	3.733	0.901	20.088	4.184	1.010	22.517
60	2.650	1.124	15.304	3.065	1.300	17.697	3.397	1.441	19.613
70	1.705	1.614	11.484	1.934	1.831	13.025	2.113	2.001	14.235
80	0.721	2.272	6.918	0.803	2.530	7.703	0.866	2.729	8.309
90	0.138	2.903	3.554	0.151	3.176	3.889	0.162	3.391	4.152
500	0.034	4.048	1.920	0.036	4.337	2.056	0.038	4.560	2.162
10	0.329	5.331	0.984	0.348	5.629	1.040	0.362	5.855	1.081
20	1.027	6.646	0.530	1.062	6.870	0.548	1.086	7.028	0.560
30	2.150	7.957	0.277	2.192	8.112	0.282	2.216	8.201	0.285
40	3.356	8.569	0.122	3.385	8.644	0.123	3.399	8.679	0.123
550	4.761	8.912	0.036	4.744	8.881	0.036	4.717	8.830	0.036
60	6.153	8.701	0.000	6.069	8.583	0.000	5.985	8.465	0.000
70	7.451	8.103	0.000	7.285	7.922	0.000	7.129	7.753	0.000
80	8.645	7.407	0.000	8.361	7.163	0.000	8.108	6.947	0.000
90	8.919	6.199	0.000	8.537	5.934	0.000	8.259	5.740	0.000
600	9.257	5.422	0.000	8.707	5.100	0.000	8.318	4.872	0.000
10	8.550	4.381	0.000	7.946	4.071	0.000	7.530	3.858	0.000
20	7.038	3.271	0.000	6.463	3.004	0.000	6.076	2.824	0.000
30	5.107	2.236	0.000	4.641	2.032	0.000	4.325	1.894	0.000
40	3.475	1.448	0.000	3.109	1.295	0.000	2.872	1.197	0.000
650	2.081	0.835	0.000	1.848	0.741	0.000	1.703	0.683	0.000
60	1.202	0.475	0.000	1.053	0.416	0.000	0.962	0.380	0.000
70	0.666	0.261	0.000	0.575	0.225	0.000	0.520	0.203	0.000
80	0.321	0.125	0.000	0.275	0.107	0.000	0.248	0.097	0.000
90	0.139	0.054	0.000	0.120	0.046	0.000	0.108	0.042	0.000
700	0.069	0.027	0.000	0.059	0.023	0.000	0.053	0.021	0.000
10	0.034	0.013	0.000	0.029	0.011	0.000	0.026	0.010	0.000
20	0.013	0.005	0.000	0.012	0.004	0.000	0.010	0.004	0.000
30	0.007	0.003	0.000	0.006	0.002	0.000	0.006	0.002	0.000
40	0.004	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000
750	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
60	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Суммы (X, Y, Z)	95.800	100.000	90.980	94.825	100.000	107.381	94.428	100.000	120.721
Цветности (x, y, z)	0.3341	0.3487	0.3172	0.3138	0.3309	0.3553	0.2996	0.3173	0.3831

Перевод величины по атласу Манселла в координаты цвета МКО, и наоборот [49]

V_x ↔ X

V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X	V _x	X		
10.00	100.56																		
9.99	100.30	8.99	76.91	7.99	57.77	6.99	42.08	5.99	29.35	4.99	19.29	3.99	11.701	2.99	6.383	1.99	3.039	0.99	1.173
8	100.04	8	76.70	8	57.59	8	41.93	8	29.24	8	19.21	8	11.637	8	6.341	8	3.015	8	1.159
7	99.79	7	76.49	7	57.42	7	41.79	7	29.13	7	19.12	7	11.574	7	6.299	7	2.990	7	1.145
6	99.53	6	76.28	6	57.25	6	41.65	6	29.01	6	19.03	6	11.510	6	6.257	6	2.966	6	1.131
5	99.27	5	76.07	5	57.08	5	41.51	5	28.90	5	18.94	5	11.446	5	6.215	5	2.941	5	1.119
9.94	99.01	8.94	75.86	7.94	56.91	6.94	41.37	5.94	28.79	4.94	18.85	3.94	11.383	2.94	6.173	1.94	2.917	0.94	1.106
3	98.76	3	75.65	3	56.74	3	41.24	3	28.68	3	18.77	3	11.321	3	6.131	3	2.892	3	1.092
2	98.50	2	75.44	2	56.56	2	41.10	2	28.56	2	18.69	2	11.258	2	6.090	2	2.868	2	1.079
1	98.25	1	75.24	1	56.39	1	40.95	1	28.45	1	18.60	1	11.195	1	6.049	1	2.844	1	1.066
0	97.99	0	75.03	0	56.22	0	40.81	0	28.34	0	18.51	0	11.133	0	6.008	0	2.821	0	1.053
9.89	97.74	8.89	74.82	7.89	56.05	6.89	40.68	5.89	28.23	4.89	18.42	3.89	11.071	2.89	5.967	1.89	2.797	0.89	1.039
8	97.49	8	74.62	8	55.88	8	40.54	8	28.12	8	18.34	8	11.009	8	5.926	8	2.774	8	1.026
7	97.24	7	74.41	7	55.72	7	40.40	7	28.01	7	18.26	7	10.947	7	5.885	7	2.750	7	1.014
6	96.98	6	74.21	6	55.55	6	40.27	6	27.89	6	18.17	6	10.886	6	5.845	6	2.727	6	1.001
5	96.73	5	74.00	5	55.38	5	40.13	5	27.78	5	18.08	5	10.826	5	5.805	5	2.704	5	0.988
9.84	96.48	8.84	73.80	7.84	55.21	6.84	39.99	5.84	27.68	4.84	18.00	3.84	10.765	2.84	5.766	1.84	2.681	0.84	0.976
3	96.23	3	73.59	3	55.04	3	39.85	3	27.57	3	17.91	3	10.704	3	5.726	3	2.658	3	0.963
2	95.98	2	73.38	2	54.87	2	39.72	2	27.46	2	17.83	2	10.643	2	5.686	2	2.635	2	0.950
1	95.73	1	73.18	1	54.71	1	39.58	1	27.35	1	17.75	1	10.583	1	5.647	1	2.613	1	0.937
0	95.48	0	72.98	0	54.54	0	39.44	0	27.24	0	17.67	0	10.524	0	5.608	0	2.590	0	0.925
9.79	95.23	8.79	72.78	7.79	54.37	6.79	39.30	5.79	27.13	4.79	17.58	3.79	10.464	2.79	5.569	1.79	2.568	0.79	0.913
8	94.98	8	72.57	8	54.21	8	39.17	8	27.02	8	17.50	8	10.404	8	5.530	8	2.547	8	0.900
7	94.74	7	72.37	7	54.04	7	39.04	7	26.91	7	17.41	7	10.344	7	5.492	7	2.525	7	0.888
6	94.49	6	72.17	6	53.87	6	38.90	6	26.80	6	17.33	6	10.285	6	5.454	6	2.503	6	0.876
5	94.25	5	71.96	5	53.71	5	38.77	5	26.70	5	17.25	5	10.227	5	5.416	5	2.481	5	0.864
9.74	94.00	8.74	71.76	7.74	53.55	6.74	38.63	5.74	26.59	4.74	17.17	3.74	10.168	2.74	5.378	1.74	2.460	0.74	0.851
3	93.76	3	71.56	3	53.38	3	38.50	3	26.49	3	17.09	3	10.109	3	5.340	3	2.438	3	0.839

2	93.51	2	71.36	2	53.22	2	38.36	2	26.38	2	17.00	2	10.051	2	5.302	2	2.417	2	0.827
1	93.27	1	71.16	1	53.05	1	38.23	1	26.27	1	16.92	1	9.993	1	5.265	1	2.395	1	0.815
0	93.02	0	70.96	0	52.89	0	38.10	0	26.17	0	16.84	0	9.935	0	5.228	0	2.375	0	0.803
9.69	92.78	8.69	70.77	7.69	52.73	6.69	37.96	5.69	26.06	4.69	16.76	3.69	9.878	2.69	5.191	1.69	2.354	0.69	0.791
8	92.53	8	70.57	8	52.56	8	37.83	8	25.96	8	16.68	8	9.821	8	5.154	8	2.333	8	0.779
7	92.29	7	70.37	7	52.40	7	37.70	7	25.85	7	16.60	7	9.764	7	5.118	7	2.313	7	0.768
6	92.05	6	70.17	6	52.24	6	37.57	6	25.75	6	16.52	6	9.707	6	5.081	6	2.292	6	0.756
5	91.81	5	69.97	5	52.08	5	37.43	5	25.64	5	16.44	5	9.650	5	5.045	5	2.272	5	0.744
9.64	91.57	8.64	69.78	7.64	51.91	6.64	37.30	5.64	25.54	4.64	16.36	3.64	9.593	2.64	5.009	1.64	2.251	0.64	0.732
3	91.33	3	69.58	3	51.75	3	37.17	3	25.43	3	16.28	3	9.537	3	4.973	3	2.231	3	0.721
2	91.09	2	69.38	2	51.59	2	37.04	2	25.33	2	16.21	2	9.482	2	4.937	2	2.212	2	0.709
1	90.85	1	69.19	1	51.43	1	36.91	1	25.23	1	16.13	1	9.426	1	4.902	1	2.192	1	0.697
0	90.61	0	68.99	0	51.27	0	36.78	0	25.12	0	16.05	0	9.370	0	4.867	0	2.173	0	0.685
9.59	90.37	8.59	68.80	7.59	51.11	6.59	36.65	5.59	25.02	4.59	15.97	3.59	9.315	2.59	4.831	1.59	2.153	0.59	0.674
8	90.13	8	68.60	8	50.95	8	36.52	8	24.91	8	15.89	8	9.260	8	4.796	8	2.133	8	0.662
7	89.89	7	68.41	7	50.79	7	36.39	7	24.81	7	15.81	7	9.205	7	4.762	7	2.114	7	0.650
6	89.66	6	68.22	6	50.63	6	36.27	6	24.71	6	15.74	6	9.150	6	4.728	6	2.094	6	0.638
5	89.42	5	68.02	5	50.47	5	36.14	5	24.61	5	15.66	5	9.095	5	4.693	5	2.075	5	0.627
9.54	89.19	8.54	67.83	7.54	50.31	6.54	36.00	5.54	24.51	4.54	15.58	3.54	9.041	2.54	4.659	1.54	2.056	0.54	0.616
3	88.95	3	67.64	3	50.16	3	35.87	3	24.40	3	15.50	3	8.987	3	4.624	3	2.037	3	0.605
2	88.72	2	67.44	2	50.00	2	35.75	2	24.30	2	15.43	2	8.933	2	4.590	2	2.019	2	0.593
1	88.48	1	67.25	1	49.84	1	35.62	1	24.20	1	15.35	1	8.880	1	4.557	1	2.000	1	0.581
0	88.25	0	67.06	0	49.69	0	35.49	0	24.10	0	15.26	0	8.827	0	4.524	0	1.981	0	0.570
9.49	88.01	8.49	66.87	7.49	49.53	6.49	35.36	5.49	24.00	4.49	15.18	3.49	8.774	2.49	4.490	1.49	1.963	0.49	0.559
8	87.78	8	66.68	8	49.37	8	35.24	8	23.90	8	15.11	8	8.721	8	4.457	8	1.944	8	0.548
7	87.55	7	66.48	7	49.22	7	35.11	7	23.80	7	15.04	7	8.668	7	4.424	7	1.926	7	0.536
6	87.32	6	66.29	6	49.06	6	34.98	6	23.70	6	14.96	6	8.615	6	4.391	6	1.909	6	0.525
5	87.08	5	66.11	5	48.90	5	34.86	5	23.60	5	14.88	5	8.563	5	4.359	5	1.891	5	0.514
9.44	86.85	8.44	65.92	7.44	48.75	6.44	34.74	5.44	23.50	4.44	14.81	3.44	8.511	2.44	4.327	1.44	1.873	0.44	0.503
3	86.62	3	65.73	3	48.59	3	34.61	3	23.40	3	14.74	3	8.459	3	4.294	3	1.855	3	0.491
2	86.39	2	65.54	2	48.44	2	34.48	2	23.30	2	14.67	2	8.407	2	4.261	2	1.837	2	0.479
1	86.16	1	65.35	1	48.29	1	34.35	1	23.21	1	14.59	1	8.356	1	4.229	1	1.820	1	0.468
0	85.93	0	65.16	0	48.13	0	34.23	0	23.11	0	14.52	0	8.305	0	4.198	0	1.802	0	0.458

V_Y ↔ Y

V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y	V _Y	Y
3	83.74	3	63.26	3	46.47	3	32.80	3	21.90	3	13.56	3	7.615	3	3.758	3	1.553	3	0.272				
2	83.52	2	63.08	2	46.32	2	32.67	2	21.81	2	13.49	2	7.567	2	3.729	2	1.537	2	0.260				
1	83.29	1	62.89	1	46.17	1	32.55	1	21.71	1	13.42	1	7.519	1	3.700	1	1.521	1	0.248				
0	83.07	0	62.71	0	46.02	0	32.43	0	21.62	0	13.35	0	7.471	0	3.671	0	1.506	0	0.237				
9.19	82.84	8.19	62.52	7.19	45.87	6.19	32.31	5.19	21.52	4.19	13.28	3.19	7.423	2.19	3.642	1.19	1.490	0.19	0.225				
8	82.62	8	62.34	8	45.72	8	32.19	8	21.43	8	13.21	8	7.375	8	3.613	8	1.475	8	0.214				
7	82.39	7	62.16	7	45.57	7	32.07	7	21.33	7	13.14	7	7.328	7	3.585	7	1.459	7	0.202				
6	82.17	6	61.98	6	45.42	6	31.95	6	21.24	6	13.07	6	7.281	6	3.557	6	1.444	6	0.191				
5	81.95	5	61.79	5	45.27	5	31.83	5	21.14	5	13.00	5	7.234	5	3.529	5	1.429	5	0.179				
9.14	81.73	8.14	61.61	7.14	45.12	6.14	31.71	5.14	21.05	4.14	12.93	3.14	7.187	2.14	3.501	1.14	1.413	0.14	0.167				
3	81.50	3	61.43	3	44.97	3	31.59	3	20.96	3	12.86	3	7.140	3	3.473	3	1.398	3	0.155				
2	81.28	2	61.25	2	44.82	2	31.47	2	20.86	2	12.80	2	7.094	2	3.445	2	1.383	2	0.143				
1	81.06	1	61.07	1	44.67	1	31.35	1	20.77	1	12.73	1	7.048	1	3.418	1	1.368	1	0.131				
0	80.84	0	60.88	0	44.52	0	31.23	0	20.68	0	12.66	0	7.002	0	3.391	0	1.354	0	0.120				
9.09	80.62	8.09	60.70	7.09	44.38	6.09	31.11	5.09	20.59	4.09	12.59	3.09	6.956	2.09	3.364	1.09	1.339	0.09	0.108				
8	80.40	8	60.52	8	44.23	8	30.99	8	20.49	8	12.52	8	6.911	8	3.337	8	1.324	8	0.096				
7	80.18	7	60.35	7	44.08	7	30.87	7	20.40	7	12.46	7	6.866	7	3.310	7	1.310	7	0.084				
6	79.97	6	60.17	6	43.94	6	30.75	6	20.31	6	12.39	6	6.821	6	3.283	6	1.295	6	0.073				
5	79.75	5	59.99	5	43.79	5	30.64	5	20.22	5	12.32	5	6.776	5	3.256	5	1.281	5	0.061				
9.04	79.53	8.04	59.81	7.04	43.64	6.04	30.52	5.04	20.13	4.04	12.26	3.04	6.731	2.04	3.230	1.04	1.267	0.04	0.049				
3	79.31	3	59.63	3	43.50	3	30.40	3	20.04	3	12.19	3	6.687	3	3.204	3	1.253	3	0.036				
2	79.10	2	59.45	2	43.35	2	30.28	2	19.95	2	12.12	2	6.643	2	3.178	2	1.238	2	0.024				
1	78.88	1	59.28	1	43.21	1	30.17	1	19.86	1	12.06	1	6.599	1	3.152	1	1.224	1	0.012				
0	78.66	0	59.10	0	43.06	0	30.05	0	19.77	0	12.00	0	6.555	0	3.126	0	1.210	0	0.000				

V_Z ↔ Z

V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	V _Z	Z	
10.00	121.14																							
9.99	120.82	8.99	92.65	7.99	69.59	6.99	50.69	5.99	35.36	4.99	23.24	3.99	14.096	2.99	7.690	1.99	3.661	0.99	1.413					
8	120.51	8	92.39	8	69.38	8	50.52	8	35.22	8	23.14	8	14.019	8	7.639	8	3.631	8	1.396					
7	120.21	7	92.14	7	69.17	7	50.35	7	35.09	7	23.03	7	13.942	7	7.588	7	3.602	7	1.379					
6	119.90	6	91.89	6	68.96	6	50.18	6	34.95	6	22.92	6	13.865	6	7.537	6	3.573	6	1.363					
5	119.58	5	91.64	5	68.76	5	50.01	5	34.82	5	22.82	5	13.789	5	7.487	5	3.543	5	1.348					
9.94	119.27	8.94	91.39	7.94	68.55	6.94	49.84	5.94	34.68	4.94	22.71	3.94	13.713	2.94	7.436	1.94	3.514	0.94	1.332					
3	118.97	3	91.13	3	68.35	3	49.67	3	34.55	3	22.60	3	13.637	3	7.386	3	3.484	3	1.316					
2	118.66	2	90.88	2	68.14	2	49.50	2	34.41	2	22.50	2	13.562	2	7.337	2	3.455	2	1.300					
1	118.35	1	90.63	1	67.93	1	49.33	1	34.27	1	22.40	1	13.486	1	7.287	1	3.426	1	1.284					
0	118.04	0	90.38	0	67.73	0	49.17	0	34.13	0	22.30	0	13.412	0	7.237	0	3.398	0	1.268					
9.89	117.74	8.89	90.14	7.89	67.52	6.89	49.00	5.89	34.00	4.89	22.19	3.89	13.336	2.89	7.188	1.89	3.369	0.89	1.252					
8	117.44	8	89.89	8	67.32	8	48.84	8	33.87	8	22.09	8	13.262	8	7.139	8	3.341	8	1.237					
7	117.13	7	89.64	7	67.12	7	48.67	7	33.74	7	21.99	7	13.188	7	7.090	7	3.312	7	1.221					
6	116.83	6	89.39	6	66.92	6	48.50	6	33.60	6	21.88	6	13.114	6	7.041	6	3.284	6	1.206					
5	116.52	5	89.14	5	66.71	5	48.34	5	33.47	5	21.78	5	13.041	5	6.993	5	3.257	5	1.190					
9.84	116.22	8.84	88.90	7.84	66.50	6.84	48.17	5.84	33.34	4.84	21.68	3.84	12.968	2.84	6.946	1.84	3.230	0.84	1.175					
3	115.92	3	88.65	3	66.30	3	48.01	3	33.21	3	21.58	3	12.894	3	6.898	3	3.203	3	1.160					
2	115.62	2	88.40	2	66.10	2	47.84	2	33.08	2	21.48	2	12.821	2	6.850	2	3.175	2	1.144					
1	115.32	1	88.15	1	65.90	1	47.68	1	32.95	1	21.38	1	12.749	1	6.803	1	3.147	1	1.129					
0	115.02	0	87.91	0	65.70	0	47.51	0	32.81	0	21.28	0	12.677	0	6.755	0	3.120	0	1.114					
9.79	114.72	8.79	87.67	7.79	65.50	6.79	47.35	5.79	32.68	4.79	21.18	3.79	12.605	2.79	6.708	1.79	3.094	0.79	1.099					
8	114.42	8	87.42	8	65.30	8	47.19	8	32.55	8	21.08	8	12.533	8	6.662	8	3.068	8	1.084					
7	114.12	7	87.18	7	65.10	7	47.03	7	32.42	7	20.98	7	12.461	7	6.616	7	3.041	7	1.070					
6	113.83	6	86.94	6	64.90	6	46.86	6	32.29	6	20.88	6	12.390	6	6.570	6	3.015	6	1.055					
5	113.53	5	86.69	5	64.70	5	46.70	5	32.16	5	20.78	5	12.319	5	6.524	5	2.989	5	1.040					
9.74	113.24	8.74	86.45	7.74	64.51	6.74	46.54	5.74	32.03	4.74	20.68	3.74	12.248	2.74	6.478	1.74	2.963	0.74	1.025					
3	112.94	3	86.21	3	64.31	3	46.38	3	31.91	3	20.58	3	12.178	3	6.433	3	2.937	3	1.011					
2	112.65	2	85.97	2	64.11	2	46.21	2	31.78	2	20.48	2	12.108	2	6.387	2	2.911	2	0.997					

Отношение коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния
(K/S) как функция коэффициента отражения
в % ($100R_{\infty}$)

Продолжение таблицы В

V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z	V_z	Z
0	95.47	0	71.91	0	52.58	0	36.88	0	24.42	0	14.95	0	8.269	0	4.005	0	1.599	0	0.142
9.09	95.21	8.09	71.69	7.09	52.41	6.09	36.74	5.09	24.31	4.09	14.87	3.09	8.215	2.09	3.973	1.09	1.581	0.09	0.128
8	94.95	8	71.48	8	52.24	8	36.60	8	24.20	8	14.79	8	8.162	8	3.941	8	1.564	8	0.113
7	94.69	7	71.20	7	52.06	7	36.46	7	24.09	7	14.71	7	8.109	7	3.909	7	1.547	7	0.099
6	94.44	6	71.06	6	51.89	6	36.32	6	23.99	6	14.63	6	8.056	6	3.877	6	1.529	6	0.086
5	94.19	5	70.85	5	51.72	5	36.18	5	23.88	5	14.55	5	8.003	5	3.845	5	1.512	5	0.072
9.04	93.93	8.04	70.64	7.04	51.54	6.04	36.04	5.04	23.77	4.04	14.48	3.04	7.950	2.04	3.814	1.04	1.496	0.04	0.058
3	93.67	3	70.42	3	51.37	3	35.90	3	23.67	3	14.40	3	7.898	3	3.784	3	1.479	3	0.043
2	93.42	2	70.21	2	51.20	2	35.76	2	23.56	2	14.32	2	7.846	2	3.753	2	1.462	2	0.028
1	93.16	1	70.01	1	51.03	1	35.63	1	23.46	1	14.24	1	7.794	1	3.723	1	1.445	1	0.014
0	92.90	0	69.80	0	50.86	0	35.49	0	23.35	0	14.17	0	7.742	0	3.692	0	1.429	0	0.000

$100R_{\infty}$	K/S	$100R_{\infty}$	K/S	$100R_{\infty}$	K/S	$100R_{\infty}$	K/S
0.0		5.0	9.02	10.0	4.050	15.0	2.408
0.1	449.0	.1	8.83	.1	4.001	.1	2.387
0.2	249.0	.2	8.64	.2	3.953	.2	2.365
0.3	165.7	.3	8.46	.3	3.906	.3	2.344
0.4	124.0	.4	8.29	.4	3.860	.4	2.324
0.5	99.0	.5	8.12	.5	3.814	.5	2.303
0.6	82.3	.6	7.957	.6	3.770	.6	2.283
0.7	70.4	.7	7.800	.7	3.726	.7	2.263
0.8	61.5	.8	7.650	.8	3.684	.8	2.244
0.9	54.6	.9	7.504	.9	3.642	.9	2.224
1.0	49.0	6.0	7.363	11.0	3.600	16.0	2.205
.1	44.5	.1	7.227	.1	3.560	.1	2.186
.2	40.7	.2	7.096	.2	3.520	.2	2.167
.3	37.5	.3	6.968	.3	3.481	.3	2.149
.4	34.7	.4	6.844	.4	3.443	.4	2.131
.5	32.3	.5	6.725	.5	3.405	.5	2.113
.6	30.3	.6	6.609	.6	3.368	.6	2.095
.7	28.4	.7	6.496	.7	3.332	.7	2.078
.8	26.79	.8	6.387	.8	3.296	.8	2.060
.9	25.33	.9	6.281	.9	3.261	.9	2.043
2.0	24.01	7.0	6.178	12.0	3.227	17.0	2.026
.1	22.82	.1	6.078	.1	3.193	.1	2.009
.2	21.74	.2	5.980	.2	3.159	.2	1.9930
.3	20.75	.3	5.886	.3	3.127	.3	1.9767
.4	19.85	.4	5.794	.4	3.094	.4	1.9606
.5	19.01	.5	5.704	.5	3.062	.5	1.9446
.6	18.24	.6	5.617	.6	3.031	.6	1.9289
.7	17.53	.7	5.532	.7	3.001	.7	1.9134
.8	16.87	.8	5.449	.8	2.970	.8	1.8980
.9	16.26	.9	5.369	.9	2.940	.9	1.8828
3.0	15.68	8.0	5.290	13.0	2.911	18.0	1.8678
.1	15.14	.1	5.213	.1	2.882	.1	1.8529
.2	14.64	.2	5.139	.2	2.854	.2	1.8382
.3	14.17	.3	5.066	.3	2.826	.3	1.8237
.4	13.72	.4	4.994	.4	2.798	.4	1.8094
.5	13.30	.5	4.925	.5	2.771	.5	1.7952
.6	12.91	.6	4.857	.6	2.744	.6	1.7812
.7	12.53	.7	4.791	.7	2.718	.7	1.7673
.8	12.18	.8	4.726	.8	2.692	.8	1.7536
.9	11.84	.9	4.662	.9	2.667	.9	1.7400
4.0	11.52	9.0	4.601	14.0	2.641	19.0	1.7266
.1	11.22	.1	4.540	.1	2.617	.1	1.7133
.2	10.93	.2	4.481	.2	2.592	.2	1.7002
.3	10.65	.3	4.423	.3	2.568	.3	1.6872
.4	10.39	.4	4.366	.4	2.544	.4	1.6743
.5	10.13	.5	4.311	.5	2.521	.5	1.6616
.6	9.89	.6	4.256	.6	2.498	.6	1.6490
.7	9.66	.7	4.203	.7	2.475	.7	1.6366
.8	9.44	.8	4.151	.8	2.452	.8	1.6242
.9	9.23	.9	4.100	.9	2.430	.9	1.6121

100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S
20.0	1.6000	25.0	1.1250	30.0	0.8167	35.0	0.6036	40.0	0.4500	45.0	0.3361	50.0	0.25000	55.0	0.18409
.1	1.5881	.1	1.1175	.1	0.8116	.1	0.6000	.1	0.4474	.1	0.3342	.1	0.24850	.1	0.18294
.2	1.5763	.2	1.1101	.2	0.8066	.2	0.5964	.2	0.4448	.2	0.3322	.2	0.24702	.2	0.18180
.3	1.5646	.3	1.1028	.3	0.8017	.3	0.5929	.3	0.4422	.3	0.3302	.3	0.24554	.3	0.18066
.4	1.5530	.4	1.0955	.4	0.7967	.4	0.5894	.4	0.4396	.4	0.3283	.4	0.24406	.4	0.17953
.5	1.5415	.5	1.0883	.5	0.7918	.5	0.5860	.5	0.4371	.5	0.3264	.5	0.24260	.5	0.17840
.6	1.5302	.6	1.0811	.6	0.7870	.6	0.5825	.6	0.4345	.6	0.3245	.6	0.24114	.6	0.17728
.7	1.5190	.7	1.0740	.7	0.7822	.7	0.5791	.7	0.4320	.7	0.3226	.7	0.23969	.7	0.17617
.8	1.5078	.8	1.0670	.8	0.7774	.8	0.5756	.8	0.4295	.8	0.3207	.8	0.23825	.8	0.17506
.9	1.4968	.9	1.0600	.9	0.7726	.9	0.5723	.9	0.4270	.9	0.3188	.9	0.23682	.9	0.17396
21.0	1.4860	26.0	1.0531	31.0	0.7679	36.0	0.5689	41.0	0.4245	46.0	0.3170	51.0	0.23539	56.0	0.17286
.1	1.4752	.1	1.0462	.1	0.7632	.1	0.5655	.1	0.4220	.1	0.3151	.1	0.23397	.1	0.17177
.2	1.4645	.2	1.0394	.2	0.7586	.2	0.5622	.2	0.4196	.2	0.3132	.2	0.23256	.2	0.17068
.3	1.4539	.3	1.0326	.3	0.7539	.3	0.5589	.3	0.4172	.3	0.3114	.3	0.23116	.3	0.16960
.4	1.4434	.4	1.0259	.4	0.7494	.4	0.5556	.4	0.4147	.4	0.3096	.4	0.22976	.4	0.16852
.5	1.4331	.5	1.0193	.5	0.7448	.5	0.5524	.5	0.4123	.5	0.3078	.5	0.22837	.5	0.16746
.6	1.4228	.6	1.0127	.6	0.7403	.6	0.5491	.6	0.4099	.6	0.3060	.6	0.22699	.6	0.16639
.7	1.4126	.7	1.0062	.7	0.7358	.7	0.5459	.7	0.4075	.7	0.3042	.7	0.22562	.7	0.16533
.8	1.4026	.8	0.9997	.8	0.7313	.8	0.5427	.8	0.4052	.8	0.3024	.8	0.22425	.8	0.16428
.9	1.3926	.9	0.9933	.9	0.7269	.9	0.5395	.9	0.4028	.9	0.3006	.9	0.22289	.9	0.16323
22.0	1.3827	27.0	0.9868	32.0	0.7225	37.0	0.5364	42.0	0.4005	47.0	0.2988	52.0	0.22154	57.0	0.16219
.1	1.3729	.1	0.9805	.1	0.7181	.1	0.5332	.1	0.3982	.1	0.2971	.1	0.22019	.1	0.16116
.2	1.3632	.2	0.9742	.2	0.7138	.2	0.5301	.2	0.3958	.2	0.2953	.2	0.21885	.2	0.16013
.3	1.3536	.3	0.9680	.3	0.7095	.3	0.5270	.3	0.3935	.3	0.2936	.3	0.21752	.3	0.15910
.4	1.3441	.4	0.9618	.4	0.7052	.4	0.5239	.4	0.3912	.4	0.2918	.4	0.21620	.4	0.15808
.5	1.3347	.5	0.9557	.5	0.7010	.5	0.5208	.5	0.3890	.5	0.2901	.5	0.21488	.5	0.15707
.6	1.3254	.6	0.9496	.6	0.6967	.6	0.5178	.6	0.3867	.6	0.2884	.6	0.21357	.6	0.15606
.7	1.3161	.7	0.9436	.7	0.6926	.7	0.5148	.7	0.3845	.7	0.2867	.7	0.21227	.7	0.15505
.8	1.3070	.8	0.9376	.8	0.6884	.8	0.5118	.8	0.3822	.8	0.2850	.8	0.21097	.8	0.15405
.9	1.2979	.9	0.9316	.9	0.6843	.9	0.5088	.9	0.3800	.9	0.2833	.9	0.20968	.9	0.15306
23.0	1.2889	28.0	0.9257	33.0	0.6802	38.0	0.5058	43.0	0.3778	48.0	0.2817	53.0	0.20840	58.0	0.15207
.1	1.2800	.1	0.9199	.1	0.6761	.1	0.5028	.1	0.3756	.1	0.2800	.1	0.20712	.1	0.15109
.2	1.2712	.2	0.9140	.2	0.6720	.2	0.4999	.2	0.3734	.2	0.2783	.2	0.20585	.2	0.15011
.3	1.2624	.3	0.9083	.3	0.6680	.3	0.4970	.3	0.3712	.3	0.2767	.3	0.20459	.3	0.14913
.4	1.2538	.4	0.9026	.4	0.6640	.4	0.4941	.4	0.3691	.4	0.2751	.4	0.20333	.4	0.14816
.5	1.2452	.5	0.8969	.5	0.6600	.5	0.4912	.5	0.3669	.5	0.2734	.5	0.20208	.5	0.14720
.6	1.2366	.6	0.8912	.6	0.6561	.6	0.4883	.6	0.3648	.6	0.2718	.6	0.20084	.6	0.14624
.7	1.2282	.7	0.8857	.7	0.6521	.7	0.4855	.7	0.3627	.7	0.2702	.7	0.19960	.7	0.14529
.8	1.2198	.8	0.8801	.8	0.6483	.8	0.4827	.8	0.3606	.8	0.2686	.8	0.19837	.8	0.14434
.9	1.2116	.9	0.8746	.9	0.6444	.9	0.4798	.9	0.3584	.9	0.2670	.9	0.19714	.9	0.14340
24.0	1.2033	29.0	0.8691	34.0	0.6406	39.0	0.4770	44.0	0.3564	49.0	0.26541	54.0	0.19593	59.0	0.14246
.1	1.1952	.1	0.8637	.1	0.6368	.1	0.4743	.1	0.3543	.1	0.26383	.1	0.19471	.1	0.14152
.2	1.1871	.2	0.8583	.2	0.6330	.2	0.4715	.2	0.3522	.2	0.26226	.2	0.19351	.2	0.14059
.3	1.1791	.3	0.8530	.3	0.6292	.3	0.4688	.3	0.3502	.3	0.26070	.3	0.19231	.3	0.13967
.4	1.1712	.4	0.8477	.4	0.6255	.4	0.4660	.4	0.3481	.4	0.25915	.4	0.19112	.4	0.13875
.5	1.1633	.5	0.8424	.5	0.6218	.5	0.4633	.5	0.3461	.5	0.25760	.5	0.18993	.5	0.13784
.6	1.1555	.6	0.8372	.6	0.6181	.6	0.4606	.6	0.3441	.6	0.25606	.6	0.18875	.6	0.13693
.7	1.1478	.7	0.8320	.7	0.6144	.7	0.4580	.7	0.3421	.7	0.25454	.7	0.18758	.7	0.13602
.8	1.1401	.8	0.8268	.8	0.6108	.8	0.4553	.8	0.3401	.8	0.25302	.8	0.18641	.8	0.13512
.9	1.1325	.9	0.8217	.9	0.6072	.9	0.4526	.9	0.3381	.9	0.25150	.9	0.18525	.9	0.13422

100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S
60.0	0.13333	65.0	0.09423	70.0	0.06429	75.0	0.04167
.1	0.13245	.1	0.09355	.1	0.06377	.1	0.04128
.2	0.13156	.2	0.09287	.2	0.06325	.2	0.04089
.3	0.13069	.3	0.09220	.3	0.06274	.3	0.04051
.4	0.12981	.4	0.09153	.4	0.06223	.4	0.04013
.5	0.12895	.5	0.09086	.5	0.06172	.5	0.03975
.6	0.12808	.6	0.09020	.6	0.06122	.6	0.03938
.7	0.12722	.7	0.08954	.7	0.06071	.7	0.03900
.8	0.12637	.8	0.08888	.8	0.06021	.8	0.03863
.9	0.12552	.9	0.08823	.9	0.05972	.9	0.03826
61.0	0.12467	66.0	0.08758	71.0	0.05923	76.0	0.03789
.1	0.12383	.1	0.08693	.1	0.05873	.1	0.03753
.2	0.12299	.2	0.08629	.2	0.05825	.2	0.03717
.3	0.12216	.3	0.08565	.3	0.05776	.3	0.03681
.4	0.12133	.4	0.08501	.4	0.05728	.4	0.03645
.5	0.12051	.5	0.08438	.5	0.05680	.5	0.03609
.6	0.11969	.6	0.08375	.6	0.05632	.6	0.03574
.7	0.11887	.7	0.08313	.7	0.05585	.7	0.03539
.8	0.11806	.8	0.08250	.8	0.05538	.8	0.03504
.9	0.11725	.9	0.08188	.9	0.05491	.9	0.03470
62.0	0.11645	67.0	0.08127	72.0	0.05444	77.0	0.03435
.1	0.11565	.1	0.08066	.1	0.05398	.1	0.03401
.2	0.11486	.2	0.08005	.2	0.05352	.2	0.03367
.3	0.11407	.3	0.07944	.3	0.05306	.3	0.03333
.4	0.11328	.4	0.07884	.4	0.05261	.4	0.03299
.5	0.11250	.5	0.07824	.5	0.05216	.5	0.03266
.6	0.11172	.6	0.07764	.6	0.05171	.6	0.03233
.7	0.11095	.7	0.07705	.7	0.05126	.7	0.03200
.8	0.11018	.8	0.07646	.8	0.05081	.8	0.03167
.9	0.10941	.9	0.07588	.9	0.05037	.9	0.03135
63.0	0.10865	68.0	0.07529	73.0	0.04993	78.0	0.03103
.1	0.10789	.1	0.07471	.1	0.04949	.1	0.03070
.2	0.10714	.2	0.07414	.2	0.04906	.2	0.03039
.3	0.10639	.3	0.07356	.3	0.04863	.3	0.03007
.4	0.10564	.4	0.07299	.4	0.04820	.4	0.02976
.5	0.10490	.5	0.07243	.5	0.04777	.5	0.02944
.6	0.10416	.6	0.07186	.6	0.04735	.6	0.02913
.7	0.10343	.7	0.07130	.7	0.04693	.7	0.02882
.8	0.10270	.8	0.07074	.8	0.04651	.8	0.02852
.9	0.10197	.9	0.07019	.9	0.04609	.9	0.02821
64.0	0.10125	69.0	0.06964	74.0	0.04568	79.0	0.02791
.1	0.10053	.1	0.06909	.1	0.04526	.1	0.02761
.2	0.09982	.2	0.06854	.2	0.04485	.2	0.02731
.3	0.09910	.3	0.06800	.3	0.04445	.3	0.02702
.4	0.09840	.4	0.06746	.4	0.04404	.4	0.02672
.5	0.09769	.5	0.06692	.5	0.04364	.5	0.02643
.6	0.09699	.6	0.06639	.6	0.04324	.6	0.02614
.7	0.09630	.7	0.06586	.7	0.04284	.7	0.02585
.8	0.09560	.8	0.06533	.8	0.04245	.8	0.02557
.9	0.09492	.9	0.06481	.9	0.04206	.9	0.02528

100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S	100R _∞	K/S
80.0	0.02500	85.0	0.01324	90.0	0.005556	95.0	0.001316
.1	0.02472	.1	0.01304	.1	0.005439	.1	0.001262
.2	0.02444	.2	0.01285	.2	0.005324	.2	0.001210
.3	0.02417	.3	0.01267	.3	0.005210	.3	0.001159
.4	0.02389	.4	0.01248	.4	0.005097	.4	0.001109
.5	0.02362	.5	0.01230	.5	0.004986	.5	0.001060
.6	0.02335	.6	0.01211	.6	0.004876	.6	0.001013
.7	0.02308	.7	0.01193	.7	0.004768	.7	0.000966
.8	0.02281	.8	0.01175	.8	0.004661	.8	0.000921
.9	0.02255	.9	0.01157	.9	0.004555	.9	0.000876
81.0	0.02228	86.0	0.01140	91.0	0.004451	96.0	0.000833
.1	0.02202	.1	0.01122	.1	0.004347	.1	0.000791
.2	0.02176	.2	0.01105	.2	0.004246	.2	0.000751
.3	0.02151	.3	0.01087	.3	0.004145	.3	0.000711
.4	0.02125	.4	0.01070	.4	0.004046	.4	0.000672
.5	0.02100	.5	0.01054	.5	0.003948	.5	0.000635
.6	0.02075	.6	0.01037	.6	0.003852	.6	0.000598
.7	0.02050	.7	0.01020	.7	0.003756	.7	0.000563
.8	0.02025	.8	0.01004	.8	0.003662	.8	0.000529
.9	0.02000	.9	0.00987	.9	0.003570	.9	0.000496
82.0	0.01976	87.0	0.009713	92.0	0.003478	97.0	0.000464
.1	0.01951	.1	0.009553	.1	0.003388	.1	0.000433
.2	0.01927	.2	0.009394	.2	0.003299	.2	0.000403
.3	0.01903	.3	0.009238	.3	0.003212	.3	0.000375
.4	0.01880	.4	0.009082	.4	0.003126	.4	0.000347
.5	0.01856	.5	0.008929	.5	0.003041	.5	0.000321
.6	0.01833	.6	0.008776	.6	0.002957	.6	0.000295
.7	0.01809	.7	0.008625	.7	0.002874	.7	0.000271
.8	0.01786	.8	0.008476	.8	0.002793	.8	0.000247
.9	0.01764	.9	0.008328	.9	0.002713	.9	0.000225
83.0	0.01741	88.0	0.008182	93.0	0.002634	98.0	0.000204
.1	0.01718	.1	0.008037	.1	0.002557	.1	0.000184
.2	0.01696	.2	0.007893	.2	0.002481	.2	0.000165
.3	0.01674	.3	0.007751	.3	0.002406	.3	0.000147
.4	0.01652	.4	0.007611	.4	0.002332	.4	0.000130
.5	0.01630	.5	0.007472	.5	0.002259	.5	0.000114
.6	0.01609	.6	0.007334	.6	0.002188	.6	0.0000994
.7	0.01587	.7	0.007198	.7	0.002118	.7	0.0000856
.8	0.01566	.8	0.007063	.8	0.002049	.8	0.0000729
.9	0.01545	.9	0.006930	.9	0.001981	.9	0.0000612
84.0	0.01524	89.0	0.006798	94.0	0.001915	99.0	0.0000505
.1	0.01503	.1	0.006667	.1	0.001850	.1	0.0000409
.2	0.01482	.2	0.006538	.2	0.001786	.2	0.0000323
.3	0.01462	.3	0.006410	.3	0.001723	.3	0.0000247
.4	0.01442	.4	0.006284	.4	0.001661	.4	0.0000181
.5	0.01422	.5	0.006159	.5	0.001601	.5	0.0000126
.6	0.01402	.6	0.006036	.6	0.001541	.6	0.0000080
.7	0.01382	.7	0.005914	.7	0.001483	.7	0.0000045
.8	0.01362	.8	0.005793	.8	0.001426	.8	0.0000020
.9	0.01343	.9	0.005674	.9	0.001370	.9	0.0000005
						100.0	0.0000000

Гиперболические котангенсы

u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$
0.000	∞	0.050	20.02	0.100	10.033	0.150	6.717
0.001	1000.0	0.051	19.62	0.101	9.935	0.151	6.673
0.002	500.0	0.052	19.25	0.102	9.838	0.152	6.630
0.003	333.3	0.053	18.89	0.103	9.743	0.153	6.587
0.004	250.0	0.054	18.54	0.104	9.650	0.154	6.545
0.005	200.0	0.055	18.20	0.105	9.559	0.155	6.503
0.006	166.7	0.056	17.88	0.106	9.469	0.156	6.462
0.007	142.9	0.057	17.56	0.107	9.381	0.157	6.422
0.008	125.0	0.058	17.26	0.108	9.295	0.158	6.382
0.009	111.1	0.059	16.97	0.109	9.211	0.159	6.342
0.010	100.0	0.060	16.69	0.110	9.128	0.160	6.303
0.011	90.0	0.061	16.41	0.111	9.046	0.161	6.265
0.012	83.3	0.062	16.15	0.112	8.966	0.162	6.227
0.013	76.9	0.063	15.89	0.113	8.887	0.163	6.189
0.014	71.4	0.064	15.65	0.114	8.810	0.164	6.152
0.015	66.7	0.065	15.41	0.115	8.734	0.165	6.115
0.016	62.5	0.066	15.17	0.116	8.659	0.166	6.079
0.017	58.8	0.067	14.95	0.117	8.586	0.167	6.044
0.018	55.6	0.068	14.73	0.118	8.514	0.168	6.008
0.019	52.6	0.069	14.52	0.119	8.443	0.169	5.973
0.020	50.01	0.070	14.31	0.120	8.373	0.170	5.939
0.021	47.63	0.071	14.11	0.121	8.305	0.171	5.905
0.022	45.46	0.072	13.91	0.122	8.237	0.172	5.871
0.023	43.49	0.073	13.72	0.123	8.171	0.173	5.838
0.024	41.68	0.074	13.54	0.124	8.106	0.174	5.805
0.025	40.01	0.075	13.36	0.125	8.042	0.175	5.772
0.026	38.47	0.076	13.18	0.126	7.978	0.176	5.740
0.027	37.05	0.077	13.01	0.127	7.916	0.177	5.709
0.028	35.72	0.078	12.85	0.128	7.855	0.178	5.677
0.029	34.49	0.079	12.68	0.129	7.795	0.179	5.646
0.030	33.34	0.080	12.527	0.130	7.736	0.180	5.615
0.031	32.27	0.081	12.373	0.131	7.677	0.181	5.585
0.032	31.26	0.082	12.222	0.132	7.620	0.182	5.555
0.033	30.31	0.083	12.076	0.133	7.563	0.183	5.525
0.034	29.42	0.084	11.933	0.134	7.507	0.184	5.496
0.035	28.58	0.085	11.793	0.135	7.452	0.185	5.467
0.036	27.79	0.086	11.657	0.136	7.398	0.186	5.438
0.037	27.04	0.087	11.523	0.137	7.345	0.187	5.410
0.038	26.33	0.088	11.393	0.138	7.292	0.188	5.382
0.039	25.65	0.089	11.266	0.139	7.241	0.189	5.354
0.040	25.01	0.090	11.141	0.140	7.189	0.190	5.326
0.041	24.40	0.091	11.019	0.141	7.139	0.191	5.299
0.042	23.82	0.092	10.900	0.142	7.090	0.192	5.272
0.043	23.27	0.093	10.784	0.143	7.041	0.193	5.246
0.044	22.74	0.094	10.670	0.144	6.992	0.194	5.219
0.045	22.24	0.095	10.558	0.145	6.945	0.195	5.193
0.046	21.75	0.096	10.449	0.146	6.898	0.196	5.167
0.047	21.29	0.097	10.342	0.147	6.852	0.197	5.142
0.048	20.85	0.098	10.237	0.148	6.806	0.198	5.116
0.049	20.42	0.099	10.134	0.149	6.761	0.199	5.091

Продолжение таблицы Д

u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$	u	$\operatorname{cthu} u$
0.200	5.066	0.250	4.0830	0.300	3.4327	0.350	2.9729
0.201	5.042	0.251	4.0674	0.301	3.4220	0.351	2.9651
0.202	5.018	0.252	4.0519	0.302	3.4113	0.352	2.9573
0.203	4.994	0.253	4.0365	0.303	3.4007	0.353	2.9496
0.204	4.970	0.254	4.0213	0.304	3.3902	0.354	2.9419
0.205	4.946	0.255	4.0062	0.305	3.3797	0.355	2.9343
0.206	4.923	0.256	3.9912	0.306	3.3693	0.356	2.9267
0.207	4.900	0.257	3.9763	0.307	3.3590	0.357	2.9191
0.208	4.877	0.258	3.9616	0.308	3.3488	0.358	2.9116
0.209	4.854	0.259	3.9470	0.309	3.3386	0.359	2.9042
0.210	4.832	0.260	3.9324	0.310	3.3285	0.360	2.8968
0.211	4.809	0.261	3.9180	0.311	3.3184	0.361	2.8894
0.212	4.787	0.262	3.9037	0.312	3.3085	0.362	2.8821
0.213	4.766	0.263	3.8895	0.313	3.2985	0.363	2.8748
0.214	4.744	0.264	3.8755	0.314	3.2887	0.364	2.8675
0.215	4.723	0.265	3.8615	0.315	3.2789	0.365	2.8603
0.216	4.701	0.266	3.8476	0.316	3.2692	0.366	2.8532
0.217	4.680	0.267	3.8339	0.317	3.2595	0.367	2.8460
0.218	4.660	0.268	3.8203	0.318	3.2499	0.368	2.8390
0.219	4.639	0.269	3.8067	0.319	3.2404	0.369	2.8319
0.220	4.619	0.270	3.7933	0.320	3.2309	0.370	2.8249
0.221	4.598	0.271	3.7799	0.321	3.2215	0.371	2.8180
0.222	4.578	0.272	3.7667	0.322	3.2122	0.372	2.8110
0.223	4.558	0.273	3.7536	0.323	3.2029	0.373	2.8042
0.224	4.539	0.274	3.7405	0.324	3.1937	0.374	2.7973
0.225	4.519	0.275	3.7276	0.325	3.1845	0.375	2.7905
0.226	4.500	0.276	3.7147	0.326	3.1754	0.376	2.7837
0.227	4.481	0.277	3.7020	0.327	3.1663	0.377	2.7770
0.228	4.462	0.278	3.6893	0.328	3.1573	0.378	2.7703
0.229	4.443	0.279	3.6768	0.329	3.1484	0.379	2.7637
0.230	4.424	0.280	3.6643	0.330	3.1395	0.380	2.7570
0.231	4.406	0.281	3.6519	0.331	3.1307	0.381	2.7505
0.232	4.387	0.282	3.6396	0.332	3.1219	0.382	2.7439
0.233	4.369	0.283	3.6274	0.333	3.1132	0.383	2.7374
0.234	4.351	0.284	3.6153	0.334	3.1045	0.384	2.7309
0.235	4.333	0.285	3.6033	0.335	3.0959	0.385	2.7245
0.236	4.316	0.286	3.5913	0.336	3.0874	0.386	2.7181
0.237	4.298	0.287	3.5795	0.337	3.0789	0.387	2.7117
0.238	4.281	0.288	3.5677	0.338	3.0704	0.388	2.7054
0.239	4.263	0.289	3.5560	0.339	3.0620	0.389	2.6991
0.240	4.246	0.290	3.5444	0.340	3.0536	0.390	2.6928
0.241	4.229	0.291	3.5329	0.341	3.0453	0.391	2.6866
0.242	4.213	0.292	3.5214	0.342	3.0371	0.392	2.6804
0.243	4.196	0.293	3.5101	0.343	3.0289	0.393	2.6742
0.244	4.179	0.294	3.4988	0.344	3.0207	0.394	2.6681
0.245	4.163	0.295	3.4876	0.345	3.0126	0.395	2.6620
0.246	4.147	0.296	3.4765	0.346	3.0046	0.396	2.6559
0.247	4.131	0.297	3.4654	0.347	2.9966	0.397	2.6499
0.248	4.115	0.298	3.4545	0.348	2.9886	0.398	2.6438
0.249	4.099	0.299	3.4436	0.349	2.9807	0.399	2.6379

и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и
0.400	2.6319	0.450	2.3702	0.500	2.1640	0.550	1.9979
0.401	2.6260	0.451	2.3656	0.501	2.1603	0.551	1.9949
0.402	2.6201	0.452	2.3610	0.502	2.1566	0.552	1.9920
0.403	2.6143	0.453	2.3565	0.503	2.1530	0.553	1.9890
0.404	2.6085	0.454	2.3519	0.504	2.1493	0.554	1.9860
0.405	2.6027	0.455	2.3474	0.505	2.1457	0.555	1.9831
0.406	2.5969	0.456	2.3429	0.506	2.1421	0.556	1.9802
0.407	2.5912	0.457	2.3384	0.507	2.1386	0.557	1.9773
0.408	2.5855	0.458	2.3340	0.508	2.1350	0.558	1.9744
0.409	2.5798	0.459	2.3295	0.509	2.1314	0.559	1.9715
0.410	2.5742	0.460	2.3251	0.510	2.1279	0.560	1.9686
0.411	2.5686	0.461	2.3207	0.511	2.1244	0.561	1.9657
0.412	2.5630	0.462	2.3164	0.512	2.1209	0.562	1.9629
0.413	2.5574	0.463	2.3120	0.513	2.1174	0.563	1.9600
0.414	2.5519	0.464	2.3077	0.514	2.1139	0.564	1.9572
0.415	2.5464	0.465	2.3033	0.515	2.1105	0.565	1.9544
0.416	2.5409	0.466	2.2991	0.516	2.1070	0.566	1.9515
0.417	2.5355	0.467	2.2948	0.517	2.1036	0.567	1.9487
0.418	2.5301	0.468	2.2905	0.518	2.1002	0.568	1.9459
0.419	2.5247	0.469	2.2863	0.519	2.0968	0.569	1.9432
0.420	2.5193	0.470	2.2821	0.520	2.0934	0.570	1.9404
0.421	2.5140	0.471	2.2779	0.521	2.0900	0.571	1.9376
0.422	2.5087	0.472	2.2737	0.522	2.0866	0.572	1.9349
0.423	2.5034	0.473	2.2695	0.523	2.0833	0.573	1.9321
0.424	2.4982	0.474	2.2654	0.524	2.0799	0.574	1.9294
0.425	2.4929	0.475	2.2613	0.525	2.0766	0.575	1.9267
0.426	2.4877	0.476	2.2572	0.526	2.0733	0.576	1.9240
0.427	2.4826	0.477	2.2531	0.527	2.0700	0.577	1.9213
0.428	2.4774	0.478	2.2490	0.528	2.0668	0.578	1.9186
0.429	2.4723	0.479	2.2450	0.529	2.0635	0.579	1.9159
0.430	2.4672	0.480	2.2409	0.530	2.0602	0.580	1.9133
0.431	2.4621	0.481	2.2369	0.531	2.0570	0.581	1.9106
0.432	2.4571	0.482	2.2329	0.532	2.0538	0.582	1.9080
0.433	2.4520	0.483	2.2289	0.533	2.0506	0.583	1.9053
0.434	2.4470	0.484	2.2250	0.534	2.0474	0.584	1.9027
0.435	2.4421	0.485	2.2210	0.535	2.0442	0.585	1.9001
0.436	2.4371	0.486	2.2171	0.536	2.0410	0.586	1.8975
0.437	2.4322	0.487	2.2132	0.537	2.0378	0.587	1.8949
0.438	2.4273	0.488	2.2093	0.538	2.0347	0.588	1.8923
0.439	2.4224	0.489	2.2054	0.539	2.0316	0.589	1.8897
0.440	2.4175	0.490	2.2016	0.540	2.0284	0.590	1.8872
0.441	2.4127	0.491	2.1978	0.541	2.0253	0.591	1.8846
0.442	2.4079	0.492	2.1939	0.542	2.0222	0.592	1.8821
0.443	2.4031	0.493	2.1901	0.543	2.0192	0.593	1.8795
0.444	2.3983	0.494	2.1863	0.544	2.0161	0.594	1.8770
0.445	2.3936	0.495	2.1826	0.545	2.0130	0.595	1.8745
0.446	2.3889	0.496	2.1788	0.546	2.0100	0.596	1.8720
0.447	2.3842	0.497	2.1751	0.547	2.0070	0.597	1.8695
0.448	2.3795	0.498	2.1714	0.548	2.0039	0.598	1.8670
0.449	2.3749	0.499	2.1676	0.549	2.0009	0.599	1.8645

и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и
0.600	1.8620	0.650	1.7493	0.700	1.6546	0.750	1.5744
0.601	1.8596	0.651	1.7472	0.701	1.6529	0.751	1.5730
0.602	1.8571	0.652	1.7452	0.702	1.6512	0.752	1.5715
0.603	1.8547	0.653	1.7431	0.703	1.6494	0.753	1.5700
0.604	1.8522	0.654	1.7411	0.704	1.6477	0.754	1.5686
0.605	1.8498	0.655	1.7391	0.705	1.6460	0.755	1.5671
0.606	1.8474	0.656	1.7370	0.706	1.6443	0.756	1.5656
0.607	1.8450	0.657	1.7350	0.707	1.6426	0.757	1.5642
0.608	1.8426	0.658	1.7330	0.708	1.6409	0.758	1.5628
0.609	1.8402	0.659	1.7310	0.709	1.6392	0.759	1.5613
0.610	1.8378	0.660	1.7290	0.710	1.6375	0.760	1.5599
0.611	1.8354	0.661	1.7270	0.711	1.6358	0.761	1.5584
0.612	1.8331	0.662	1.7251	0.712	1.6342	0.762	1.5570
0.613	1.8307	0.663	1.7231	0.713	1.6325	0.763	1.5556
0.614	1.8284	0.664	1.7211	0.714	1.6308	0.764	1.5542
0.615	1.8260	0.665	1.7192	0.715	1.6292	0.765	1.5528
0.616	1.8237	0.666	1.7172	0.716	1.6275	0.766	1.5514
0.617	1.8214	0.667	1.7153	0.717	1.6259	0.767	1.5500
0.618	1.8191	0.668	1.7133	0.718	1.6242	0.768	1.5486
0.619	1.8168	0.669	1.7114	0.719	1.6226	0.769	1.5472
0.620	1.8145	0.670	1.7095	0.720	1.6210	0.770	1.5458
0.621	1.8122	0.671	1.7075	0.721	1.6194	0.771	1.5444
0.622	1.8099	0.672	1.7056	0.722	1.6177	0.772	1.5430
0.623	1.8076	0.673	1.7037	0.723	1.6161	0.773	1.5416
0.624	1.8054	0.674	1.7018	0.724	1.6145	0.774	1.5402
0.625	1.8031	0.675	1.6999	0.725	1.6129	0.775	1.5389
0.626	1.8009	0.676	1.6980	0.726	1.6113	0.776	1.5375
0.627	1.7986	0.677	1.6962	0.727	1.6097	0.777	1.5361
0.628	1.7964	0.678	1.6943	0.728	1.6081	0.778	1.5348
0.629	1.7942	0.679	1.6924	0.729	1.6065	0.779	1.5334
0.630	1.7919	0.680	1.6906	0.730	1.6050	0.780	1.5321
0.631	1.7897	0.681	1.6887	0.731	1.6034	0.781	1.5307
0.632	1.7875	0.682	1.6869	0.732	1.6018	0.782	1.5294
0.633	1.7853	0.683	1.6850	0.733	1.6003	0.783	1.5281
0.634	1.7832	0.684	1.6832	0.734	1.5987	0.784	1.5267
0.635	1.7810	0.685	1.6813	0.735	1.5972	0.785	1.5254
0.636	1.7788	0.686	1.6795	0.736	1.5956	0.786	1.5241
0.637	1.7767	0.687	1.6777	0.737	1.5941	0.787	1.5228
0.638	1.7745	0.688	1.6759	0.738	1.5925	0.788	1.5214
0.639	1.7724	0.689	1.6741	0.739	1.5910	0.789	1.5201
0.640	1.7702	0.690	1.6723	0.740	1.5895	0.790	1.5188
0.641	1.7681	0.691	1.6705	0.741	1.5879	0.791	1.5175
0.642	1.7660	0.692	1.6687	0.742	1.5864	0.792	1.5162
0.643	1.7639	0.693	1.6669	0.743	1.5849	0.793	1.5149
0.644	1.7618	0.694	1.6652	0.744	1.5834	0.794	1.5136
0.645	1.7597	0.695	1.6634	0.745	1.5819	0.795	1.5123
0.646	1.7576	0.696	1.6616	0.746	1.5804	0.796	1.5110
0.647	1.7555	0.697	1.6599	0.747	1.5789	0.797	1.5098
0.648	1.7534	0.698	1.6581	0.748	1.5774	0.798	1.5085
0.649	1.7513	0.699	1.6564	0.749	1.5759	0.799	1.5072

и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и	и	cthu и
0.80	1.5059	1.20	1.1995	1.60	1.08499	2.0	1.03731
0.81	1.4935	1.21	1.1952	1.61	1.08325	2.1	1.03045
0.82	1.4813	1.22	1.1910	1.62	1.08152	2.2	1.02486
0.83	1.4696	1.23	1.1868	1.63	1.07984	2.3	1.02031
0.84	1.4581	1.24	1.1828	1.64	1.07820	2.4	1.01660
0.85	1.4470	1.25	1.1789	1.65	1.07659	2.5	1.01357
0.86	1.4362	1.26	1.1750	1.66	1.07502	2.6	1.01109
0.87	1.4258	1.27	1.1712	1.67	1.07348	2.7	1.00907
0.88	1.4156	1.28	1.1676	1.68	1.07197	2.8	1.00742
0.89	1.4057	1.29	1.1640	1.69	1.07049	2.9	1.00607
0.90	1.3961	1.30	1.1605	1.70	1.06905	3.0	1.00497
0.91	1.3867	1.31	1.1570	1.71	1.06764	3.1	1.00407
0.92	1.3776	1.32	1.1537	1.72	1.06625	3.2	1.00333
0.93	1.3687	1.33	1.1504	1.73	1.06490	3.3	1.00272
0.94	1.3601	1.34	1.1472	1.74	1.06357	3.4	1.00223
0.95	1.3517	1.35	1.1441	1.75	1.06228	3.5	1.00183
0.96	1.3436	1.36	1.1410	1.76	1.06100	3.6	1.00149
0.97	1.3356	1.37	1.1381	1.77	1.05976	3.7	1.00122
0.98	1.3279	1.38	1.1351	1.78	1.05854	3.8	1.00100
0.99	1.3204	1.39	1.1323	1.79	1.05735	3.9	1.00082
1.00	1.3130	1.40	1.1295	1.80	1.05618	4.0	1.000671
1.01	1.3059	1.41	1.1268	1.81	1.05504	4.1	1.000549
1.02	1.2989	1.42	1.1241	1.82	1.05392	4.2	1.000450
1.03	1.2921	1.43	1.1215	1.83	1.05282	4.3	1.000368
1.04	1.2855	1.44	1.1189	1.84	1.05175	4.4	1.000302
1.05	1.2791	1.45	1.1165	1.85	1.05070	4.5	1.000247
1.06	1.2728	1.46	1.1140	1.86	1.04967	4.6	1.000202
1.07	1.2667	1.47	1.1116	1.87	1.04866	4.7	1.000165
1.08	1.2607	1.48	1.1093	1.88	1.04768	4.8	1.000135
1.09	1.2549	1.49	1.1070	1.89	1.04671	4.9	1.000110
1.10	1.2492	1.50	1.1048	1.90	1.04577		
1.11	1.2437	1.51	1.1026	1.91	1.04484		
1.12	1.2383	1.52	1.1005	1.92	1.04393		
1.13	1.2330	1.53	1.0984	1.93	1.04304		
1.14	1.2279	1.54	1.0963	1.94	1.04217		
1.15	1.2229	1.55	1.0943	1.95	1.04132		
1.16	1.2180	1.56	1.0924	1.96	1.04049		
1.17	1.2132	1.57	1.0905	1.97	1.03967		
1.18	1.2085	1.58	1.0886	1.98	1.03887		
1.19	1.2040	1.59	1.0868	1.99	1.03808		

ЛИТЕРАТУРА

1. Aach H., Fluorescent pigments in art and design, *J. Color and Appearance*, 1, 25 (Sept. 1972).
2. Abbott R., Stearns E., Identification of organic pigments by spectrophotometric curve shape, *Calco Tech. Bull.*, 754, Calco Chemical Division, American Cyanamid Co., Bound Brook, N. J., 1944.
3. De W. Abney W., The colour sensations in terms of luminosity, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 193, 259 (1900).
4. De W. Abney W., On the extinction of colour by reduction of luminosity, *Proc. Roy. Soc. London, A.*, 83, 290 (1910); см. также *Researches in Colour Vision and the Trichromatic Theory*, London, Longmans, Green, 1913, p. 151.
5. Adams E., Cobb P., The effect on foveal vision of bright (and dark) surroundings, *J. Exptl. Psychol.*, 5, 39 (1922).
6. Adams E., A theory of color vision, *Psychol. Rev.*, 30, 56 (1923).
7. Adams E., X—Z planes in the 1931 ICI system of colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 168 (1942).
8. Adams G., An experimental study of memory color and related phenomena, *Am. J. Psychol.*, 34, 359 (1923).
9. Alderson J., Atherton E., Derbyshire A., Modern physical techniques in colour formulation, *J. Soc. Dyers Colourists*, 77, 657 (1961).
10. Allen E., Fluorescent white dyes: calculation of fluorescence from reflectivity values, *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 506 (1964).
11. Allen E., Basic equations used in computer color matching, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 1256 (1966).
12. Allen E., Some new advances in the study of metamerism, *Color Eng.*, 7, 35 (1969).
13. Allen E., An index of metamerism for observer differences, *Color 69*, 1st Congress of the International Color Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 771.
14. Allen E., An approach to the computer color matching of printed ink films, *Color 69*, 1st Congress of Int. Colour Assoc., Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, 1970, p. 909.
15. Allen E., Calculations for colorant formulations, *Industrial Color Technology*, Advances in Chemistry Series 107, Am. Chem. Soc., Washington, 1971, p. 87.
16. Allen E., Separation of the spectral radiance factor curve of fluorescent substances into reflected and fluorescent components, *Appl. Optics*, 12, 289 (1973).
17. Alpern M., Eye movements in *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4: Visual Psychophysics (D. Jameson and L. M. Hurvich, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 307.
18. Amberg R., Determination of gloss haze of pant films containing TiO₂ as a function of the dispersion process, *J. Oil Colour Chemists' Assoc.*, 54, 211 (1971).
19. Amy L., Sannié C., Sarrat J., Sur la couleur des corps par réflexion, *Rev. optique*, 16, 81 (1937).
20. Anders G., Daul C., Beitrag zur Messung and Bewertung des Weissgrades von optisch aufgehellten Proben, *Textilveredlung*, 5, 211 (1970)

21. AN-G-22a, Air Force-Navy Aeronautical Specification, Glasses, Flying Sun, April 28, 1948.
22. Asmussen R., Buchmann — Olsen B., On the definition and measurement of whiteness, *Trans. Danish Acad. Tech. Sci.*, № 10, 1—23 (1949).
23. Azuma T., Ishizaki H., Mori L., Niikura I., New type color and gloss meters, *J. Illum. Eng. Inst. Japan*, 41, 26 (1957).
24. Azuma T., Mori L., Direct measurement of color rendering of fluorescent lamps with a new photoelectric colorimeter, Proc. Comm. Intern. Eclairage, 14th Session, Vol. A., 126, Brussels, 1959, Paris, Bureau Central CIE, 1960.
25. Barkas W., Analysis of light scattered from a surface of low gloss into its specular and diffuse components, *Proc. Phys. Soc. London*, 51, 274 (1939).
26. Barlow H., Dark and light adaptation; psychophysics, Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII/4: Visual Psychophysics (D. Jameson, L. Hurvich, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, pp. 1—28.
27. Barnes B., A four-filter photoelectric colorimeter, *J. Opt. Soc. Am.*, 29, 448 (1939).
28. Bartleson C., Memory colors of familiar objects, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 73 (1960).
29. Beasley J., Atkins J., Billmeyer F., Scattering and absorption of light in turbid media, Electromagnetic Scattering (R. Powell, R. Stein, Eds.), Gordon and Breach, New York, 1967, p. 765.
30. Becker H., Noven H., Rechmann H., Über die Ursache des Glanzschleiers an hochglänzenden Lackoberflächen, *Farbe Lack*, 7, 625 (1967).
31. Becker R., Theory and Interpretation of Fluorescence and Phosphorescence, Wiley-Interscience, New York, 1969.
32. Bedford R., Wyszeczi G., Wavelength discrimination for point sources, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 129 (1958).
33. Bedford R., Wyszeczi G., Axial chromatic aberration of the human eye, *J. Opt. Soc. Am.*, 47, 564 (1957).
34. Belcher S., Greenshields K., Wright W., Colour vision survey using the Ishihara, Dvorine, Boström and American-Optical Hardy-Rand-Rittler tests, *Brit. J. Ophthalmol.*, 42, 355 (1958).
35. Bell G., Refractive index of opaque high-gloss surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, 47, 1118 (1957).
36. Bell J., Gailey I., Oglesby S., The creation of comprehensive colour ranges by computer, *J. Soc. Dyers Colourists*, 79, 613 (1963).
37. Bello F., An astonishing new theory of color, *Fortune*, 59, 144 (May, 1959).
38. Bentley G., Industrial tristimulus color matcher, *Electronics*, 24, 102 (1951).
39. Benzig G., Erfahrungen mit der Farbzepturberechnung auf dem Gebiet der Kunststoffe und Lacke, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 921.
40. Best R., Color formulation and control in the plastics industry, Industrial Color Technology, Advances in Chemistry Series 107, Am. Chem. Soc., Washington, 1971, p. 128.
41. Berger A., Weissgradformeln und ihre praktische Bedeutung, *Farbe*, 8, 187, (1959).
42. Berger A., Brockes A., Welche Farbdifferenzen werden bei metameren Probenpaaren durch kleine Abweichungen von den CIE-Normspektralwertfunktionen bewirkt? Proc. Intern. Color Meeting, Lucern 1965, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany 1966, p. 337.
43. Berger A., Koch O., Einige Bemerkungen zur Farbmessung an fluoreszierenden Körperfarben, *Farbe*, 9, 259 (1960).

44. Berger A., Strocka D., Quantitative assessment of artificial light sources for the goodness of fit to standard illuminant D65, *Appl. Optics*, 12, 338 (1973).
45. Von Bezold W., Über das Gesetz der Farbmischung und die physiologischen Grundfarben, *Ann. Phys.*, 150, 71—93, 221—224 (1873).
46. Billmeyer F., Abrams F., Predicting reflectance and color of paint films by Kubelka-Munk analysis. I. Theory, *J. Paint Technol.*, 45, 579 (1973).
47. Billmeyer F., Davidson J., A research spectrogoniophotometer, *J. Paint Technol.*, 41, 647 (1969).
48. Billmeyer F., Richards L., Scattering and absorption of radiation by lighting materials, *J. Color and Appearance*, 2 (№ 2), 4 (1973).
49. Billmeyer F., Saltzman M., Principles of Color Technology, Wiley-Interscience, New York, 1966.
50. Birren F., Functional Color, New York, The Crimson Press, 1937.
51. Boshoff M., Gloss scale for paint surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 741 (1958).
52. Bouma P., Heller G., Grundlinien einer allgemeinen Theorie der Farbmeterik, III, *Proc. Kon. Akad. Wetensch.*, Amsterdam, 38, 258 (1935).
53. Bouma P., Two methods of characterizing the colour-rendering properties of a light source, Proc. Intern. Comm. Illumination, 10th Session, Scheveningen, June 1939 (Wien, 1942); *Philips Tech. Rev.*, 2, 1 (1937).
54. Bouma P., Kruithof A., Hue-estimation of surface colours, *Physica*, 1, 36 (1943).
55. Boynton R., Rapid chromatic adaptation and the sensitivity functions of human color vision, *J. Opt. Soc. Am.*, 46, 172 (1956).
56. Boynton R., Kandel G., Orley J., Rapid chromatic adaptation of normal and dichromatic observers, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 654 (1959).
57. Breckenridge F., Schaub W., Rectangular uniform-chromaticity-scale coordinates, *J. Opt. Soc. Am.*, 29, 370 (1939).
58. Breckenridge F., Tables for transforming chromaticity coordinates from the I.C.I. system to the R-U-C-S system, Letter Circ. Natl. Bur. Std. LC-897, May, 1948.
59. Brenner B., Note on gloss measurement and tolerance of photographic paper, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 494 (1954).
60. Brewer W., Fundamental response functions and binocular color matching, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 207 (1954).
61. Brice B., The United States color standards for rosin, *J. Opt. Soc. Am.*, 30, 152 (1940).
62. Brice B., Glass color standards and a uniform chromaticity scale for sugar products, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 49 (1960).
63. Brindley G., The effects on colour vision of adaptation to very bright lights, *J. Physiol.*, 122, 332 (1953).
64. Brockes A., Der Einfluss glänzender Oberflächen auf Remissionsmessungen, *Farbe*, 9, 53 (1960).
65. Brockes A., Entwicklung und gegenwärtiger Stand der Rezepturberechnung, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, 1966, p. 841.
66. Brockes A., Vergleich der Metamerie-Indizes bei Lichtartwechsel von Tageslicht zur Glühlampe und zu verschiedenen Leuchtstofflampen, *Farbe*, 18, 233 (1969).
67. Brockes A., Vergleich von berechneten Metamerie-Indizes mit Abmusterungsergebnissen, *Farbe*, 19, 135 (1970).
68. Brown P., Wald G., Visual pigments in single rods and cones of the human retina, *Science*, 144, 45 (1964).
69. Brown W., MacAdam D., Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 808 (1949).
70. Brown W., The influence of luminance level on visual sensitivity to color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 684 (1951).

71. Brown W., Statistics of color-matching data, *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 252 (1952a).
72. Brown W., The effect of field size and chromatic surroundings on color discrimination, *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 837 (1952b).
73. Brown W., Color discrimination of twelve observers, *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 137 (1957).
74. Bruce H., Photometric method for measuring the hiding power of paints, Technol. Paper 306, Natl. Bur. Std. (1926).
75. Brusa B., Zecchin A., A five years application of colorimetry in the industry of synthetic fibers, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 940.
76. Buc G., Kienle R., Melsheimer L., Stearns E., Phenomenon of bronze in surface coatings, *Ind. Eng. Chem.*, **39**, 147 (1947).
77. Buck G., Froelich H., Color characteristics of human complexions, *Illum. Engr.*, **53**, 27 (1948).
78. Budde W., Die Messung des spektralen Reflexionsgrades von Weiss-Standards, I, Die Messung des Kugelanstrichs, *Farbe*, **7**, 17 (1958); II, Die Messung beliebiger Weiss-Standards, *Farbe*, **7**, 295 (1958).
79. Budde W., Opacity measurements on coloured papers, *Pulp Paper Mag. Can.*, **74** (№ 8), T258—T263 (1973).
80. Budde W., Dodd C., Absolute reflectance measurements in the $d/0^\circ$ geometry, *Farbe*, **19**, 94 (1970).
81. Budde W., Wyszecki G., Zur Messung des spektralen Remissionsgrades mit der Ulbrichtschon Kugel, *Farbe*, **4**, 15 (1955).
82. Budde W., Kundt H., Wyszecki G., Überführung der Farbmazzahlen nach dem Farbsystem DIN 6164 in Munsell-Mazzahlen und umgekehrt, *Farbe*, **4**, 83 (1955).
83. Burnham R., A colorimeter for research in color perception, *Am. J. Psychol.*, **65**, 603 (1952).
84. Burnham R., Visual selection of color film neutrals, *J. Opt. Soc. Am.*, **48**, 215 (1958).
85. Burnham R., Prediction of shifts in color appearance with a change from daylight to tungsten adaptation, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 254 (1959).
86. Burnham R., Evans R., Newhall S., Influences on color perception of adaptation to illumination, *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 597 (1952).
87. Burnham R., Evans R., Newhall S., Prediction of color appearance with different adaptation illuminants, *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 35 (1957).
88. Butler W., Absorption of light by turbid media, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 292 (1962).
89. Carnit P., Townsend G., Colour Television: N.T.S.C., Principles and Practice, Iliffe, London, 1961.
90. Channon H., Renwick F., Storr B., The behavior of scattering media in fully diffused light, *Proc. Roy. Soc. London*, **A94**, 222 (1918).
91. Chapanis A., Halsey R., Luminance of equally bright colors, *J. Opt. Soc. Am.*, **45**, 1 (1955).
92. Chickering K., Optimization of the MacAdam-modified 1965 Friele color-difference formula, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 537 (1967).
93. Chickering K., Perceptual significance of the differences between CIE tristimulus values, *J. Opt. Soc. Am.*, **59**, 936 (1969).
94. Chickering K., Bandpass-correction terms in spectrophotometry, *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 1027 (1970).
95. Chickering K., FMC color-difference formulas: clarification concerning usage, *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 118 (1974).
96. CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures), Echelle internationale pratique de température (résolution 8), Treizième Conf. Gen. Poids Mesures,

- Oct. 1968, Bureau Internationale des Poids et Mesures F99-Sèvres, France, p. 105.
97. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Colorimetry Committee Report, CIE Proc. 14th Session, Brussels, 1959, Vol. A, 1959 p. 91,
98. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Colors of Light Signals, Publication CIE № 2 (W-1.3.3) 1959, Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
99. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources 1st ed., Publication CIE № 13 (E-1.3.2), 1965, Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
100. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), International Lighting Vocabulary, 3rd ed., Publication CIE № 17 (E-1.1), 1970, Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
101. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Colorimetry, Official Recommendations of the International Commission on Illumination, Publication CIE № 15 (E-1.3.1), 1971, Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
102. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), Special Metamerism Index: Change in Illuminant, Supplement № 1 to Publication CIE № 15 (E-1.3.1), 1971, September 1972, Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782, Paris Cedex 16, France.
103. Clarke F., The effect of field-element size on chromaticity discrimination, Symposium on Colour Measurement in Industry, 1967, The Colour Group (Great Britain), The Institution of Ophthalmology, London, 1967, p. 132.
104. Clarke F., Samways P., The spectrophotometric properties of a selection of ceramic tiles, Report № MC2 (Aug., 1968), Metrology Centre, National Physical Laboratories, Teddington, Middlesex, England.
105. Coates E., Day, S., Provost J., Rigg B., Colour-difference equations for setting industrial colour tolerances, on Color Metrics, Driebergen, The Netherlands, 1971 (J. Vos. L. Friele, and P. Walraven, Eds.), AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, Holland, 1972, p. 286.
106. Coates E., Kriszka R., Provost J., Rigg B., The accuracy of colour-difference equations in relation to perceived colour differences, Colour 73, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973, Adam Hilger, London, 1973, p. 300.
107. Cole B., Watkins R., Increment thresholds in tritanopia, *Vision Res.*, **7**, 939 (1967).
108. Cooper A., McLaren K., The ANLAB colour system and the dyer's variables of 'shade' and strength, *J. Soc. Dyers Colourists*, **89**, p. 41 (1973).
109. Corduan K., Zum Angleich der spektralen Empfindlichkeit lichtelektrischer Empfänger an vorgegebene Empfindlichkeitsfunktionen, *Techn. Wiss. Abh. Osram Ges.*, **7**, 314 (1957).
110. Cox J., Unilateral color deficiency, congenital and acquired, *J. Opt. Soc. Am.*, **51**, 992 (1961).
111. Crawford B., Measurement of color rendering tolerances, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 1147 (1959).
112. Crawford B., Colour rendering tolerances and the colour-rendering properties of light sources, *Trans. Illum. Eng.*, **28**, 50 (1963).
113. Crawford B., Just perceptible chromaticity shifts, Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 302.
114. Croes A., Simple formula for calculating whiteness from photoelectric tristimulus data, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 830 (1959).
115. Das S., Sastri V., Spectral distribution and color of tropical daylight, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 319 (1965).

116. Davidson H., Visual sensitivity to surface color differences, *J. Opt. Soc. Am.* 41, 104 (1951).
117. Davidson H., Hanlon J., Use of charts for rapid calculation of color difference, *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 617 (1955).
118. Davidson H., Hemmendinger H., Colorimetric calibration of colorant systems, *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 216 (1955).
119. Davidson H., Hemmendinger H., A colorant mixture computer, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 281 (1958).
120. Davidson H., Hemmendinger H., Tristimulus difference computer, *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 1459 (1961).
121. Davidson H., Hemmendinger H., The theory and use of the Davidson and Hemmendinger Colorant Mixture Computer, *Offic. Dig. Federation Soc. Paint Technol.*, 37, 895 (1965).
122. Davidson H., Hemmendinger H., Color prediction using the two-constant turbid-media theory, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 1102 (1966).
123. Davidson H., Hemmendinger H., Landry J., Jr., A system of industrial colour control for the textile industry, *J. Soc. Dyers Colourists*, 79, 577 (1963).
124. Davidson H., Friede E., The size of acceptable color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 581 (1953).
125. Davies W., Wyszecki G., Physical approximation of color-mixture functions, *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 679 (1962).
126. Davis R., Gibson K., Filters for the reproduction of sunlight and daylight and the determination of color temperature, *Misc. Pub. 114, Natl. Bur. Std.* (1931).
127. Daw N., Colour-coded ganglion cells in the goldfish retina: Extension of their receptive fields by means of new stimuli, *J. Physiol. (London)*, 197, 567 (1968).
128. Dearth L., Shillcox W., Wink W., Van den Akker J., Study of instruments for the measurement of opacity of paper; V. Comparison of printing opacity determined with several selected instruments, *TAPPI*, 53, 436 (1970).
129. DeBernado A., Resnick P., Anomalous spectrophotometric behavior of copper phthalocyanine-benzidine yellow mixtures, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 480 (1959).
130. DeKerf J., Accuracy of tristimulus computations, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 334 (1958).
131. Derby R., Colorant formulation and color control in the textile industry, *Industrial Color Technology, Advances in Chemistry Series, 107, Am. Chem. Soc.*, Washington, 1971, p. 95.
132. De Valois R., Abramor I., Jacobs G., Analysis of response patterns of LGN cells, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 966 (1966).
133. De Valois R., Studies of the physiology of primate vision, *Visual Science, Proc. Intern. Symp. 1968, Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1971, p. 107.*
134. Ditchburn R., Eye-movements in relation to perception of colour, *Visual Problems of Colour, Vol. II (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.*
135. Donaldson R., A colorimeter with six matching stimuli, *Proc. Phys. Soc., London*, 59, 554 (1947).
136. Donaldson R., Spectrophotometry of fluorescent pigments, *Brit. J. Appl. Phys.*, 5, 210 (1954).
137. Donner K., The spectral sensitivity of vertebrate retinal elements, *Visual Problems of Colour, Vol. II, p. 539 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.*
138. Dresler A., Über eine neuartige Filterkombination zur genaueren Angleichung der spektralen Empfindlichkeit von Photozellen an die Augenempfindlichkeitskurve, *Licht*, 3, 41 (1933).

139. Dresler A., Frühling H., Über ein photoelektrisches Dreifarbenmessgerät, *Licht*, 9, 238 (1938).
140. Duncan D., The colour of pigment mixtures, *Proc. Phys. Soc., London*, 52, 380 (1940).
141. Duncan D., The colour of pigment mixtures, *J. Oil Colour Chemists' Assoc.*, 32, 296 (1949).
142. Duncan D., The identification and estimation of pigments in pigmented compositions by reflectance spectrophotometry, *J. Oil Colour Chemists' Assoc.*, 45, 300 (1962).
143. Duntley S., The optical properties of diffusing materials, *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 61 (1942).
144. Eastman A., Brecher G., The subjective measurement of color shifts with and without chromatic adaptation, *J. Illum. Eng.*, 1, 239 (1972).
145. Eastwood D., A simple modification to improve the visual uniformity of the CIE 1964 U*V*W* colour space, *Colour 73, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973, Adam Hilger, London, 1974, p. 293.*
146. Eitle D., Ganz E., Eine Methode zur Bestimmung von Normfarbwerten für fluoreszierende Proben, *Textilveredlung*, 3, 389 (1968).
147. Enoch J., The two-color threshold technique of Stiles and derived component color mechanisms, *Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII/4, Visual Psychophysics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 537.*
148. Evans R., *An Introduction to Color, Wiley, New York, 1948. Имеется русский перевод: Ивэнс Р., Введение в теорию цвета, изд-во «Мир», М., 1964.*
149. Farnsworth D., The Farnsworth-Munsell 100-hue dichotomous tests for color vision, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 568 (1943).
150. Farnsworth D., The Farnsworth rectilinear uniform chromaticity scale diagram № 38, *Memorandum Rep. 44-1, Med. Res. Lab. U.S. Submarine Base, New London, Conn., April 1944 (см. также Nickerson, 1947).*
151. Farnsworth D., A temporal factor in colour discrimination, *Visual Problems of Colour, Vol. II, p. 429 (1957), Nat. Phys. Lab. Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.*
152. Farnsworth D., Let's look at those isochromatic lines again, *Vision Res.*, 1, 1 (1961).
153. Fick A., *Die Lehre von der Lichtempfindung, Vol. 3, Part 1, p. 139, Handbuch der Physiologie (L. Hermann, Ed.), Leipzig, Vogel, 1879.*
154. Fink X., Schramm W., Einsatz der Kubelka-Munk-Beziehung für die Farbnachstellung, in *Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, 1970, p. 933.*
155. Fleischer J., Untersuchungen von Glanzerscheinungen bei der Reflexion von Licht, *Techn. University Berlin, Dissertation D83 (1969).*
156. Foote W., An investigation of the optical scattering and absorption coefficients of dyed handsheets and the application of the I.C.I. system of color specification to these handsheets, *Paper Trade J.*, 108, TS125 (March 9, 1939a).
157. Foote W., An investigation of the fundamental scattering and absorption coefficients of dyed handsheets, *Paper Trade J.*, 109, TS31 (Dec. 21, 1939b).
158. Foote W., Simple method for predicting the brightness of mixed pulp furnishes, *Paper Trade J.*, 122, TS35 (1946).
159. Foss C., Application of spectrophotometric data in the printing-ink industry, *J. Opt. Soc. Am.*, 28, 389 (1938).
160. Foss C., Analysis of the Ostwald color system, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 361 (1944).
161. Foss C., Color-order systems, *J. Soc. Motion Picture Engrs.*, 52, 30 (1949).

162. Friele L., Measurement and grading of whiteness of optical bleached materials, *Farbe*, 8, 171 (1959).
163. Friele L., Analysis of the Brown and Brown-MacAdam colour discrimination data, *Farbe*, 10, 193 (1961).
164. Friele L., Further analysis of color discrimination data, *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 1314 (1965).
165. Friele L., Preliminary analysis of the Munsell colour system in terms of the Müller theory, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 275.
166. Frühling H., Krepel F., Ein lichtelektrisches Farbmessgerät nach dem Dresler-Prinzip, *Farbe*, 3, 139 (1955).
167. Fukuda T., Whiteness of paper (Japanese), *Shikoku Koken Kaiho*, 11, 47 (1959).
168. Fukuda T., Fujii K., A modified chromatic-value system, *Acta Chromatica*, 1, 200 (1965).
169. Fukuda T., Sugiyama Y., The measurement of daylight fluorescent color, *Farbe*, 10, 73 (1961).
170. Fukuda T., Sugiyama Y., The evaluation of the whiteness of samples whitened by fluorescence, *Acta Chromatica*, 1, 12 (1962).
171. Gage H., Color filters for altering color temperature, Pyrometer absorption and Daylite glasses, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 46 (1933).
172. Gall L., Computer colour matching, in *Colour 73*, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973 Adam Hilger Publisher, London, 1973, p. 153.
173. Ganz E., Die Berechnung von Färberezepten mit komplementären Farbkordinaten, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 831; см. также *Textil-Rundschau*, 20, 225 (1965).
174. Ganz E., Whiteness measurement, *J. Color and Appearance*, 1, (№ 5), 33 (1972).
175. Gardner H., Sward G., Physical and Chemical Examination of Paints, Varnishes, Lacquers, and Colors, 12th ed., Gardner Laboratory, Bethesda, Maryland, 1962.
176. GATF (Graphic Arts Technical Foundation), Foss Color Order System, Announcement in Inter-Society Color Council Newsletter № 225, p. 13 (July/August 1973).
177. Geutler G., Zur Herstellung und Verwendung lichtelektrischer Farbmessgeräte nach dem Dresler-Prinzip, *Farbe*, 7, 153 (1958).
178. Gibson K., Spectrophotometry, Natl. Bur. Std. Circ., 484 (Sept. 15, 1949).
179. Glasser L., Troy D., A new high sensitivity differential colorimeter, *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 652 (1952).
180. Glasser L., McKinney A., Reilley C., Schnelle P., Cube-root color coordinate system, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 736 (1958).
181. Godlove I., Neutral value scales II, a comparison of results and equations describing value scales, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 419 (1933).
182. Godlove I., Uniformity of grading of the American, British and German light-fastness standards, *Proc. Am. Assoc. Textile Chemists Colorists, Am. Dyestuff Repr.*, 39, P215 (April 3, 1950).
183. Godlove I., Uniformity of grading of the American, British and German light-fastness standards — a reply to the fastness-test coordinating committee of the Society of Dyers and Colourists, *Am. Dyestuff Repr.*, 40, P114 (Feb., 19, 1951a).
184. Godlove I., Determination of the strength of dyeings, *Am. Dyestuff Repr.*, 40 (July 9, 1951b).
185. Godlove I., Perceptibility and acceptability of color-changes, in fastness tests and «on-tone» fading, *Am. Dyestuff Repr.*, 40 (Sept. 3, 1951c).

186. Godlove I., Improved color-difference formula, with applications to the perceptibility and acceptability of fadings, *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 760 (1951d).
187. Goebel D., Caldwell B., Hammond H. III, Use of an auxiliary sphere with a spectroreflectometer to obtain absolute reflectance, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 783 (1966).
188. Gouras P., Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells, *J. Physiol. (London)*, 199, 533 (1968).
189. Graham C., Color theory, Psychology: A Study of a Science, Vol. I (S. Koch, Ed.), New York, McGraw-Hill Book Co., 1959, p. 145.
190. Graham C., Color: data and theories, Vision and Visual Perception (C. H. Graham, Ed.), Wiley, New York, 1965, p. 414.
191. Graham C., Hsia Y., Color defect and color theory, *Science*, 127, 675 (1958).
192. Granit R., Sensory Mechanisms of the Retina, New York, Oxford University Press, 1947.
193. Granit R., Receptors and Sensory Perception, New Haven, Yale University Press, 1955.
194. Granville W., Jacobson E., Colorimetric specification of the Color Harmony Manual from spectrophotometric measurements, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 382 (1944).
195. Granville W., Judd D., Metameric colors and the macular pigment, *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 632 (1949).
196. Grassmann H., Zur Theorie der Farbenmischung, *Poggendorffs Ann.*, 89, 69 (1853); см. также *Phil. Mag.*, (4) 7, 254 (1853).
197. Graves M., The Art of Color and Design, New York, McGraw-Hill, 1941.
198. Grum F., Use of true reflectance and fluorescence for color evaluation of achromatic and chromatic fluorescent materials, CIE Proc., 17th Session, Barcelona, 1971, paper P-71.22; CIE Publ. № 21B (1971), Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
199. Grum F., Instrumentation in fluorescence measurements, *J. Color and Appearance* 1, 18 (April/May 1972).
200. Grum F., Patek J., Evaluation of whiteness using relative spectral radiance measurements, *TAPPI*, 48, 357 (1965).
201. Grum F., Saunders S., Wightman T., Artificial light sources to simulate illuminant D., *TAPPI*, 53, № 7 (1970).
202. Grützner P., Acquired color vision defects, Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII/4, Visual Psychophysics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 643.
203. Gugerli U., SARFO, ein System der automatischen Rezept-Formulierung und-Optimalisierung, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 839.
204. Guild J., On the selection of a suitable yellow glass for railway signals, Proc. Intern. Comm. Illumination, 7th Session, Saranac, 1928, Chemical Publishing Co., Easton, Pa., 1929, p. 862.
205. Guild J., The colorimetric properties of the spectrum, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A230, 149 (1931).
206. Guild J., The instrumental side of colorimetry, *J. Sci. Instr.*, 11, 69 (1934).
207. Gurevic M., Ueber eine rationelle Klassifikation der licht streuenden Medien, *Physik. Z.*, 31, 753 (1930).
208. Halstead M., Colour rendering tolerances, *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 831.
209. Halstead M., Bull J., Large F., A proposed duel index for expressing the colour-rendering properties of lamps, *Colour 73*, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973, Adam Hilger Publishers London, 1973, p. 357.

210. Halstead M., Henderson S., Spectral band tolerances and colour rendering indexes, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany 1966, p. 697.
211. Halstead M., Morley D., Stainsby A., Palmer D., Colour rendering tolerances in the CIE system, *Lighting Res. Technol.*, **3**, 99 (1971).
212. Hammond H., Gloss standards and glossmeter standardization, *Offic. Dig. Federation Paint Technol.*, **36**, 360 (1964).
213. Hammond H. III, Nimeroff I., Measurement of sixty-degree specular gloss, *J. Research Natl. Bur. Std.*, **44**, 585 (1950), RP2105.
214. Hård A., Philosophy of the Hering-Johansson Natural Color System, Proc. Intern. Color Meeting, Lucern, 1965, Vol. 1, 1965, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany 1966, p. 357.
215. Hård A., A new colour atlas based on the Natural Colour System by Hering-Johansson, Proc. Intern. Color Meeting, Lucern, 1965, Vol. 1, 1965, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany 1966, p. 367.
216. Hård A., Qualitative attributes of colour perception, Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 351.
217. Hardy A., Wurzburg F., Photoelectric method for preparing printing plates, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 295 (1948a).
218. Hardy A., Wurzburg F., Color correction in color printing, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 300 (1948b).
219. Hardy A., Young F., In defense of Beer's law, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 854 (1948).
220. Harrison V., The measurement of «shades» of «white» papers, PATRA Reports, Nos. 2 and 3, London, 1938-1939.
221. Harrison V., Definition and Measurement of Gloss, Cambridge (England): PATRA 1945.
222. Harrison V., Gloss measurement of papers: a comparative study, *J. Sci. Instr.*, **26**, 84 (1949).
223. Harrison W., A study of the retention of dyestuffs on paper making fibers under various conditions, *Paper Trade J.*, **105**, TS39 (Sept., 23, 1937).
224. Harrison W., A spectral band photometer for fluorescent lamps, *Light and Lighting*, **45**, 132 (1952)
225. Hartridge H., The visual perception of fine detail, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **B232**, 538 (1947); см. также *Nature*, **155**, 391, 657 (1945).
226. Hartridge H., Color receptors of the human fovea, *Nature*, **158**, 97 (1946).
227. Hartridge H., Response curve of the yellow receptors of the human fovea, *Nature*, **158**, 946 (1946).
228. Haupt G., Schleter J., Eckerle K., The ideal Lovibond Color System for CIE standard illuminants A and C shown in three colorimetric systems, U.S. Natl. Bur. Std., TN-716 (1972).
229. Heaps W., Automatic recording spectroradiometer system, *Appl. Optics*, **10**, 2045 (1971).
230. Heinrich F., Experimentelle Untersuchungen zum farbigen Simultankontrast, Dissertation, University of Munich, 1967.
231. Von Helmholtz H., Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben, *Müller's Arch. Anat. Physiol.*, **461** (1852); *Poggendorffs Ann.*, **87**, 45 (1852); *Phil. Mag.* (4), **4**, 519 (1852).
232. Von Helmholtz H., Handbuch der physiologischen Optik (1st ed.), Hamburg, Voss, 1866; (2nd ed.), Hamburg, Voss, 1896; (3rd ed.), Leipzig, Voss, 1911; см. также *Physiological Optics*, Vols. 1 and 2, Engl. trans. of 3rd ed., Optical Society of America, 1924, Dover, Publication, New York, 1962.
233. Helson H., The effects of direct stimulation of the blind-spot, *Am. J. Psychol.*, **41**, 345 (1929).

234. Helson H., Fundamental problems in color vision, I., The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of nonselective samples in chromatic illumination, *J. Exptl. Psychol.*, **23**, 439 (1938).
235. Helson H., Some factors and implications of color constancy, *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 555 (1943).
236. Helson H., Judd D., Wilson M., Color rendition with fluorescent sources of illumination, *Illum. Eng.*, **51**, 329 (1956).
237. Helson H., Judd D., Warren M., Object-color changes from daylight to incandescent filament illumination, *Illum. Eng.*, **47**, 221 (1952).
238. Helson H., Michels W., The effect of chromatic adaptation on achromaticity, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 1025 (1948).
239. Helwig H., Krochmann J., A review of methods for measuring the reflectance and transmittance of lighting materials, *Lighting Res. Technol.*, **3**, 241 (1971).
240. Hemmendinger H., Mechanisms of release of energy absorbed by dyes, *J. Color and Appearance*, **1**, 11 (Sept. 1972).
241. Hemmendinger H., Johnston R., A goniospectrophotometer for color measurements, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 509.
242. Hemmendinger H., Lambert J., The importance of chromaticity in the evaluation of whiteness, *J. Am. Oil. Chemists' Soc.*, **30**, 163 (1953).
243. Henderson S., Artificial daylight sources, *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **33**, 83 (1968).
244. Henderson S., Daylight and its Spectrum, Hilger, London, 1970.
245. Hennicke I., Die Ermittlung von Remissionskurven bedingtgleicher Farben, *Farbe*, **7**, 93 (1958).
246. Hennicke I., Zur Frage der Farbwiedergabe durch Lichtquellen und ihre Kennzeichnung, *Farbe*, **9**, 183 (1960).
247. Hennicke I., Münch W., Ein visuelles Farbmessgerät nach dem Gleichheitsverfahren, *Farbe*, **6**, 189 (1957).
248. Henry G., Cole B., Nathan J., The inheritance of congenital tritanopia with the report of an extensive pedigree, *Ann. hum. Genet.*, **27**, 219 (1964).
249. Hiler H., Color Harmony and Pigments, Chicago, Favor, Ruhl and Co., 1942.
250. Höfert H., Ein Filterphotometer zur Remissionsmessung, *Z. Instrumentenk.*, **67**, Heft 4 (1959).
251. Holmes J., The recognition of coloured light signals, *Trans. Illum. Eng. Soc. London*, **6**, 71 (1941).
252. Honjo K., Shimada T., Nonaka M., White vision in a two degree field with dark and light surroundings, *Acta Chromatica*, **1**, 236 (1967).
253. Horning S., Morse Mu, The measurement of gloss of paint panels, *Offic. Dig. Fed. Paint Varnish Prod. Clubs*, p. 153 (March 1947).
254. Hsia Y., Photochemistry of vision, *Vision and Visual Perception* (C. Graham, Ed.), Wiley, New York, 1965, Chap. 6, p. 149.
255. Hsia Y., Graham C., Color blindness, *Vision and Visual Perception* (C. Graham, Ed.), Wiley, New York, 1965, Chap. 14, Table 14.2.
256. Huey S., Industrial experience in measurement of 60° specular gloss, *Offic. Dig. Federation Soc. Paint Technol.*, **36**, 344 (1964).
257. Huey S., Color formulation and control in the paint industry, *Industrial Color Technology, Advances in Chemistry Series 107*, Am. Chem. Soc. Washington, 1971, p. 146.
258. Hunt R., Light and dark adaptation and the perception of color, *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 190 (1952).
259. Hunt R., Perception of color in 1° fields for different states of adaptation, *J. Opt. Soc. Am.*, **43**, 479 (1953).

260. Hunt R., Adaptation and the trichromatic theory, *Visual Problems of Colour*, Vol. II, 639 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
261. Hunt R., Measurement of color appearance, *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 1540 (1965).
262. Hunt R., *The Reproduction of Colour*, Wiley, London, 1967.
263. Hunter R., Methods of determining gloss, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 18, 19 (1937), RP958.
264. Hunter R., Development of filters for tristimulus and luminosity measurements with barrier layer photo-cells, *J. Opt. Soc. Am.*, 28, 51 (1938).
265. Hunter R., A multipurpose photoelectric reflectometer, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 25, 581 (1940) RP1345; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 30, 536 (1940) и *Paper Trade J.*, 113, TS275 (Nov. 1941).
266. Hunter R., Photoelectric Tristimulus Colorimetry from Symposium on Color—Its Specification and Use in Evaluating the Appearance of Materials, Philadelphia, American Society for Testing Materials, 1941b, p. 61.
267. Hunter R., Photoelectric tristimulus colorimetry with three filters, *Natl. Bur. Std. Circ.*, C429 (July 1942).
268. Hunter R., Photoelectric color-difference meter, *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 661 (1948); Accuracy, precision, and stability of a new photoelectric color-difference meter, *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 1094 (1948).
269. Hunter R., Gloss evaluation of materials, *ASTM Bull.* (TP 190), 186, 48 (Dec. 1952).
270. Hunter R., Multipurpose gloss apparatus, *J. Opt. Soc., Am.*, 45, 404 (1955).
271. Hunter R., Glossmeter improvements, *J. Opt. Soc. Am.*, 47, 118 (1957).
272. Hunter R., Description and measurement of white surfaces (A report of Inter-Society Color Council Subcommittee on problem 19: «A study of near-white surfaces»), *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 597 (1958a).
273. Hunter R., Photoelectric color difference meter, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 985 (1958b).
274. Hunter R., New reflectometer and its use for whiteness measurement, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 44 (1960).
275. Hunter R., Measurements of the appearance of paper, *TAPPI*, 45, 203A (1962).
276. Hunter R., High gloss measurements, *Offic. Dig. Federation Soc. Paint Technol.*, 36, 348 (1964).
277. Hunter R., Judd D., Development of a method of classifying paints according to gloss, *ASTM Bull.*, 97, 11 (1939); *Paint Varnish Prod. Mgr.*, 19, 152 (1939).
278. Hurvich L., Color vision deficiencies, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4, Visual Psychophysics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 582.
279. Hurvich L., Jameson D., A psychophysical study of white. I. Neutral adaptation, *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 521 (1951).
280. Hurvich L., Jameson D., A psychophysical study of white. II. Neutral adaptation. Area and duration of variants, *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 528 (1951).
281. Hurvich L., Jameson D., A psychophysical study of white. III. Adaptation as variant, *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 787 (1951).
282. Hurvich L., Jameson D., Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. IV. A psychological color specification system, *J. Opt. Soc. Am.*, 46, 416 (1956).
283. Hurvich L., Jameson D., An opponent-process theory of color vision, *Psychol. Rev.*, 64, 384 (1957).
284. Hurvich L., Jameson D., Further development of a quantified opponent-colours theory, *Visual Problems of Colour*, Vol. II, 691 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
285. Hurvich L., Jameson D., Color vision, *Ann. Rev. Psychol.*, 11, 99 (1960).

286. Hutchins M., Stearns E., Sundstrom F., Dyeing paper white, *TAPPI*, 35, 342 (1952).
287. IES Lighting Handbook, 5th ed., Illuminating Engineering Society, New York, 1972.
288. Ingersoll L., The glarimeter — an instrument for measuring the gloss of paper, *J. Opt. Soc. Am.*, 5, 213 (1921).
289. Ingle G., Note on the coincidence of equations for the reflectance of translucent films, *ASTM Bull.* 116, 32 (May 1942).
290. Institute of Paper Chemistry, Instrumentation Studies V. Report on gloss, *Paper Trade J.*, 104 (Jan. 1937).
291. Institute of Paper Chemistry, Instrumentation Studies VI. The modified Oxford Clarimeter, *Paper Trade J.*, 104 (Jan. 1937).
292. Inter-Society Color Council, Subcommittee on Problem 7 of the Problems Committee, Survey of American color specifications (1955), *Official Digest*, Fed. Paint, Varnish Prod. Clubs, № 381, 902 (Oct. 1956).
293. ISO (International Standards Organization), Paper Vocabulary, 6th Series of Terms (Definitions of Optical Properties), ISO/R1912—1971, ISO, Geneva, 1971.
294. Ives H., A precision artificial eye, *Phys. Rev.*, 6, 334 (1915).
295. Jacobsen A., Non-adaptability of the ICI system to some near-whites which show absorption in the far-blue region of the spectrum, *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 442 (1948).
296. Jacobson E., Basic Color — An Interpretation of the Ostwald Color System, Chicago, Paul Theobald, 1948.
297. Jaekel S., The utility of colour-difference formulae for match-acceptability decisions, *Color Metrics*, Proc. Int. Symp. on Color Metrics, Driebergen (Holland), 1971 (p. 266) (J. J. Vos., L. F. C. Friele, and P. L., Walraven, Eds.); AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, 1972.
298. Jaeger W., Genetics of congenital colour deficiencies, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4, Visual Psychophysics (D. Jameson and L. Hurvich, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 625.
299. Jaensch E., Ueber den Farbencontrast und die sog. Berücksichtigung der farbigen Beleuchtung, *Z. Sinnesphysiol.*, 52, 165 (1921).
300. Jameson D., Theoretical issues of color vision, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4, Visual Psychophysics (D. Jameson and L. Hurvich, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 381.
301. Jameson D., Hurvich L., Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation, *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 546 (1955).
302. Jameson D., Hurvich L., Opponent chromatic induction: Experimental evaluation and theoretical account, *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 46 (1961).
303. Jameson D., Hurvich L., Opponent-response functions related to measured cone photopigments, *J. Opt. Soc. Am.*, 58, 429 (1968).
304. Jameson D., Hurvich L., Color adaptation: sensitivity, contrast, after-images, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4: Visual Psychophysics (D. Jameson and L. Hurvich, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 568—581.
305. Jerome C., Flattery vs color rendition, *J. Illum. Eng. Soc.*, 1, 208 (1972).
306. Johnston R., Spectrophotometry for the analysis and description of color; *Fundamentals and Problems of Color: II. Analytical Aspects of Color*, *J. Paint Technol.*, 39, 346 (1967).
307. Johnston R., Color measuring instruments: A guide to their selection, *J. Color and Appearance*, 1, № 2, 27 (1971).
308. Johnston R., Color theory; *Pigment Handbook*, Vol. 3 (T. Patton, Ed.), Wiley, New York, 1973, pp. 229—288.
309. Jones L., A colorimeter operating on the subtractive principle, *J. Opt. Soc. Am.*, 4, 420 (1920).

310. Judd D., The computation of colorimetric purity, *J. Opt. Soc. Am.*, и *Rev. Sci. Instr.*, 13, 136 (1926).
311. Judd D., Least retinal illumination by spectral light required to evoke the «blue arcs of the retina», *Bur. Std. J. Res.*, 2, 441 (1929) PR43.
312. Judd D., Precision of color-temperature measurements under various observing conditions; a new color comparator for incandescent lamps, *Bur. Std. J. Res.*, 5, 1161 (1930), RP252.
313. Judd D., Reduction of data on mixture of color stimuli, *Bur. Std. J. Res.*, 4, 515 (1930), RP163.
314. Judd D., Sensibility to color-temperature change as a function of temperature, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 7 (1933).
315. Judd Q., Saturation scale for yellow colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 35 (1933).
316. Judd D., The 1931 I.C.I. standard observer and coordinate system for colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 359 (1933).
317. Judd D., A Maxwell triangle yielding uniform chromaticity scales, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 14, 41 (1935) RP756; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 25, 24 (1935).
318. Judd D., Opacity standards, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 13, 281 (1934) RP709; см. также *Paper Trade J.*, 100, TS4 (1935).
319. Judd D., A method for determining whiteness of paper, *Paper Trade J.*, 100, TS266 (1935).
320. Judd D., A method for determining the whiteness of paper, II. *Paper Trade J.*, 103, TS154 (1936).
321. Judd D., Estimation of chromaticity differences and nearest color temperature on the standard 1931 ICI colorimetric coordinate system, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 17, 771 (1936), RP944; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 26, 421 (1936).
322. Judd D., Optical specification of light-scattering materials, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 19, 287 (1937), RP1026.
323. Judd D., Specification of uniform color tolerances for textiles, *Textile Res.*, 9, 253, 292 (1939).
324. Judd D., Specification of color tolerances at the National Bureau of Standards, *Am. J. Psychol.*, 52, 418 (1939).
325. Judd D., Hue, saturation, and lightness of surface colors with chromatic illumination, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 24, 293 (1940) RP1285; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 30, 2 (1940).
326. Judd D., Systematic color designations for paper, *Paper Trade J.*, 111, TS201 (1940).
327. Judd D., Whiteness of light surface colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 31, 462 (1941).
328. Judd D., Fresnel reflection of diffusely incident light, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 29, 329 (1942), RP1504.
329. Judd D., Facts of color-blindness, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 294 (1943).
330. Judd D., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 33, 407 (1944), RP1618; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 35, 199 (1946).
331. Judd D., Color perceptions of deuteranopic and protanopic observers, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 41, 247 (1948), RP1922.
332. Judd D., Response functions for types of vision according to the Müller theory, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 42, 1 (1949).
333. Judd D., A comparison of direct colorimetry of titanium pigments with their indirect colorimetry based on spectrophotometry and a standard observer, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 43, 227 (1949b), RP2024; см. также *J. Opt. Soc. Am.* 39, 945 (1949); 40, 52 (1950).
334. Judd D., Vision: Color, Vol. II, Medical Physics, Chicago, Year Book Publishers; 1950, p. 1152.

335. Judd D., Report of U. S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight, CIE Proc. Vol. I, Part 7 Stockholm, 1951, p. 11; Paris, Bureau Central CIE.
336. Judd D., Basis correlates of visual stimulus, Handbook of Experimental Psychology (S. Stevens, Ed.), Wiley, New York, 1951, p. 811.
337. Judd D., Classic laws of color harmony expressed in terms of the color solid, *Inter-Society Color Council News Letter*, 119, 13 (July 1955).
338. Judd D., Color vision and colorimetry, Handbook of Physics (E. Condon and H. Odishaw, Eds.), New York, McGraw-Hill, 1958, pp. 6—64.
339. Judd D., Some color demonstrations I have shown, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 322 (1959).
340. Judd D., Appraisal of Land's work on two-primary color projections, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 254 (1960).
341. Judd D. Progress report for O.S.A. committee on uniform color scales, Proc. Intern. Color Meeting, Lucern, 1965, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 399.
342. Judd D., Color too true can be too expensive to be good, *Color Engineering*, 4, (N 3), 22 (1966).
343. Judd D., A flattery index for artificial illuminants, *Illum. Eng.*, 42, 593 (1967).
344. Judd D., Interval scales, ratio scales, and additive scales for the sizes of differences perceived between members of a geodesic series of colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 380 (1967).
345. Judd D., 1964 CIE supplementary observer applied to the colorimetry of rutile and anatase forms of titanium dioxide, *J. Opt. Soc. Am.*, 58, 1638 (1968).
346. Judd D., Ideal color space, *Color Engineering*, 8, № 2, 37 (1970).
347. Judd D., Strength and dullness, degrees of color difference (letter to the editor), *J. Color and Appearance*, 2 (№ 1), 56 (1973).
348. Judd D., Haupt G., Chamberlin G., Ideal Lovibond color system, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 66C, 121 (1962); см. также *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 813 (1962).
349. Judd D., Kelly K., Method of designating colors, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 23, 355 (1939), RP1239.
350. Judd D., MacAdam D., Wyszecki G. (with the collaboration of Budde H., Condit H., Henderson S., Simonds J.), Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 1031 (1964).
351. Judd D., Plaza L., Belknap M., A suggested relocation and respacing of the Union colorimeter scale for lubricating oil and petrolatum, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 44, 559 (1950a), RP2103.
352. Judd D., Plaza L., Farnsworth D., Tritanopia with abnormally heavy ocular pigmentation, *J. Opt. Soc. Am.*, 40, 833 (1950b).
353. Judd D., Wyszecki G., Extension of the Munsell notation system to very dark colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 46, 281 (1956).
354. Judd D., Yonemura G., CIE 1960 UCS diagram and the Müller theory of color vision, in Color 69, 1st Congress of the International Color Association, Stockholm 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, 1970, p. 266; см. также *J. Res. Natl. Bur. Std. Washington, A. Phys. Chem.*, 74A, 23 (1970).
355. Юстова Е., К вопросу о природе цветного зрения аномальных трихроматов, *ДАН СССР*, 81, 1051 (1951).
356. Kalmus H., Diagnosis and Genetics of Defective Colour Vision, Pergamon Press, Oxford, 1965.
357. Kaneko P., Hyperbolic chromatic value coordinate system, *Acta Chromatica*, 1, 51 (1963).
358. Kaneko T., A reconsideration of the Cobb-Judd lightness function, *Acta Chromatica*, 1, 103 (1964).

359. Keegan H., Schleter J., Judd D., Glass filters for checking performance of spectrophotometer-integrator systems of color measurement, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, **66A**, 203 (1962).
360. Kelly K., Instructions for determining the color names for drugs and chemicals, *Bull. Natl. Formulary Comm., Am., Pharm. Assoc.*, **8**, 359 (1940).
361. Kelly K., Color designations for lights, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, **31**, 271 (1943), RP4565; см. также *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 627 (1943).
362. Kelly K., Judd D., The ISCC — NBS Method of Designating Colors and a Dictionary of Color Names, *Natl. Bur. Std. Circ.* 553 (Nov. 1955).
363. Kelly K., Observer differences in color-mixture functions studied by means of a pair of metameric grays, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, **60**, 97 (1958), RP2825.
364. Kerker M., *The Scattering of Light*, Academic Press, New York, 1969.
365. Kinney J., Induced colors seen by a deuteranope, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 1149 (1967).
366. König A., Ueber den menschlichen Sehpurpur, und seine Bedeutung für das Sehen, Sitzber. Akad. Wiss., Berlin, 577 (June 1894); Ges. Abhandl. (Leipzig, Barth, 1903), p. 338.
367. König A., Ueber «Blaublindheit», Sitzber. Akad. Wiss., Berlin, 718 (July 1897); Ges. Abhandl. (Leipzig, Barth, 1903), p. 396.
368. König A., Dieterici C., Über die Empfindlichkeit des normalen Auges für Wellenlängenunterschiede des Lichtes, *Ann. Physik.*, **22**, 579 (1884).
369. König A., Dieterici C., Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spectrum, *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorgane*, **4**, 231 (1892); König A., Ges. Abhandl. (Leipzig, Barth, 1903), p. 214.
370. König A., Kolorimetrie mittelst Vakuumzelle und Kombinationsfilter, *Helv. Phys. Acta*, **17**, 571 (1944).
371. Korte H., Schmidt M., Über die Messung des Leuchtdichtefaktors an beliebig reflektierenden Proben, *Lichttechnik*, **19**, 135A (1967).
372. Krantz D., Visual Scaling, *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4: Visual Psychophysics, Jameson and Hurvich, Eds., Springer-Verlag, New York, 1972, Chap. 26.
373. Von Kries J., Über die anomalen trichromatischen Farbensysteme, *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorgane*, **19**, 63 (1898).
374. Von Kries J., Die Gesichtsempfindungen, Nagel's Handbuch der Physiologie des Menschen, Vol. 3 (Braunschweig, Vieweg, 1905), pp. 109—282.
375. Kruithof A., Bouma P., Hue-estimation of surface colours as influenced by the colours of the surroundings, *Physica*, **9**, 957 (1942).
376. Kubelka P., Munk F., Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, *Z. tech. Physik.*, **12**, 593 (1931).
377. Kubelka P., New contributions to the optics of intensely light-scattering materials, Part I, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 448 (1948).
378. Kubelka P., New contribution to the optics of intensely light-scattering materials. Part. II; Non-homogeneous layers, *J. Opt. Soc. Am.*, **44**, 330 (1954).
379. Kundt H., Wyszecki G., Zusammenhang zwischen Munsell und DIN-System, *Farbe*, **4**, 289 (1955).
380. Ladd-Franklin C., Eine neue Theorie der Lichtempfindungen, *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorgane*, **4**, 211 (1892).
381. Ladd-Franklin C., Change in relative brightness of whites of different physical constitution as seen in photopic and in scotopic vision, *Nature*, **48**, 517 (1893).
382. Ladd-Franklin C., *Colour and Colour Theories*, New York, Harcourt, Brace, 1929.
383. Ladd J., Pinney J., Empirical relationships with the Munsell value scale, *Proc. Inst. Radio Eng.*, **43**, 1137 (1955).

384. Lakowski P., Theory and practice of color vision testing: a review, Part 1; *Brit. J. Ind. Med.*, **26**, 173 (1969); Part 2, **26**, 265 (1969).
385. Land E., Color vision and the natural image; Parts I and II, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.*, **45**, 115, 636 (1959).
386. LeGrand Y., *Light, Colour and Vision*, Wiley, New York, 1957.
387. LeGros Clark W., Lamina pattern of the lateral geniculate nucleus considered in relation to color vision, *Doc. Ophthalmol.*, **3**, 57 (1949).
388. Lodzincki F., Experience with a transmittance-type online opacimeter for monitoring and controlling opacity, *TAPPI*, **56**, 78 (1973).
389. Lofland C., Hunter R., Distinctness-of-image gloss meter, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 499 (1959).
390. Lord M., Wright W., The investigation of eye movements, *Rep. Progr. Phys.*, **13**, 1 (1950).
391. Love R., Oglesby S., Gailey I., The relation between dye concentration and reflectance — amendments to the Kubelka-Munk equation, *J. Soc. Dyers Colourists*, **81**, 609 (1965).
392. Lovibond J., The tintometer — a new instrument for the analysis, synthesis, matching, and measurement of colour, *J. Soc. Dyers Colourists*, **3**, 186 (1887).
393. Lovibond J., On a new method of colour analysis by means of the tintometer, *J. Soc. Chem. Ind. London*, **9**, 10 (1890).
394. Lowry T., McHatton L., Further experiments on the measurement of colour, *J. Oil Colour Chemists' Assoc.*, **5**, 351 (1922).
395. MacAdam D., The specification of whiteness, *J. Opt. Soc. Am.*, **24**, 188 (1934).
396. MacAdam D., Maximum visual efficiency of colored materials, *J. Opt. Soc. Am.*, **25**, 361 (1935).
397. MacAdam D., Projective transformations of I.C.I. color specifications, *J. Opt. Soc. Am.*, **27**, 294 (1937).
398. MacAdam D., Visual sensitivities to color differences in daylight, *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 247 (1942).
399. MacAdam D., Specification of small chromaticity differences *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 18 (1943).
400. MacAdam D., The graphical representation of small color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 675 (1943).
401. MacAdam D., On the geometry of color scape, *J. Franklin Inst.*, **238**, 195 (1944).
402. MacAdam D., Colorimetric analysis of dye mixtures, *J. Opt. Soc. Am.*, **39**, 22 (1949).
403. MacAdam D., Colour discrimination and the influence of colour contrast on acuity, *Documenta Ophthalmologica*, **3**, 214 (1949).
404. MacAdam D., Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colors, *J. Opt. Soc. Am.*, **40**, 589 (1950).
405. MacAdam D., Orthogonal color-mixture functions, *J. Opt. Soc. Am.*, **44**, 713 (1954).
406. MacAdam D., Influences of chromatic adaptation on color discrimination and color perception, *Farbe*, **4**, 133 (1955a).
407. MacAdam D., Color measurement and whiteness, *TAPPI*, **38**, 78 (1955b).
408. MacAdam D., Chromatic adaptation, *J. Opt. Soc. Am.*, **46**, 500 (1956).
409. MacAdam D., Chromatic significance of spectrophotometric errors, *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 766 (1957).
410. MacAdam D., Beat-frequency hypothesis of colour perception, *Visual Problems of Colour*, Vol. II, 577 (1957), *Natl. Phys. Lab., Symp. № 8*, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
411. MacAdam D., Nonlinear relations of psychometric scale values to chromaticity differences, *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, 754 (1963).

412. MacAdam D., Smoothed versions of Friele's 1965 approximations for metric coefficients, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 1784 (1966).
413. MacAdam D., Geodesic chromaticity diagram, *Farbe*, 18, 77 (1969).
414. MacAdam D., Geodesic chromaticity diagram, *Farbe*, 19, 38 (1970).
415. MacAdam D., Geodesic chromaticity diagram based on variances of color matching by 14 normal observers, *Appl. Optics*, 10, 1 (1971).
416. MacNichol E., Svaetichin G., Electrical responses from the isolated retinas of fishes, *Am. J. Ophthalmol.*, 46, 26 (1958).
417. Mäder F., Universalmeßgerät für spektrale und integrale Licht- und Farbmessungen, *Helv. Phys. Acta*, 18, 125 (1945).
418. Maerz A., Rea Paul M., Dictionary of Color, New York, McGraw-Hill, 1930, 1950.
419. Mahr K., Über ein lichtelektrisches Spektralschablonen-Gerät für Licht- und Farbmessungen, *Farbe*, 7, 283 (1958).
420. Malkin F., Colour tolerance studies with ceramic walltiles, Colour Measurement in Industry, The Colour Group, London, 1967, p. 221.
421. Marcus R., Billmeyer F., Jr., Step size in the Munsell colour order system: I. Preliminary observations, in Colour 73, 2nd Congress of the International Colour Association, York (England), 1973, Hilger, London, 1974, p. 290.
422. Marks W., Dobelle W., MacNichol E., Jr., Visual pigments of single primate cones, *Science*, 143, 1181 (1964).
423. Maxwell J., Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour blindness, *Trans. Roy. Soc. (Edinburgh)*, 21 (Part 2), (1855); Scientific Papers, Vol. 1 (W. Niven, Ed.), Cambridge University Press, London, 1890, p. 126.
424. Maxwell J., On the theory of compound colours and the relations of the colours of the spectrum, *Proc. Roy. Soc. London*, 10, 404, 434 (1860); см. также *Phil. Mag.* (4), 21 141 (1860), и Scientific Papers (Cambridge, pp. 149, 410 (1890).
425. McCamy C., Colors perceived with abridged color projection systems, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 510 (1960).
426. McGree K., Colour confusion produced by voluntary fixation, *Optica Acta*, 7, 281 (1960).
427. McLaren K., Illuminants in color matching, *J. Soc. Dyers Colourists*, 83, 435 (1967).
428. McLaren K., Scaling factors in color difference formulas; a confusing situation, *Color Eng.* 7 (№ 6), 38 (1969).
429. McLaren K., The precision of textile color matchers in relation to color difference measurements, *Farbe*, 18, 171 (1969).
430. McLaren K., The Adams-Nickerson colour-difference formula, *J. Soc. Dyers Colourists*, 86, 354 (1970).
431. McLaren K., Colour passing — visual or instrumental, *J. Soc. Dyers Colourists*, 86, 389 (1970).
432. McLaren K., Adams-Nickerson color space and the dyer's variables of perceived color, *J. Color and Appearance*, 1 (№ 4), 17 (1972); 2 (№ 1), 56 (1973).
433. McLaren K., Coates E., the SDC recommended colour-difference formula, *J. Soc. Dyers Colourists*, 88, 28 (1972).
434. McNicholas H., The color and spectral transmittance of vegetable oils, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 15, 99 (1935), RP815; см. также *Oil Soap*, 12, 167 (1935).
435. McNicholas H., Selection of colors for signal lights, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 17, 955 (1936), RP956.
436. Mellon M., Analytical Absorption Spectroscopy, Wiley, New York, 1950.

437. Middleton W., Comparison of colorimetric results from a normal-diffuse spectrophotometer with those from a 45-degree-normal colorimeter for semiglossy specimens, *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 1141 (1953).
438. Middleton W., Holmes M., The apparent colors of surfaces of small subtense — A preliminary report, *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 582 (1949).
439. Middleton W., Mungall A., An instrument for the measurement of distinctness-of-image gloss, *Can. J. Technol.*, 31, 160 (1953).
440. Miles W., Entopic plotting of the macular area, Minutes and Proc., 14th Meeting, Army-Navy-OSR Vision Committee (September 1945).
441. Moon P., A table of Fresnel reflection, *J. Math. Phys.*, 19, 1 (1940).
442. Moon P., Spencer D., A metric for color space, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 260 (1943).
443. Moon P., Spencer D., A metric based on the composite color stimulus, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 270 (1943).
444. Moon P., Spencer D., Geometric formulation of classical color harmony, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 46 (1944).
445. Moon P., Spencer D., Area in color harmony, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 93 (1944).
446. Moon P., Spencer D., Aesthetic measure applied to color harmony, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 234 (1944).
447. Moon P., Spencer D., A survey of colors for industry, *Illum. Eng.*, 45, 39 (1950).
448. Moreland J., On demonstrating the blue arcs phenomenon, *Vision Res.*, 8, 99 (1968).
449. Moreland J., The mechanism of the blue-arc phenomenon, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 188.
450. Moreland J., Peripheral color vision, Handbook of Sensory Physiology, Vol. VII/4, Visual Psychophysics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972, p. 517.
451. Mori L., A photoelectric colorimeter with \bar{s} -three-filters for direct reading of x , y , Y ; *J. Illum. Eng. Inst. Japan*, 42, 108 (1958).
452. Mori L., Formulation of whiteness degree based on color difference from estimated preferred white, *Acta Chromatica*, 2, 25 (1969).
453. Mori N., Nayatani Y., Tsujimoto A., Ikeka J., Namba S., An appraisal of two-color harmony by paired comparison method (Part I), *Acta Chromatica*, 1, 221 (1967).
454. Morley D., Halstead M., Palmer D., Stainsby A. Subjective assessments of colour-rendering indices, in Colour 73, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973, Hilger, London, 1973, p. 359.
455. Morren L., Mesure absolue des facteurs de luminance et de réflexion, *Lux*, № 45, 3 (1967).
456. Morton T., Optical studies, fluorescent whitening agents on textiles; elementary optical theory and its practical implications, *J. Soc. Dyers Colourists*, 79, 238 (1963).
457. Motokawa K., Physiology of Color and Pattern Vision, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1970.
458. Motokawa K., Taira N., Okuda J., Spectral responses of single units in the primate visual cortex, *Tohoku J., Exptl. Med.*, 78, 320 (1962).
459. Mudd J., Correlation of color tolerance determination with average observer assessments II, *Soc. Leather Trades Chem.*, 48, 452 (1964).
460. Mudd J., Woods M., Colour difference measurement, *J. Oil Col. Chem. Ann.*, 53, 852 (1970).
461. Mudgett P., Richards L., Multiple scattering calculations for technology, *Appl. Optics*, 10, 1485 (1971).
462. Mudgett P., Richards L., Multiple scattering calculations for technology, II, *J. Coll. Interface Sci.*, 39, 551 (1972).

463. Müller G., Über die Farbenempfindungen, *Z. Psychol. Ergänzungs.*, 17, and 18 (1930).
464. Münch W., Zum Begrifflichen und zur Kennzeichnungsmöglichkeit der Farbwiedergabe durch Lichtquellen, *Farbe*, 9, 143 (1960).
465. Münch W., Das neue CIE — Testfarbenverfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 717.
466. Münch W., Verhaltensmerkmale von Licht- und Körperfarben auf einheitlicher Bewertungsgrundlage, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 811.
467. Münch W., Schultz U., Bestimmung der Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen nach einem vereinfachten Testfarbenverfahren, *Lichttechnik*, 15, 269 (1960).
468. Munsell A., Sloan L., Godlove I., Neutral value scales I, Munsell neutral value scale, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 394 (1933).
469. Munsell A., A Color Notation, 1st ed., Boston Ellis, 1905; 9th ed., Baltimore, Munsell Color Co., 1941.
470. Naka K., Rushton W., S-potential from colour units in the retina of fish (Cyprinidae), *J. Physiol. (London)*, 185, 536 (1966).
471. Naka K., Rushton W., An attempt to analyse colour reception by electrophysiology, *J. Physiol. (London)*, 185, 556 (1966).
472. Naka K., Rushton W., S-potentials from luminosity units in the retina of fish (Cyprinidae), *J. Physiol. (London)*, 185, 587 (1966).
473. Nayatani Y., An analysis of affective values on three-color harmony by the semantic differential method, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 1073.
474. Nayatani Y., Individual differences on the qualities associated by people with two-color combinations, *Farbe*, 19, 195 (1970).
475. Nayatani Y., Hitani M., Minato H., Chromaticity and spectral energy distribution of daylight from north sky at Amagasaki, Japan, *Bull. Electrotech. Lab.*, 31, 55 (1967).
476. Nayatani Y., Kurioka Y., Sobagaki H., Color-matching properties of fluorescent lamps with different values of the general color-rendering index, *Bull. Electrotechn. Lab. (Tokyo)*, 35, 1028 (1971).
477. Nayatani Y., Kurioka Y., Sobagaki H., Studies on color rendering and illuminant metamerism, Part 1, *Acta Chromatica*, 2, 79 (1971); Part 2, *Acta Chromatica*, 2, 86 (1971).
478. Nayatani Y., Kurioka Y., Sobagaki H., Color-matching properties of test illuminants with the general color-rendering index of $R_a = 100$ and with different values of correlated color temperature, *Acta Chromatica*, 2, 101 (1972).
479. Nayatani Y., Takahama K., Studies on color rendering and metamerism, *Acta Chromatica*, 2, 97 (1971).
480. Nayatani Y., Tsujimoto A., Ikeda J., Namba S., An appraisal of two-color harmony by paired comparison method (Part 2), *Acta Chromatica*, 2, 1 (1969).
481. Neugebauer H., Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks, *Z. wiss. Photogr.*, 36, 73 (1937).
482. Neugebauer H., Über die farbmetrische Normung, *Z. wiss. Photogr.*, 44, 193 (1949).
483. Newhall S., The control of eyelid movements in visual experiments, *Am. J. Psychol.*, 44, 562 (1932).
484. Newhall S., The ratio method in the review of the Munsell colors, *Am. J. Psychol.*, 52, 394 (1939).

485. Newhall S., Preliminary report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 30, 617 (1940).
486. Newhall S., Brennan J., The ISCC Comparative List of Color Terms, Inter-Society Color Council, 1949; (Present Secretary of ISCC, Prof. F. W. Billmeyer, Jr., Department of Chemistry, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 12181, U.S.A.).
487. Newhall S., Nickerson D., Judd D., Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 385 (1943).
488. Newton I., Opticks, London, Innys, 1730, pp. 134—137.
489. Nickerson D., A colorimeter for use with disc mixture, *J. Opt. Soc. Am.*, 21, 640 (1931).
490. Nickerson D., The specification of color tolerances, *Textile Res.*, 6, 509 (1936).
491. Nickerson D., Color measurement and its application to the grading of agricultural products. A handbook on the method of disk colorimetry, *U. S. Dept. Agr. Misc. Pub.*, 580, 1—62 (March 1946).
492. Nickerson D., Interrelation of color specifications, *Paper Trade J.*, 125, TS219 (1947).
493. Nickerson D., Munsell renotations used to study color space of Hunter and Adams, *J. Opt. Soc. Am.*, 40, 85 (1950).
494. Nickerson D., Tables for use in computing small color differences, *Am. Dyestuff Repr.*, 39, 541 (Aug. 1950).
495. Nickerson D., Measurement and specification of color rendition properties of light sources, *Illum. Eng.* 53, 77 (1958).
496. Nickerson D., Light sources and color rendering, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 57 (1960).
497. Nickerson D., Jerome C., Color rendering of light sources: CIE method of specification and its application, *Illum. Eng.*, 60, 262 (1965).
498. Nickerson D., Judd D., Wyszecki G., Über eine Transformation des Normalensystems in ein empfindungsgemäss gleichabständiges System auf der Grundlage des Munsell-Systems, *Farbe*, 4, 285 (1955).
499. Nickerson D., Newhall S., A psychological color solid, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 419 (1943).
500. Nickerson D., Stultz K., Color tolerance specification, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 550 (1944).
501. Nimeroff I., Analysis of goniophotometric reflection curves, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 48, 441 (1952), RP2335.
502. Nimeroff I., Propagation of errors in spectrophotometric colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 531 (1953).
503. Nimeroff I., Two-parameter gloss methods, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 58, 127 (1957), RP2744.
504. Nimeroff I., Propagation of errors in tristimulus colorimetry, *J. Opt. Soc. Am.*, 47, 697 (1957).
505. Nimeroff I., Field trial of the 1959 CIE supplementary standard observer proposal, *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 696 (1964).
506. Nimeroff I., Deuteranopic convergence point, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 966 (1970).
507. Nimeroff I., Hammond H. III, Richmond J., Crandall J., Specular-gloss measurement of ceramic materials, *J. Am. Ceramic Soc.*, 39, 103 (1956).
508. Nimeroff I., Wilson S., A colorimeter for pyrotechnic smokes, *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 52, 195 (1954), RP2488.
509. Nimeroff I., Yurow J., Degree of metamerism, *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 185 (1965).
510. Nolan P., The calculation of the spectral reflectivity of dyed handsheets, *Paper Trade J.*, 105, TS42 (Sept. 1937).
511. Nordman L., Paperin opasiteetti ja siihen vaikuttarin tekijöitä (Opacity of paper and factors affecting opacity), Meddelanden Fran Industrins, Central-

- laboratorium Teollisuuden Keskuslaboratorion Tiedonantoja, 72, *Suomen Paperi-Puutavara-lehti*, 18, 328 (1949); *Lähetetty*, 23, 4 (1949).
512. Nuberg N., Yustova E., Researches on dichromatic vision and the spectral sensitivity of the receptors of trichromats, *Visual Problems of Colour*, Vol. II, 475 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
513. Ooba N., Note on the photometry of fluorescent materials, *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 879 (1963).
514. OSA, Committee on Colorimetry, Optical Society of America, *The Science of Color*, New York, Thomas Y. Crowell Comp., 1953.
515. Osborn R., Kenyon W., A general method of color grading, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 18, 523 (1946).
516. Ostwald W., *Colour Science*, London, Winsor and Newton, 1931.
517. Ouweltjes J., The specification of colour rendering properties of fluorescent lamps, *Farbe*, 9, 207 (1960).
518. Ouweltjes J., Chromatic adaptation and the specification of the colour rendering properties of light sources, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 739.
519. Ouweltjes J., Chromatic adaptation and colour rendering of light sources, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 824.
520. Ouweltjes J., The general colour-rendering index, its meaning and its use, in *Color 73*, 2nd Congress of the International Colour Association, York, 1973, Hilger, London, 1973, p. 362.
521. Park R., Stearns E., Spectrophotometric formulation, *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 112 (1944).
522. Parra F., Seuils différentiels de couleur, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 727.
523. Patrick R., Some factors affecting the opacity, color, and color stability of titania-opacified enamels, *J. Am. Ceramic Soc.*, 34, 96 (1951).
524. Pearson D., Rubinstein C., Range of perceived hues in two-primary projections, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 1398 (1970).
525. Pearson D., Rubinstein C., Spivack G., Comparison of perceived color in two-primary computer-generated artificial images with predictions based on the Helson-Judd formulation, *J. Opt. Soc. Am.*, 59, 644 (1969).
526. Perry J., The objective measurement of color, *J. Sci. Instr.*, 15, 270 (1938).
527. Persoz B., La détermination des couleurs, *Peintures, pigments, vernis.*, 21, 329 (1945).
528. Physical Society (London), A Report on Defective Colour Vision in Industry, Physical Society, London, 1964.
529. Pitt F., Characteristics of dichromatic vision, Med. Res. Council, Rep., Committee Physiol. Vision XIV; Spec. Rep. Ser. № 200, London, 1935.
530. Pitt F., The CIE colour difference formula applied to photographic colour reflection prints, *Colour Measurement in Industry*, The Colour Group, London, 1967, p. 234.
531. Von Planta P., Die Häufigkeit der angeborenen Farbensinnstörungen bei Knaben und Mädchen und ihre Feststellung durch die üblichen klinischen Proben, *Arch. Ophthalmol.*, *Kbh.*, 120, 253 (1928).
532. Plateau J., Sur la mesure physique des sensations, et sur la loi qui lie l'intensité de ces sensations à l'intensité de la cause excitante, *Bull. Acad. roy. Belg.*, 33 (Ser. 2), 376 (1872).
533. Polyak S., *The Retina*, Chicago, The University of Chicago Press, 1941.
534. Polyak S., Retinal structure and color vision, *Documenta Ophthalmologica*, 3, 24 (1949).
535. Pope A., *The Language of Drawing and Painting*, Cambridge, Harvard University Press, 1949.

536. Poppelreuter W., Die psychischen Schädigungen durch Kopfschuss im Kriege, Leipzig, Voss, 1917—1918; см. также *Z. ges. Neurol. Psychiat.*, 83, 26 (1923).
537. Pringsheim P., *Fluorescence and Phosphorescence*, Interscience, New York, 1948 (3rd printing, 1965).
538. Priest I., A proposed scale for use in specifying the chromaticity of incandescent illuminants and various phases of daylight, *J. Opt. Soc. Am.*, 23, 41 (1933).
539. Priest I., Gibson K., McNicholas H., An examination of the Munsell color system. I. Spectral and total reflection and the Munsell scale of value, *Natl. Bur. Std. Tech. Paper*, 167 (1920), T167.
540. Purdy D., The Bezold-Brücke phenomenon and contours for constant hue, *Am. J. Psychol.*, 49, 313 (1937).
541. Richardson L., Quantitative mental estimates of light and colour, *Brit. J. Psychol.*, 20, 27 (1929).
542. Richardson L., The measurability of sensations of hue, brightness or saturation, Report of a Joint Discussion on Vision, Physical and Optical Societies, June 1932, Cambridge University Press, 1932, p. 112.
543. Richter K., Gütebewertung des Strahldichteangleichs an die Normlichtart D65, *Lichttechnik*, 24, 370 (1972).
544. Richter M., Das System der DIN-Farbenkarte, *Farbe*, 1, 85 (1953a).
545. Richter M., Ausführungsform der DIN-Farbenkarte, *Farbe*, 1, 122 (1953b).
546. Richter M., The official German Standard Color Chart, *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 223 (1955).
547. Richter M., Grenzmuster-Tafeln auf der Grundlage des Farbensystems der DIN-Farbenkarte, *Farbe*, 3, 157 (1955).
548. Richter M., Die Beziehung zwischen den Farbmazzahlen nach DIN 6164 und den Ostwald-Mazzahlen, *Farbe*, 6, 49 (1957).
549. Richter M., Remissionskurven bedingt-gleicher Farben, *Farbe*, 7, 163 (1958).
550. Riggs L., Armington J., Ratliff F., Motions of the retinal image during fixation, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 315 (1954).
551. Riggs L., Ratliff F., Cornsweet J., Cornsweet T., The disappearance of steadily fixated visual test objects, *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 495 (1953).
552. Ripps H., Weale R., Cone pigments in the normal human fovea, *Vision Res.*, 3, 531 (1963).
553. Ripps H., Weale R., The photophysiology of vertebrate color vision, in *Photophysiology*, Vol. V (A. Giese, Ed.), Academic Press, New York, 1970, p. 127.
554. Robertson A., Colorimetric significance of spectrophotometric errors, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 691 (1967).
555. Robertson A., A new determination of lines of constant hue, in *Color 69*, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 395.
556. Robertson A., Staniforth A., Gignac D., McDougall J., A computer-controlled photoelectric tristimulus colorimeter, NRC report PRO-387, Ottawa, Sept. 1972.
557. Robinson D., Acceptability of color matches, *J. Oil. Col. Chem. Assoc.*, 82, 15 (1969).
558. Rohner E., Der Pretema Color Computer FR-1, Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 865.
559. Rösch S., Darstellung der Farbenlehre für die Zwecke des Mineralogen, *Fortschr. Mineral.*, *Krist. Petrogr.*, 13, 143 (1929).
560. Rosemann J., Farbmessungen zur Prüfung des Schrödingerschen Linienelementes der höheren Farbenmetrik, *Ann. Physik*, 32 (V), 640 (1938).

561. Rubinstein C., Pearson D. Color perception in colored displays, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 1, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 157.
562. Ruddock K., The physics of colour vision, *Contemp. Phys.*, **12**, 229 (1971).
563. Rushton W., The cone pigments of the human fovea in colour blind and normal, *Visual Problems of Colour*, **1**, 71 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
564. Ryde J., Cooper B., The scattering of light by turbid media, *Proc. Roy. Soc. London*, **A131**, 451 (1931).
565. Saltzman M., Keay A., Colorant identification; Fundamentals and Problems of Color, II. Analytical Aspects of Color, *J. Paint Technol.*, **39**, 360 (1967).
566. Sanders C., Color preferences for natural objects, *Illum. Eng.*, **54**, 452 (1954).
567. Sanders C., Comparison of binocular colour matches with the matches expected from the trichromatic theory of vision, *Farbe*, **4**, 172 (1955).
568. Sanders C., Gaw W., A versatile spectroradiometer and its application, *Appl. Optics*, **6**, 1639 (1967).
569. Sanders C., Wyszecki G., Correlate for lightness in terms of CIE-tristimulus values, Part I, *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 398 (1957); Part II, *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 840 (1957).
570. Sanders C., Wyszecki G., L/Y ratios in terms of CIE-chromaticity coordinates, *J. Opt. Soc. Am.*, **48**, 389 (1958).
571. Saris H., Erfahrungen mit Farbzepturberechnung bei der Lackherstellung, in Color 69, 1st Congress of International Colour Assoc., Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 901.
572. Sastri V., Das S., Spectral distribution and color of north sky at Delhi, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 829 (1966).
573. Sastri V., Das S., Typical spectral distributions and color for tropical daylight, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 391 (1968).
574. Sato M., Hioki R., Modification of the (U*V*W*) system, *J. Opt. Soc. Am.*, **59**, 349 (1969).
575. Saunderson J., Calculation of the color of pigmented plastics, *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 727 (1942).
576. Saunderson J., Milner B., Further study of omega space, *J. Opt. Soc. Am.*, **34**, 167 (1944).
577. Saunderson J., Milner B., Modified chromatic value color space, *J. Opt. Soc. Am.*, **36**, 36 (1946).
578. Sawyer R., Hiding power and opacity, Symposium on Color, Philadelphia, America, Society for Testing Materials, 1941, p. 23.
579. Scheibner H., Untersuchungen zur Farbumstimmung des menschlichen Auges, *Farbe*, **12**, 6 (1963).
580. Scheibner H., Adaptive color shifts, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 938 (1966).
581. Scheibner H., Boynton R., Residual red-green discrimination in dichromats, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 1151 (1968).
582. Schmid H., Strocka D., Möglichkeiten zur Anpassung der Farbzepturberechnung an die Forderungen der Praxis, Proc. XIth FATIPEC Congress 1972, p. 163, Edizioni Ariminum S.r.l., Milan, 1972.
583. Schober H., Die Versuche von E. Land und die gegenwärtigen Theorien des Farbsehens, *Umschau. Wiss. Techn.*, **4**, 257 (1960).
584. Schofield R., The Lovibond tintometer adapted by means of the Rothamsted device to measure colours on the CIE system, *J. Sci. Instr.*, **16**, 74 (1939).
585. Schönfelder W., Der Einfluss des Umfeldes auf die Sicherheit der Einstellung von Farbgleichungen, *Z. Sinnesphysiol.*, **63**, 228 (1933).
586. Schreckendgust J., Evaluation of low gloss finishes with 85° sheen measurements, *Offic. Dig. Federation Soc. Paint Technol.*, **36**, 356 (1964).

587. Schreckendgust J., Gowing D., High-speed, direct-reading glossmeter, *J. Opt. Soc. Am.*, **48**, 241 (1958).
588. Schrödinger E., Theorie der Pigmente von grösster Leuchtkraft, *Ann. Physik*, **62**, 603 (1920).
589. Schrödinger E., Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen, *Ann. Physik (IV)*, **63**, 481 (1920).
590. Schrödinger E., Über das Verhältniss der Vierfarben zur Dreifarben-theorie, *Sitzber., Akad. Wiss. (Wien)*, Abt. IIa, **134**, 471 (1925).
591. Schuster A., Radiation through a foggy atmosphere, *Astrophys. J.*, **21**, 1 (1905).
592. Scofield F., Judd D., Hunter R., A proposed method of designating color, *ASTM Bull.*, p. 19 (May 1941).
593. Scofield F., A method for determination of color differences, *Natl. Paint, Varnish, Lacquer Assoc. Sci. Sec. Circ.*, 664 (July 1943).
594. Selling H., New applications of colour measurement in the dyeing of wool, *J. Soc. Dyers Colourists*, **63**, 619 (1947).
595. Selling H., The prediction of dye formulae and the bluing of white papers, *Paper Maker*, **120**, 418 (1950).
596. Selling H., Friele L., Whiteness relations and their applications, *Appl. Sci. Res. B1*, 453 (Vezelinstituut T.N.O., Delft, 1950).
597. Semmelroth C., Prediction of lightness and brightness on different backgrounds, *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 1685 (1970).
598. Semmelroth C., Adjustment of the Munsell-value and W*-scale to uniform lightness steps for various background reflectances, *Appl. Opt.*, **10**, 14 (1971).
599. Seve R., Le repérage des blancs, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 585.
600. Shureliff W., Curve shape index for identification by means of spectrophotometric curves, *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 160 (1942).
601. Silberstein L., The transparency of turbid media, *Phil. Mag. (Series 7)*, **4**, 1291 (1927).
602. Silberstein L., A fundamental criterion of uniform representability of equi-luminous colors on a geometrical surface, *J. Opt. Soc. Am.*, **32**, 552 (1942).
603. Silberstein L., Investigations on the intrinsic properties of the color domain, II, *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 1 (1943).
604. Silberstein L., The complete, three-dimensional colour domain and its metrics, *Phil. Mag.*, (VII), **37**, 126 (1946).
605. Silberstein L., MacAdam D., The distribution of color matchings around a color center, *J. Opt. Soc. Am.*, **35**, 32 (1945).
606. Simon F., Small color difference computation and control, *Farbe*, **10**, 225 (1961).
607. Simon F., Color formulation and control in the vinyl fabric industry, *Industrial Color Technology, Advances in Chemistry Series 107*, Am. Chem. Soc., Washington, 1971, p. 119.
608. Simon F., Industrial color tolerances by xi-eta formula, in *Color Metrics*, Driebergen, The Netherlands, 1971 (J. Vos. L. Friele, and P. Walraven, Eds.), p. 308; AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, Holland, 1972.
609. Sloan L., Wollach L., A case of unilateral deuteranopia, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 502 (1948).
610. Smith T., The hiding power of diffusing media, *Trans. Opt. Soc. London*, **33**, 150 (1931-1932).
611. Smolkin M., Berdnikov N., Zaytsev L., The emission spectrum of xenon lamps, *Opt. Technol.*, **38**, 241 (1971).
612. Сперанская Н., Определение спектральных координат цвета у 27 наблюдателей с нормальным цветовым зрением, *Оптическая спектрография*, **7**, 424 (1959).

613. Stearns E., Spectrophotometry and the colorist, *Am. Dyestuff Repr.*, **33**, 1 (1944).
614. Stearns E., Measurement of dye strengths, *Am. Dyestuff Repr.*, **39**, 358 (May 29, 1950).
615. Stearns E., Applications of ultraviolet and visual spectrophotometric data, *Analytical Absorption Spectroscopy* (M. Mellon, Ed.), Wiley, New York, 1950, Chap. 7.
616. Stearns E., *The Practice of Absorption Spectrophotometry*, Wiley-Interscience, New York, 1969.
617. Stearns E., Noechel F., Spectrophotometric prediction of color of wool blends, *Am. Dyestuff Repr.*, **33**, 177 (1944).
618. Steele F., The optical characteristics of paper. I. The mathematical relationships between basis weight, reflectance, contrast ratio and other optical properties, *Paper Trade J.*, **100**, 37, TS151 (March 1935).
619. Steele F., The optical characteristics of paper. III. The opacifying power of fibers and fillers, *Paper Trade J.*, **104**, TS157 (Feb. 1937).
620. Stenius A., The application of the Kubelka-Munk theory to the diffuse reflection of light from paper. I. *Svensk Papperstidn.*, **54**, 663 (1951); II, **54**, 701 (1951); III, **56**, 607 (1953).
621. Stenius A., Scan-test brightness measuring system, *TAPPI*, **48**, 45A (1965).
622. Stenius A., Fluorescence in Paper, *J. Color and Appearance*, **1**, 8 (Sept. 1972).
623. Per Stensby S., Optical brighteners and their evaluation, *Soap Chem. Specialties*, **43**, 41, 84 (1967).
624. Stevens S., Matching functions between loudness and ten other continua, *Perc. Psychophys.*, **1**, 5 (1966).
625. Stiles W., The directional sensitivity of the retina and the spectral sensitivities of the rods and cones, *Proc. Roy. Soc. London*, **B 127**, 64 (1939).
626. Stiles W., A modified Helmholtz line element in brightness-colour space, *Proc. Phys. Soc. London*, **58**, 41 (1946).
627. Stiles W., The determination of the spectral sensitivities of the retinal mechanisms by sensory methods, *Ned. T. Natuurk.*, **15**, 125 (1949).
628. Stiles W., Further studies of visual mechanisms by the two-color threshold method, *Colog. Prob. Opticos Vision (Madrid)*, **1**, 65 (1953).
629. Stiles W., Remarks on the line-element, *Farbe*, **4**, 275 (1955).
630. Stiles W., 18th Thomas Young oration; The basic data of colour-matching, *Phys. Soc. Year Book*, **44** (1955).
631. Stiles W., Color vision: The approach through increment-threshold sensitivity, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **45**, 100 (1959).
632. Stiles W., Burch J., Interim report to the Commission Internationale de l'Eclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching (1955), *Optica Acta*, **2**, 168 (1955).
633. Stiles W., Burch J., N.P.L. Colour-matching investigation final report (1958), *Optica Acta*, **6**, 1 (1959).
634. Stiles W., Wyszecki G., Field trials of color-mixture functions, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 58 (1962).
635. Stiles W., Wyszecki G., Counting metameric object colors, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 313 (1962).
636. Stiles W., Wyszecki G., Intersections of the spectral reflectance curves of metameric object colors, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 32 (1968).
637. Stiles W., Wyszecki G., Rod intrusion in large-field color matching, *Acta Chromatica*, **2**, 155 (1973).
638. Stokes G., On the change of refrangibility of light, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, p. 463 (1852).
639. Stokes G., On the intensity of light reflected from or transmitted through a pile of plates, *Proc. Roy. Soc. London*, **11**, 545 (1860—1862).
640. Strocka D., Farbzepturberechnung in Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 3rd ed., Suppl. Vol., Urban and Schwarzenberg, Munich, 1970, p. 233.
641. Strocka D., Brockes A., Comparison of the CIE (1931) 2° and the CIE (1954) 10° colorimetric standard observer with individual observers in the assessment of metameric matches, in Color 69, 1st Congress of the International Colour Association, Stockholm, 1969, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1970, p. 785.
642. Strogies W., Thomesheit A., Klischeeberechnung für den autotypischen Druck nach Neugebauer, Intern. Colour Meeting, Lucern, 1965, Vol. 2, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 871.
643. Sugiyama Y., Fukuda T., Comparison of different U. C.S. by using MacAdam Ellipses and Munsell scales, *J. Appl. Phys. Japan*, **28**, 157 (1959).
644. Sugiyama Y., Fukuda T., Rank correlations of various formulas for whiteness, *J. Appl. Phys. Japan*, **29**, 480 (1960).
645. Sundstrom F., Stearns E., Practical art of color matching in paper, *Paper Mill News* (July 1950).
646. Svaetichin G., MacNichol E., Jr., Retinal mechanisms of chromatic and achromatic vision, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **74**, 385 (1958).
647. Taguti R., Sato M., Exponential color coordinate system, *Acta Chromatica*, **1**, 19 (1962); см. также **1**, 59 (1963).
648. Takahama K., Nayatani Y., New method for generating metameric stimuli of object colors, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 1516 (1972).
649. Takasaki H., Lightness change of grays induced by change in reflectance of gray background, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 504 (1966).
650. Takasaki H., Chromatic changes induced by changes in chromaticity of background of constant lightness, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 93 (1967).
651. Tarrant A., The spectral power distribution of daylight, *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **33**, 75 (1968).
652. Terstiege H., Untersuchungen zum Persistenz- und Koeffizientensatz, *Farbe*, **16**, 1 (1967).
653. Thielert R., Schliemann G., Visual impression of whiteness and its colorimetric definition, *J. Opt. Soc. Am.*, **63**, 1607 (1973).
654. Thomas D., An artificial daylight source for the assessment of non-fluorescent colour, *J. Sci. Instr. (J. Phys. E)*, Series 2, **2**, 1139 (1969).
655. Thomson L., Wright W., The convergence of the tritanopic confusion loci and the derivation of the fundamental response functions, *J. Opt. Soc. Am.*, **43**, 890 (1953).
656. Thomson P., Methods of reading color without Lovibond glasses, *J. Am. Oil Chemists' Soc.*, **24**, 387 (1947).
657. Thurner K., Walther V., Untersuchungen zur Korrelation von Farbabstandsbewertungen auf visuellem Wege und über Farbdifferenzformeln, *Farbe*, **18**, 191 (1969).
658. Tilleard D., Some applications of the Davidson and Hemmendinger Colorant Mixture Computer to paints and plastics, *J. Soc. Dyers Colourists*, **79**, 590 (1963).
659. Tomita T., Electrical activity in the vertebrate retina, *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, 49 (1963).
660. Tomita T., Kaneko A., Murakami M., Pautler E., Spectral response curves of single cones in the carp, *Vision Res.*, **7**, 519 (1967).
661. Trezona P., A new method of large field colour matching leading to a more additive metric, In Color Metrics (J. Vos., L. Friele, and P. Walraven, Eds.), AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, 1972, p. 36.
662. Urbain W., Roschen H., The absorption spectra of the F.A.C. color standards, *Oil. Soap*, **16**, 124 (1949).

663. U. S. Federal Communications Commission, Rules Governing Television Broadcast Stations, Section 3.681, December 1953.
664. Vaeck S., New method of whiteness determination: correlation with independent visual gradings, *Ann. Sci. Textiles Belges*, 1, 95 (1966).
665. Valberg A., Nonlinear chromatic colour induction, *Farbe*, 19, 283 (1970).
666. Van den Akker J., Chromaticity limitations of the best physically realizable three-filter photoelectric colorimeter, *J. Opt. Soc. Am.*, 27, 401 (1937).
667. Van den Akker J., Scattering and absorption of light in paper and other diffusing media, *TAPPI*, 32, 498 (1949).
668. Vickerstaff T., Tough D., The quantitative measurement of light fastness, *J. Soc. Dyers Colourists*, 65, 606 (1949).
669. Völz H., Ein Beitrag zur phänomenologischen Theorie lichtstreuender und-lichtabsorbierender Medien, Congrès FATIPEC VI, 98, 1962; Teil II: Möglichkeiten zur experimentellen Bestimmung der Konstanten, Congrès FATIPEC VII, 194, 1964.
670. Vos J., Walraven P., An analytical description of the line element in the zone-fluctuation model of colour vision — I. Basic concepts, *Vision Res.*, 12, 1327 (1972).
671. Vos J., Walraven P., An analytical description of the line element in the zone-fluctuation model of colour vision — II. The derivation of the line element, *Vision Res.*, 12, 1345 (1972).
672. Vos J., Walraven P., A zone-fluctuation line element describing colour discrimination, Color Metrics, Driebergen, The Netherlands, 1971 (J. Vos., L. Friele, P. Walraven., Ed.), AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, 1972.
673. Waaler G., Ueber die Erblichkeitsverhältnisse der verschiedenen Arten von angeborener Rotgrünblindheit, *Acta Ophthalmol.*, Kbh., 5, 309 (1927); см. также *Z. indukt. Abstamm. Vererbungslehre*, 45, 279 (1927).
674. Wagner H., Valenzmetrische Untersuchungen der Farbumstimmung, *Farbe*, 17, 229 (1968).
675. Wagner H., MacNichol E., Wolbarsht M., The response properties of simple ganglion cells in the goldfish retina, *J. Gen. Physiol.*, 43 (Suppl.), 45 (1960).
676. Wagner H., MacNichol E., Wolbarsht M., Functional basis for «on»-center and «off»-center receptive fields in the retina, *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 66 (1963).
677. Wald G., Human vision and the spectrum, *Science*, 101, 653 (June 29, 1945).
678. Wald G., The photochemistry of vision, *Doc. Ophthalmol.*, 3, 94 (1949).
679. Wald G., Retinal chemistry and the physiology of vision, Visual Problems of Colour, Vol. 1, 7 (1957), Natl. Phys. Lab., Symp. № 8, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
680. Wald G., Blue-blindness in the normal eye, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 1289 (1967).
681. Walls G., «Land! Land!», *Psychol. Bull.*, 57, 29 (1960).
682. Walls G., Notes on four tritanopes, *Vision Res.*, 4, 3 (1964).
683. Walraven P., A zone theory of colour vision, Proc. Intern. Colour Meeting, Lucern 1965, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Germany, 1966, p. 137.
684. Walraven P., A uniform chromaticity diagram based upon a square-root transformation of the colour space, Proc. Comm. Intern. Eclairage, 16th Session, Vol. A., p. 106, Washington, 1967; CIE Publ. № 14A (1968), Bureau Central de la CIE, 4 Av. du Recteur Poincaré, 75782 Paris Cedex 16, France.
685. Walraven P., Bouman M., Fluctuation theory of colour discrimination of normal trichromats, *Vision Res.*, 6, 567 (1966).
686. Ward R., Daylight fluorescent pigments, inks, paints and plastics, *J. Color and Appearance*, 1, 15 (Sept. 1972).

687. Wassef E., Application of the binocular matching method to the study of the subjective appearance of surface colours, *Optica Acta*, 2, 144 (1955).
688. Wassef E., Investigation into the theory of prediction of the appearance of colours and its bearing on the theory of colour vision, *Optica Acta*, 5, 101 (1958).
689. Wassef E., Linearity of the relationship between the tristimulus values of corresponding colours seen under different conditions of chromatic adaptation, *Optica Acta*, 6, 378 (1959).
690. Wassef E., Aziz E., Changes in the position of the invariant colours with the state of adaptation of the eye, *Optica Acta*, 7, 341 (1960).
691. Wentworth J., Color Television Engineering, McGraw-Hill, New York, Book Co., 1955, p. 123.
692. Wiesel T., Hubel D., Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey, *J. Neurophysiol.*, 29, 115 (1966).
693. Willmer E., Wright W., Colour sensitivity of the fovea centralis, *Nature*, 156, 119 (1945).
694. Wilson M., Brocklebank R., Two-color projection phenomena, *J. Photogr. Sci.*, 8, 141 (1960).
695. Wilson M. Brocklebank R., Colour and perception: the work of Edwin Land in the light of current concepts, *Contemp. Phys.*, 3, 91 (1964).
696. Winch G., The physical eye photometer, colorimeter and spectrophotometer, *Instr. Practice*, Jan. 1951.
697. Winch G., Boshoff M., Kok C., DuToit A., Spectroradiometric and colorimetric characteristics of daylight in the southern hemisphere: Pretoria, South Africa, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 456 (1966).
698. Winch G., Palmer E., A direct reading photoelectric trichromatic colorimeter, *Trans. Illum. Eng. Soc. London*, 2, 137 (1937).
699. Wright H., Sanders C., Gignac D., Design of glass filter combinations for photometers, *Appl. Optics*, 8, 2449 (1969).
700. Wright H., Wyszecki G., Field trial of 10° color-mixture functions, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 647 (1960).
701. Wright W., A trichromatic colorimeter with spectral primaries, *Trans. Opt. Soc. London*, 29, 225 (1927—1928).
702. Wright W., A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colors, *Trans. Opt. Soc. London*, 30, 141 (1928—1929).
703. Wright W., The measurement and analysis of colour adaptation phenomena, *Proc. Roy. Soc. London*, B115, 49 (1934).
704. Wright W., The breakdown of colour match with high intensities of adaptation, *J. Physiol.*, 87, 23 (1936).
705. Wright W., The sensitivity of the eye to small colour differences, *Proc. Phys. Soc. London*, 53, 93 (1941).
706. Wright W., The graphical representation of small color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 33, 632 (1943).
707. Wright W., The characteristics of trianopia, *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 509 (1952).
708. Wright W., The Measurement of Colour, 4th ed., London, Hilger, 1969.
709. Wright W., Small-field trianopia, a re-assessment, Visual Science, Proc. 1968 Intern. Symp. (J. Pierce and J. Levene, Eds.), Indiana University Press, Bloomington, London, 1971, p. 152.
710. Wyszecki G., Valenzmetrische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen normaler und anomaler Trichromasie, *Farbe*, 2, 39 (1953).
711. Wyszecki G., Beitrag zur valenzmetrischen Untersuchung der Umstimmung, *Farbe*, 3, 93 (1954).
712. Wyszecki G., Invariance of insidedness in projective transformations of the Maxwell triangle, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 524 (1954).
713. Wyszecki G., A regular rhombohedral lattice sampling of Munsell renotation space, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 725 (1954).

714. Wyszecki G., A graphical interpretation of a three-components theory of chromatic adaptation in terms of the CIE chromaticity diagram, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 787 (1954).
715. Wyszecki G., Soll-Farbe und zugehörige Grenzfarben, *Farbe*, 3, 151 (1955).
716. Wyszecki G., On projective transformations of the CIE-chromaticity diagram, *J. Opt. Soc. Am.*, 46, 982 (1956).
717. Wyszecki G., Evaluation of metameric colors, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 451 (1958).
718. Wyszecki G., A measure for the total difference of two sets of color-mixture functions, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 811 (1959).
719. Wyszecki G., Propagation of errors in colorimetric transformations, *J. Opt. Soc. Am.*, 49, 389 (1959).
720. Wyszecki G., The specification of the color rendering properties of light sources, Proc. Comm. Intern. Eclairage, 14th Session, Brussels, 1959, Vol. A, p. 146, Paris, Bureau Central CIE, 1960.
721. Wyszecki G., Farbsysteme, Musterschmidt-Verlag, Göttingen, 1960.
722. Wyszecki G., A note on colors of equal lightness, *Farbe*, 9, 3 (1960).
723. Wyszecki G., Metameric object colors, *Acta Chromatica*, 1, 1 (1962).
724. Wyszecki G., Proposal for a new color-difference formula *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 1318 (1963).
725. Wyszecki G., Renanalysis of the NRC field trials of color-matching functions, *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 710 (1964).
726. Wyszecki G., Matching color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 1319 (1965).
727. Wyszecki G., Recent agreements reached by the Colorimetry Committee of the Commission Internationale de l'Eclairage, *J. Opt. Soc. Am.*, 58, 290 (1968).
728. Wyszecki G., The degree of color metamerism and its specification, *Textile Chemist Colorist*, 1, 12 (1969).
729. Wyszecki G., Development of new CIE standard sources for colorimetry, *Farbe*, 19, 43 (1970).
730. Wyszecki G., Recent developments on color-difference evaluations, Color Metrics, Driebergen, Holland, Sept., 1971 (J. Vos, L. Friele, P. Walraven, Eds.), AIC/Holland, c/o Institute for Perception TNO, Soesterberg, Holland, 1972, p. 339.
731. Wyszecki G., Basic concepts of the colorimetry of fluorescent materials, *J. Color and Appearance*, 1, 8 April/May 1972).
732. Wyszecki G., CIE Colorimetry Committee — working program on color differences, *J. Opt. Soc. Am.*, 64, 896 (1974).
733. Wyszecki G., Fielder G., New color-matching ellipses, *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1135 (1974).
734. Wyszecki G., Fielder G., Color-difference matches, *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1501 (1974).
735. Wyszecki G., Nayatani Y., Calibration of the Donaldson colorimeter, *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 705 (1964).
736. Wyszecki G., Stiles W., Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas, Wiley, New York, 1967.
737. Young T., On the theory of light and colours, Lectures in Natural Philosophy, Vol. 2, printed for Joseph Johnson, St. Paul's Church Yard, by William Savage, London, 1807, p. 613. An account of some cases of the production of colours, p. 634.
738. Yule J., Principles of Color Reproduction, Wiley, New York, 1967.
739. Zerban F., Sattler L., Turbidity in sugar products. IV. Preparation of raw sugar solutions, for the determination of color and turbidity, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 8, 168 (1936).
740. Zerban F., Sattler L., Martin J., Spectrophotometric studies on refined sugars in solution, *Anal. Chem.*, 23, 308 (1951).
741. Zoril U., Zwei-Blenden-Reflektometer — ein neues System für die Glanzmessung, *Metalloberfläche (Angew. Elektrochem.)*, 27, 250 (1973).

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аберрация глаза хроматическая 18
— — сферическая 18
Абсолютно черное тело 137
Абсорбциметрия 247
Адамса график 334
— формула цветового различия 360
Адаптационный сдвиг 398
Адаптация цветовая 395
— локальная 38, 400
— общая 39
— — определение 397
— световая и темновая 395
— яркость 400
Аддитивность коэффициентов поглощения 491
— выравнивания по цвету 66, 67
Аккомодация 18
Альбинос 30
Амблиопия 102
Аномалии цветового зрения 92
— — — и функции относительной спектральной световой эффективности 95 (рис. 1.23)
— — — классификация зрительных систем 94, 98
— — — аномальная трихромазия 94
— — — — дихромазия 96
— — — — монохромазия 97
— — — — нормальное зрение 92
— — — — причины цветовой слепоты 99
— — — — врожденная цветовая слепота 93, 99
— — — — приобретенная цветовая слепота 93
— — — — тесты по определению цветовой слепоты 106
— — — — типы цветового зрения нормального глаза 104
— — — — восприятие периферическими участками 104
— — — — недостаточная яркость 105
— — — — недостаточное время 105
— — — — недостаточные размеры объектов 104
Аномалоскоп 108
- Аномальная трихромазия 94
— — тесты для обнаружения 106
Антистоксовская люминесценция 227 (рис. 2.47)
АО X—P—P тест 107
Апертурные цвета 40, 62, 415
Апертурный коэффициент отражения 122, 123 (рис. 2.2)
— — — геометрии освещения и наблюдения 154 (рис. 2.11)
— — — спектральный 123
— — — стандарт 152
ASTM методы измерения глянца 456, 457
— цветовая шкала для нефтепродуктов 315
Атлас цветов Манселла 294
Аффинное преобразование 79
Ахроматический цвет 63
Ахроматопия, ахроматопсия 97
- Белизна 382
— предпочтительный белый 383
— формулы 382
Белые пигменты, показатель преломления 466
Бера закон 486
Бернема колориметр 230 (рис. 2.36)
Бёстрема—Кугельберга карты 108
Бинокулярный метод сравнения с пергородкой 400
Блеск 455
Близорукость 17
Боковое ядро колеччатого узла 32, 36, 118
Брекенриджа и Шауба равноконтрастный цветовой график (RUCS) 336
Бронзовость 289
Брюстера закон 445
Бугера закон 461
Бумага в стопе, непрозрачность 467
- Вебера закон 322, 377
Вектор в пространстве 69 (рис. 1.13)
Визуальные колориметры 222

- Внимание 38
 Внутреннее отражение 464 (рис. 3.10)
 Внутреннее пропускание 485
 — — диффузных слоев 478
 — — закон Бера 486
 — — закон Бугера 486
 — — изменение с толщиной 488
 — — светорассеивающих фильтров 488 (рис. 3.16)
 Волновое число 511
 Воса-Волравена линейный элемент 380
 Восприимчивость цветовых различий 340, 341
 Восприятие самосветящегося объекта 64
 — несамосветящегося объекта 64
 Восприятие цвета в сложной обстановке 412
 — — и пространственная глубина 40 (рис. 1.8)
 Восприятие цвета предметов 40 (рис. 1.8)
 — — — в сложной обстановке 412
 — — — формулы для прогнозирования 415
 — — — явления, включаемые в 414
 Врожденная цветовая слепота 99
 — — — распределение 100
 Выкраска, определение 427
 Выходная точка 34
- Ганглиозные клетки 23 (рис. 1.3)
 Гауссова кривизна 376, 379
 Гельмгольца линейный элемент 377
 Гемоглобин 29
 Геодезическая линия 376
 Геринга теория противоположных цветов 113, 115
 Герц 46
 Гиперболические функции 474
 — — таблица гиперболических котангенсов 542
 Глаз 15, 16 (рис. 1.1)
 — движения 37, 38
 — интерпретирующие элементы 31
 — светочувствительные элементы 19
 — фокусирующие элементы 16
 Глаза пигменты 25
 — — желтого пятна 27
 — — крови 29
 — — палочек и колбочек 31
 — — сосудистой оболочки 16, 19, 23, 29
 — — спектральная плотность пропускания 26
- Глаза пигменты хрусталика 25, 26
 Глянец 444
 — ASTM инструкции 456
 — влияние цвета 457
 — измерение 456
 — и отражение Френеля 445
 — негативный 453
 — типы 448, 455
 Глянец с отчетливостью изображения 454
 Глянцевитость 454
 — виды 455
 Глубина восприятия 40 (рис. 1.8)
 Глубина отделки 454
 Глубина цвета, определение 427
 Глубокий цвет, определение 427
 Глянцеметры 456
 Голубые дуги 34
 Гониофотометр 448 (рис. 3.4), 449, 450 (рис. 3.5)
 Гониофотометрическая кривая 451 (рис. 3.6)
 Гониохроматические образцы 504
 Грассмана законы 66
 — — и теории цветового зрения 109
 — — следствия 66, 67
 Графики равноконтрастные цветовые 334
 График цветности 72, 73 (рис. 1.16), 87 (рис. 1.21)
 Грязный цвет 428
- Дальнозоркость 17
 Дельфобба формула, модифицированная 323
 Дейтераномальное зрение 96, 98
 — — попытки излучения 101
 — — тесты для обнаружения 106
 Дейтеранопсия 96
 — неразличение цветностей 162, 163
 — попытки излучения 101
 — теории 112
 — тесты для обнаружения 106
 Джадда равноконтрастный цветовой график 334, 336
 Джека и Джилла история 417
 Джонса субтрактивный колориметр 231
 Диапазон зрения 397
 Дихроматизм 96
 — в нормальном глазу 104
 — врожденный 96
 — и трехкомпонентная теория 111
 — приобретенный 101
 — тесты для обнаружения 106
 Длина волны 46, 47
 — — дополнительная 203, 422

- Длина волны доминирующая 201, 422
 Дневной свет, линии на цветовом графике 200 (рис. 2.26)
 — — спектральное распределение энергии 142
 — — фазы 140
 — — функции для расчета 142
 — — цветность излучения 141, 145
 Доминантно-модуляторная теория 113
 Доминирующая длина волны 201, 422
 Дональдсона шестичетный колориметр 228 (рис. 2.34), 229 (рис. 2.35)
 Дополнительная длина волны 202, 422
 Дреслера схема 241
 Другой оттенок, определение 432
 Дюбоска компаратор 236
- Едва воспринимаемое различие (е. в. р.) 292 (рис. 2.89)
 Единица цветовых различий, МКО 365
 — — — и различных формул расчета цветовых различий 365
 — — — НБС 357
 Единичная плоскость 69, 70 (рис. 1.14), 86 (рис. 1.20), 159
- Железы 43
 Желтое пятно 27
 Желтое пятно, центральная ямка 16, 20, 22, 24 (рис. 1.4)
- Законы сложения цветов 66
 Затылочные доли 32, 36, 43
 Зеркальный глянец 455
 Зеркальная ловушка 153, 154 (рис. 2.11)
 Зеркальное отражение 444 (рис. 3.1)
 Зрительный нерв 16, 19, 22, 23, 34, 43
- Излучение, определение 508
 Излучение ДМКО, функции для расчета относительного спектрально-го распределения энергии 142, 143
 Излучения 136
 — другие D 141
 — и коррелированная цветовая температура 199
- Излучения стандартное A МКО 137, 138, 139 (рис. 2.5)
 — стандартное B МКО 138, 139 (рис. 2.5)
 — стандартное C МКО 138, 139 (рис. 2.5)
 — стандартные D₅₅, D₆₅, D₇₅ 140 (рис. 2.6)
 Изображение, негативное остаточное 412
 Изображение, стабилизированное на сетчатке 38
 Изолированные (локализованные) цвета 40
 Изотемпературная линия 196
 — — и равноконтрастный цветовой график 334
 Индекс прикрашивания 411
 Интегрирующая сфера 153, 154 (рис. 2.11)
 Интенсивность, определение 427
 Интенсивный цвет, определение 427
 Иодопсин 31, 116
 Ирисовая диафрагма 16
 ИСО метод измерения непрозрачности 467
 Источники света, вид восприятия 64, 415 см. также МКО стандартные источники
 Источники света, МКО стандартные 135, 136, 147
 Исихара карты 107
- K/S отношение 470, 500 (рис. 3.17), 537
 Камера глаза, заполненная влагой 16, 17
 Канадские стандартные цвета красок 318
 Кандела 513
 Капилляры сетчатки 29, 30 (рис. 1.6)
 Карта цвета камней 319
 Катаракта 18
 Каучуковая смола 315
 Квантовый выход 262, 266 (рис. 2.50)
 Кельвина температура 138
 Кёнига (ранняя и поздняя) теория цветового зрения 112, 113
 Кино 91
 Классификация зрительных систем 94, 98
 Колбочки 19, 20, 21, 22, 24, 41
 — и теория цветового зрения 41
 «Колеман юппор» спектрофотометр 315
 Коленчатое тело 36

- Колориметр, бинокулярный Мак Адама 230
 — визуальный 222
 — Райта 226
 — с масками 238 (рис. 2.38)
 — Стайлса (трихроматор NPL) 227 (рис. 2.33)
 — субтрактивный 231
 — субтрактивный Джосса 231
 — трехцветный 223
 — фильтровый 238, 239 (рис. 2.39)
 — фотозлектрический 236, 238 (рис. 2.38), 239 (рис. 2.39)
 Колориметрия абсолютная 245
 — люминесцирующих материалов 252
 — цветовых различий 244
 — — в сравнении с колориметрией цветовых различий 247
 Колориметры 223
 — выбор основных цветов 223, 224 (рис. 2.32)
 — диск Максвелла 231
 — тинтометр Ловибонда 231
 — цветовой охват 223, 224 (рис. 2.32)
 — шесть основных цветов Дональдсона 228 (рис. 2.34), 229 (рис. 2.35)
 Компараторы цвета 235
 — — Дюбоска 236
 — — Несслера 236
 — — Хеллига 236
 Контрастный глянец 455
 Координаты цвета 67, 68, 83, 84, 85, 86, 87
 — — определение 422
 — — отрицательные 74
 — — расчет 171
 — — удельные 81, 83, 84, 136, 137, 167
 Координаты цветности 72, 73, 86
 — — определение 72, 422
 — — спектральных излучений 160, 169
 — — стандартных излучений МКО 199
 Корректировка рецептуры 499
 Корректирующая матрица 502
 Корректирующие светофильтры 240, 241, 242 (рис. 2.40)
 Коррелированная цветовая температура 139, 141, 195
 — — и равноконтрастный цветовой график 334
 Коэффициент отражения (радиометрический) 123, 155, 509
 — — внешнего 464 (рис. 3.10)
 — — и глянец 444
 — — обратного 453
 Коэффициент отражения, устанавливаемый законом Френеля 445
 Коэффициент поглощения, аддитивность 491
 — — методы измерения 491
 — — определение 469, 487
 Коэффициент пропускания (радиометрический), определение 509
 — — внутреннего — 488
 — — для мутной среды 478
 — — для прозрачной среды 485 (рис. 3.14), 487 (рис. 3.15), 488 (рис. 3.16)
 Коэффициент пропускания (фотометрический), определение 513
 Коэффициент рассеяния, аддитивность 491
 — — методы измерения 491
 — — определение 469
 Коэффициент яркости (радиометрический) 123, 154, 509
 — — геометрии освещения и наблюдения 154 (рис. 2.11)
 — — люминесцирующих материалов 258 (рис. 2.45), 260 (рис. 2.47)
 — — спектральный 123
 Коэффициент яркости (фотометрический) 174, 513
 Красильная яркость 428, 431 (рис. 2.96)
 Красно-зеленая слепота 96
 Кривизна цветового пространства 347
 Криволинейный цветовой график 350 (рис. 2.84), 351 (рис. 2.85)
 Кроющая способность 460
 Ксантофилл 27
 Ксенонная лампа и излучение дневного света 149 (рис. 2.7)
 Кубелки-Мунка теория 467
 — — — графические решения 473
 — — — для непоглощающей среды 505
 — — — и составление рецептур красок 495, 496
 — — — прогнозирование цветового соответствия 495
 — — — рабочие примеры 478
 — — — формулы 476
 — — — экспоненциальное решение 469
 Кубический октаэдр 309 (рис. 2.66)
 Лаки, стандартные образцы цвета 317
 Лампа накаливания и излучения дневного света 149 (рис. 2.8)

- Летающие мошки 29
 Линейность уравнивания по цвету 67
 Линейные элементы 374
 — — Гельмгольца 377
 — — Воса-Вольфена 380
 — — Стайлса 378
 — — Фриля 380
 — — Шредингера 378
 Линия пурпурных цветов 88, 161 (рис. 2.13)
 Ловибонда тинтометр 232
 — цветная система 233
 — — — охват 233, 234 (рис. 2.37)
 — — — переход к системе МКО 233
 — — — фильтры 233
 — — числа 233
 Ловибонда — Шиффла система 233
 Лэдда — Франклина теория цветового зрения 113
 Лэнда двухцветные проекции 415
 Люмен, единица светового потока 512
 Люминесцентные лампы в качестве источников дневного света 150 (рис. 2.9)
 — — и индекс метамеризма 216
 — — цветопередача 405
 Люминесценция 259, 260 (рис. 2.47)
 — антистоксовская 261
 — квантовый выход 262
 — колориметрия люминесцирующих материалов 252
 — правила зеркальной симметрии 262
 — правило Стокса 260, 262
 Люминесцирующие материалы, колориметрия 252
 Мак Адама бинокулярный колориметр 230
 — — границы 371
 — — и система Манселла 299
 — — равноконтрастный цветовой график 335
 — — эллипсы 340 (рис. 2.79), 345 (рис. 2.82)
 Максвелла диск 90 (рис. 1.22), 231
 — — и системы смешения цветов 284
 — — пятно 190, 225, 228
 Малые поля, приводящие к тританопии 104
 Манселла атлас цветов 294
 — насыщенность 295, 425
 — обозначение 426
 — светлота, влияние фона 329, 330 (рис. 2.73)
 Манселла система ренотации 297, 426
 — фотометрическая карта 312
 — цветная система 295, 297, (рис. 2.59), 298 (рис. 2.60), 299 (рис. 2.61)
 — цветовой тон 295, 425
 — цветные карты для кодирования цвета 318
 — — — для почв 319
 — — шкала светлоты 321, 425
 — — — перевод в координаты цвета МКО 526
 Маскирование, в цветном телевидении 278
 Матрица преобразования 76
 — — для спектральных данных люминесцирующих материалов 266
 — — обратная 77
 Матрицирование, электронное, в цветном телевидении 279
 Международная практическая температурная шкала 137
 Межотраслевой совет по цвету 317
 Мезопическое зрение 396
 Метамеризм 134, 204, 422
 — индекс МКО 211
 — мультипликативная коррекция 221
 — — степень 209
 — — аддитивная коррекция 221
 Метамерные стимулы 133, 134, 186, 188 (рис. 2.21), 192 (рис. 2.23), 208 (рис. 2.29), 214 (рис. 2.30).
 — — и угловые размеры 353
 — — определение 422
 Метод взвешенных ординат 175
 Метод избранных ординат 182
 Метод локальной адаптации 400
 Метод отношений определения цветовых различий 320
 Метод памяти для оценки цветовых восприятий 398
 Метрика равноконтрастного цветового пространства 376
 Микроспектрофотометрия 116
 Миред 199
 МКО (Международная комиссия по освещению), дополнительный колориметрический наблюдатель 1964 г. 165—171 (рис. 2.15)
 — индекс метамеризма 212
 — индекс цветопередачи 291
 — показатель светлоты L^* 321
 — показатель светлоты W^* 321
 — сравнительная характеристика стандартных наблюдателей МКО 1931 и 1964 гг 184, 187 (рис. 2.20)

- МКО стандартные излучения 135, 136, 139 (рис. 2.5), 140 (рис. 2.6), 146
 — стандартные источники 135, 136, 147
 — стандартный колориметрический наблюдатель 1931 г. 83, 85 155—158 (рис. 2.12)
 — стандартный фотометрический наблюдатель 1924 г. 158, 175
 — равноконтрастное цветовое пространство $U^*V^*W^*$ 365
 — равноконтрастный цветовой график 335, 337 (рис. 2.76), 343
 — формула цветовых различий 360, 365, 369
 — цветовой график x, y 1931 г. 159, 161 (рис. 2.13)
 — цветовой график x_{10}, y_{10} 1964 г. 170 (рис. 2.16)
 Монохроматизация 97, 98
 Монохромат 93
 Монохроматор 80, 121 (рис. 2.1), 227 (рис. 2.33), 238 (рис. 2.38), 253 (рис. 2.41), 257 (рис. 2.44), 263 (рис. 2.48)
 Мощность излучения 47, 508
 Мультизонная или стадийная теория цветового зрения 115
 Мышцы круговые 17
 Мэрца и Пауля словарь цвета 288
- Наблюдатель со стандартным отклонением 219
 Нагеля аномалоскоп 163
 — карты 106
 Над белым, непрозрачность 467
 Названия цветов 433
 Накраска, определение 429
 — неплотная 429
 — плотная 429
 Насыщенность 51, 64, 68
 — в системах восприятия цвета 292
 — определение 420
 — по ДИН 300, 305 (рис. 2.65)
 — по Манселлу 295, 300 (рис. 2.62)
 — (по Манселлу), определение 293, 420
 НЕС единица цветового различия 357
 Негативное остаточное изображение 412
 Негативный глянец 453
 Нейтральная точка 96, 97
 Нейтральный цвет 63, 70 (рис. 1.14)
 Нелокализованные (апертурные) цвета 40, 62
- Непрозрачность бумаги в стопе 467
 — метод ИСО 467
 — над белым 467
 — номограмма отражения — непрозрачности 472 (рис. 3.12)
 — по ТАРР 471
 Неразличимые цветности 162, 163 (рис. 2.14)
 Нервные волокна 30 (рис. 1.5), 33
 Нереальные (воображаемые) цвета 88, 161
 Неспектральные (пурпурные) цвета 164
 Несслера трубки 236
 Нефтепродукты, цветовая шкала ASTM 315
 Никкерсон показатель обесцвечивания 359
 Нистагм 97
 Нойгбауэра равноконтрастный цветовой график 336
 Номограмма отражения — непрозрачности 472 (рис. 3.12)
 Нормальное зрение 94
 Ночное зрение 19
 — диапазон 395
 Нью — Хью цветовой координатор 284
 — цветовая система 283
- Обозначение цвета ISCC—NBS, описание 433, 434 (рис. 2.97)
 Обратная величина цветовой температуры 199
 Обратное отражение 453
 Обратный микроградус 199
 Одновременный контраст 413
 Окись магния, рабочий стандарт отражения 152
 Оптимальный цвет, определение 371
 — — и система Манселла 299
 Оптическая характеристика 488 (рис. 3.16)
 Оптические отбеливатели 383
 Освещенность, определение 513
 — переводные коэффициенты 516, 517
 Основные стандарты в колориметрии 132
 — — — дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1964 г. 165
 — — — расчет координат цвета и цветности 171
 — — — сравнительная характеристика стандартных наблюдателей МКО 1931 и 1964 гг. 184

- Основные стандарты в колориметрии, стандарт апертурного коэффициента отражения 152
 — — — стандартные излучения и источники 135
 — — — стандартные условия освещения и наблюдения 153
 — — — стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1931 г. 155
 Основные цвета 67, 68
 — — единицы 81
 — — и цветовой охват 75
 — — — нереальные 83, 88
 — — Пигмента 111, 165
 — — преобразование 75
 — — соответствующие теориям цветового зрения 110, 11
 — — фундаментальные 116, 403
 — — цветного телевидения 273 (рис. 2.51)
 — — PDT 111, 165
 — — RGB 83, 84
 — — X, Y, Z 83, 85, 86, 156
 — — X_{10}, Y_{10}, Z_{10} 170
 Основные цвета (красителей), определение 429
 Основные цвета, положение в спектре 110
 — —, точки цветности 162, 163 (рис. 2.14)
 Основные цвета NTSC 273 (рис. 2.51)
 Остальда, использование Руководства по цветовой гармонии 285, 286 (рис. 2.55), 287
 — терминология 422
 — цветовая система 285
 — цветовой тон 424
 — чистота 424
 Отбеливающие вещества, флуоресцирующие 383
 Отражение красочного слоя R_{∞} , определение 470
 — — — и отношение K/S 470
 Отрицательные цвета (координаты цвета) 74, 277
 Отсутствие ореольности 455, 457
 Оттенок, определение 428
 — другого оттенка 432
 Офтальмоскоп 27
- Палочки 19, 20, 24
 — интрузия при уравнивании по цвету больших полей 65, 191
 — спектральная чувствительность 20
 Палочковое зрение 19, 24
- Память на цвета 416
 Парафовеальная область 22
 Перекрестие зрительных нервов 32, 35, 43
 Переплетенные нервные волокна, внешний слой и внутренний слой (волокна палочек и колбочек) 23 (рис. 1.3)
 Пигмент, глаза 25
 — желтого пятна 25, 26
 — крови 29
 — палочек и колбочек 31
 — хрусталика 25, 26
 — эпителия 23
 Пигмент крови 2 9
 Пигмента основные цвета 111, 165
 Планка закон излучения 138
 — — — и цветовая температура 195
 Планка излучатель 137
 — — координаты цветности 196
 Планка линия (линия черного тела) 197 (рис. 2.24)
 — — и линия дневного света 200 (рис. 2.26)
 Плотность дыма, цветовая шкала 317
 Плотность пропускания 25
 — — пигмента желтого пятна 25, 26, 27
 — — пигмента хрусталика 25, 26, 27
 Поглощение фотопигментов, спектральный максимум 116
 Поглощения коэффициент, аддитивность 491
 — — определение 469, 487
 — — методы измерения 491
 Подцветка, определение 428
 Подцветывать, определение 428
 Показатели глянца 454, 455
 Показатель обесцвечивания Никкерсон 355
 Показатель ослабления 477
 Показатель преломления 46, 445
 — — белых пигментов 466
 — — и закон преломления 460 (рис. 3.8)
 — — и закон Френеля 445
 — — и рассеяние 461, 462
 — — и теория Кубелки — Мунка 500
 — — связующих красок 466
 Показатель светлоты L^* 321
 Полевые испытания функции сложения цветов 168
 Полная цветовая слепота 98
 Полное отражение 463 (рис. 3.9)
 Полный излучатель 137, 195

- Полный тон, определение 428
 Полутоп, определение 429
 Поляризация цвета 445
 Последовательный контраст 413 (рис. 2.93)
 Постоянство зрительного уравнивания цвета 64, 405
 Постоянство цвета предмета 397 и коэффициенты фон Криса 404
 Постоянство цветового равенства 405
 Потенциалы L 117
 Потенциалы S 117
 Поток излучения 47, 124, 508
 Практическая температурная шкала, международная 137
 Предпочтение цветов 411
 Преломления показатель 46, 445
 — белых пигментов 466
 — и закон преломления 460 (рис. 3.8)
 — и закон Френеля 445
 — и рассеяние 461, 462
 — и теория Кубелки — Мунка 500
 — определение 445
 — связующих красок 466
 Преобразование, аффинное 78
 — проективное 78
 Преобразование основных цветов 75
 Преобразования, коэффициенты 76
 — матрица 76
 — определитель 77
 Приемлемость цветовых различий 59, 367, 392
 — и воспринимаемость 367, 392 (рис. 2.89)
 Приемное поле 118
 Приобретенная цветовая слепота 101
 Проективные преобразования 78
 — и равноконтрастные цветовые графики 336
 Пропорциональность уравнивания по цвету 66, 67
 Пространство цветового восприятия, модели 292 (рис. 2.57)
 Протаномальное зрение 94, 98
 — врожденное 99
 Протанопия 96, 98
 — неразличение цветностей 162, 163
 — теории 111
 Противоположных цветов (или противоположных процессов) теория 113, 115 (рис. 1.25)
 Профессиональное руководство по цвету 284
 Пуркинье эффект 21
 Пурпурные (неспектральные) цвета 164
 pH, стандартные образцы цвета 317
 Рабкина карты 108
 Рабочие стандарты апертурного коэффициента отражения, окись магния 152
 — — — — сульфат бария 152
 Равноконтрастное цветовое пространство L*, a*, b* 373 (рис. 2.87)
 — — — L*, u*, v* 372 (рис. 2.86)
 — — — U*, V*, W* 365
 Равноконтрастные цветовые графики 334
 Равноконтрастные цветовые шкалы 320
 — — комбинированные шкалы светлоты и цветности 353
 — — равноконтрастные шкалы светлоты 320
 Равноконтрастные шкалы светлоты 320
 Равноконтрастные шкалы цветности 331
 Равноконтрастный цветовой график RUCS (Бреккенриджа и Шауба) 336
 Радиометрические термины 509
 Разбел, определение 428, 429
 Различение цветов и угловые размеры объектов 353
 Райта данные по распределению цветности 339 (рис. 2.78), 344 (рис. 2.81)
 Распределение цветности 334, 347, см. также равноконтрастные шкалы цветности
 Рассеиватель, совершенный отражающий 152, 173
 Рассеивающая способность 472
 Рассеяние света 461
 — теория Кубелки — Мунка 467
 Растительные масла, стандартные образцы цвета 314
 Растровая печать, цветовые системы 288
 — — — — Мэрца и Пауля Словарь цвета 288
 — — — — цветовая система Фосса 291
 Расчет координат цвета и цветности 171
 Реакции возбуждения 118
 Редуцирующий экран 61, 62
 Резонансная люминесценция 260 (рис. 2.47)
 Результирующий сдвиг цвета 398

- Риманово цветовое пространство 375
 — — — геодезическая линия 376
 Рингельмана шкала для классификации плотности дыма 317
 Роговица 16
 Родонсин 21,30
 Ромбоэдрическая решетка 307, 331, 333 (рис. 2.75)
 Рэля аномалоскоп 108
 — уравнение 163
 Саккадические движения 38
 Сахар, стандартные образцы цвета 317
 Светимость, определение 513
 Светлота (для самосветящихся предметов) 64, 68, 174
 — и яркость 174
 — определение 294, 378, 420
 Светлота (для несамосветящихся предметов) 51, 64, 294
 — в системах восприятия цвета 292
 — и отражение фона 327
 — определение 420, 421
 — показатель L* и W* 321
 — равноконтрастные цветовые шкалы 320
 — эффект волны 327
 Светлота по Манселлу 321, 329, 425
 Световая эффективность, определение 512
 Связующие в красочных слоях, показатель преломления 466
 Серые шкалы 323, 324 (рис. 2.70)
 Сетчатка, голубые дуги 34
 — капилляры 29, 30 (рис. 1.6)
 — первые волокна 30 (рис. 1.6)
 — определение 16
 — поперечный разрез 23 (рис. 1.3), 24 (рис. 1.4)
 — стабилизированное изображение 38
 Сигнальные цвета, цветовые допуски 389 (рис. 2.88)
 Сигиыма — Фукуда равноконтрастный цветовой график 336
 Сила света, определение 513
 Симона — Гудвина графический метод определения цветовых различий 363
 Синус u, определение 415
 Системы восприятия цвета, определение 291, 292 (рис. 2.57)
 — — — правильная ромбоэдрическая решетка 307, 309 (рис. 2.66), 310 (рис. 2.67)
 — — — система Манселла 294, 295 (рис. 2.58), 297 (рис. 2.59), 298 (рис. 2.60), 299 (рис. 2.61), 300 (рис. 2.62), 302 (рис. 2.63), 304 (рис. 2.64)
 — — — цветовая карта ДИИ 303, 305 (рис. 2.65)
 — — — шведская система естественных цветов 306
 Системы смешения красок 281
 — — — профессиональное руководство по цвету 284
 — — — цветовая система Нью-Хью 283 (рис. 2.54)
 — — — цветовой координатор Нью-Хью 284
 — — — цветовой робот, Марка II 284
 Системы смешения цветов 284
 — — — Оствальда 285
 — — — Руководство по цветовой гармонии 286 (рис. 2.55)
 Склеротическая оболочка 6
 Скорость распространения энергии 46
 Скофилда формула цветового различия 358
 Слабый цвет, определение 427
 Слепое пятно 16, 22, 29, 35
 Сложение цветов быстрой последовательностью цветовых стимулов 89
 — — добавлением световых потоков 60, 61 (рис. 1.12)
 — — смешиванием красителей 92
 — — преобразованием координат цветности 77, 78
 — — преобразованием основных цветов 75
 Слой палочек и колбочек 23 (рис. 1.3)
 Смешивание красителей 92, 484
 Смешивание цветов вращением 90 (рис. 1.22)
 Смола, стандартные образцы цвета 316 (рис. 2.69)
 Снеллиуса закон преломления 461 (рис. 3.8)
 Совершенный отражающий рассеиватель 152, 173
 Содержание белого 423
 Содержание полного цвета по Оствальду 423
 Содержание черного 423
 Составление рецептуры красок 484
 — — — идентификация красящих веществ 485
 — — — мутные среды 485
 — — — прогнозирование красочных смесей 492
 — — — прозрачные среды 485
 Сосудистая оболочка 16, 19, 23, 29

- Спектр энергии излучения 46, 47, 508
 — — — видимые излучения 47
 Спектральная плотность, определе-
 ние 509
 Спектральное поглощение фотопиг-
 ментов 116
 Спектральный апертурный коэффи-
 циент отражения 123
 Спектральный коэффициент отраже-
 ния 55, 123
 Спектральный коэффициент пропу-
 скания 121
 Спектральный коэффициент яркости
 122
 — — — флуоресцирующих материа-
 лов 258 (рис. 2.45), 260 (рис. 2.47)
 Спектрогониофотометр 449
 Спектрорадиометр 48, 121 (рис. 2.1)
 Спектрофотометр 48, 55, 124, 125
 (рис. 2.2)
 — выбор 126
 — «Колеман Юниор» 315
 Спектрофотометрия 120
 — люминесцирующих материалов
 252, 268 (рис. 2.45), 264 (рис. 2.49)
 Стадийные теории зрения 115
 Стайлса данные по распределению
 цветности 342 (рис. 2.80), 346
 (рис. 2.83)
 — линейный элемент 378
 Стандарт апертурного коэффициента
 отражения 152
 — — — рабочие стандарты 152
 Стандартные излучения МКО 135,
 136, 139
 Стандартные источники света МКО
 135, 136, 147
 Стандартный наблюдатель, см. МКО
 Стандартные образцы цвета 279
 — — — двумерные цветовые шкалы
 311
 — — — несистемный и неполный
 выбор образцов цветового тела 317
 — — — одномерные цветовые шкалы
 312
 — — — системный отбор образцов
 цветового тела 280
 — — — системы восприятия цвета
 291
 — — — системы смешения красок
 281
 — — — системы смешения цветов
 284
 — — — цветовые системы, получен-
 ные в процессе растровой печати
 288
- Стандартные сигнальные цвета США
 318
 Стандартные условия освещения
 и наблюдения 153, 154 (рис. 2.11)
 Стекловидное тело 16
 Степенной закон 322
 Степень метамеризма 208
 — —, аддитивная коррекция 221
 — —, МКО показатель 211
 — —, мультипликативная коррек-
 ция 221
 Степень темноты 305
 — — ДИН 303, 323
 Стерadian, единица телесного угла
 511
 Стилянига карты 107
 Стокса правило люминесценции 260,
 261
 Субтрактивные колориметры 231
 — — Джонса 231
 — — тинтометр Ловибонда 231
 Сульфат бария, стандарт отражения
 152
 Сумеречное зрение 20
 Сферическая aberrация глаза 18
 США, Карта цвета камней Нацио-
 нального научно-исследователь-
 ского совета 319
 — Национальный комитет по систе-
 мам телевидения 272
 — стандартные сигнальные цвета 318
 — Федеральная комиссия по связи
 272
 — Федеральная цветовая карта кра-
 сок 318
- TAPPI метод определения глянца 457
 — — — укрывистости 471
 Телевидение, см. Цветное телевиде-
 ние
 Температурная шкала, абсолютная
 138
 — — Кельвина 138
 — — коррелированная цветовая 195
 — — международная практическая
 137
 — — Фаренгейта 138
 — — цветовая 195
 — — Цельсия 138
 Теневые ряды 424
 Теории для мутных сред 467, 490,
 507
 — — — Кубелки — Мупка 467
 — — — многих потоков 507
 Теории цветового зрения 109
 — — — Геринга противоположных
 цветов 113, 115 (рис. 1.25)

- Теории цветового зрения доминатор-
 но модуляторная 113
 — — — и электрофизиологические
 эксперименты 116
 — — — Ладда — Франклина или
 ранняя Кёнига 113
 — — — мультизонная или стадий-
 ная 115
 — — — одностадийная 115
 — — — поздняя Кёнига 112
 — — — Юнга — Гельмгольца 110,
 112, рис. 1.24
 Тест на шерстяной пряже Хольмгре-
 на 106
 Тетрапои 97
 Тип восприятия, источника света
 64, 415
 — несамосветящегося объекта 64
 — самосветящегося объекта 64
 — цвета объекта 64, 415
 Токийского медицинского института
 карты для проверки цветового
 зрения 108
 Тон, определение 428, 429
 Тонер, определение 429
 Трехкоординатное цветовое про-
 странство 68, 69 (рис. 1.13), 78,
 86 (рис. 1.20), 87 (рис. 1.24), 159,
 370
 Трехцветный колориметр 61 (рис.
 1.12), 67
 Тританопия 97
 — врожденная 97, 98, 100
 — линии неразличимых цветностей
 162, 163
 — попытки излечить 101
 — при малом поле 353
 Трихроматичное цветовое зрение,
 аномальное 93, 94
 — — — нормальное 93, 94
- Угловые размеры 185 (рис. 2.18)
 — — метамерные стимулы 353
 — — различение цветов 352, 353
 — — функции сложения 187 (рис.
 2.20)
 Уравнения преобразования в тео-
 риях цветового зрения 111,
 114
 — — в цветном телевидении 275
 — — для преобразования основных
 цветов 76
 — — для равноконтрастных цвето-
 вых графиков 334
 — — для цветовой адаптации 403,
 404
 — — координат цветности 77, 78
- Уравнивание по цвету 59
 — — аддитивность 66, 67
 — — линейность 66, 67
 — — пропорциональность 66, 67
 — — статистические отклонения 340
 (рис. 2.79), 341, 342 (рис. 2.80)
 Уравнивание цветового различия 354
 Условия освещения и наблюдения,
 стандартные МКО 153, 154
 (рис. 2.11)
 Условная чистота 203, 204, 422
- Фазы дневного света 140
 Фаренгейта шкала температуры 138
 Фарисворта криволинейный цвето-
 вой график 350 (рис. 2.84), 351
 (рис. 2.85)
 Федеральная цветовая карта красок
 318
 Фехнера закон 377
 Физиология цветового зрения, нерешенные проблемы 41
 Фильтровый колориметр 238, 239
 (рис. 2.39)
 Фильтры Девис — Гибсона 147, 148
 Фосса цветовая система 282
 Фосфоресценция 260 (рис. 2.47)
 Фон Криса закон коэффициентов 402
 Формула цветовых различий, Адам-
 са — Никкерсон 359
 — — — Годлова 356
 — — — кубического корня 360, 361
 — — — МКО ($L^*a^*b^*$) 360
 — — — МКО ($L^*u^*v^*$) 369
 — — — МКО 1964 ($U^*V^*W^*$) 365
 — — — МКО, рабочая программа
 366
 — — — НБС 357
 — — — Никкерсон показатель обес-
 цвечивания 355
 — — — Никкерсон — Штульц 359
 — — — Скофльда 358
 — — — Хантера 359
 — — — Фриля — Мак Адама —
 Чиккеринга 362
 Фотометрические термины 509
 Фотопигменты и цветовое восприя-
 тие 414
 — подопсин 31, 116
 — максимум спектрального погло-
 щения 116
 — нерешенные проблемы 41
 — родопсин 21, 30
 Фотопическое зрение (дневное зре-
 ние, колбочковое зрение) 21, 22,
 396
 Фотофобия 30, 97

- Фотоэлектрический колориметр 236
 — — трехцветный 237
 Френеля закон отражения 445
 — — — и глянец 445
 Фриля линейный элемент 380
 Фриля — Мак Адама — Чиккеринга формула цветовых различий 362
 Функция сложения цветов 79
 — — — дихроматов 97
 — — — и полевые испытания 168
 — — — и угловые размеры 187 (рис. 2.20)
 — — — стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. 156, 158 (рис. 2.12)
 — — — стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. 166 (рис. 2.15)
 — — — стандартного фотометрического наблюдателя МКО 1924 г. 158, 165, 175
 Функция относительной спектральной световой эффективности 20 (рис. 1.2), 95 (рис. 1.23)
 — — — дейтераномального наблюдателя 95
 — — — дейтеранопа 95
 — — — дневной 20, 512
 — — — и монохромат с колбочковой слепотой 99
 — — — и спектральная яркость 95
 — — — и стандартный фотометрический наблюдатель МКО 158, 165
 — — — и теории цветового зрения 111
 — — — — ночной 20, 512
 — — — — протаномального наблюдателя 95
 — — — — протанопа 95
 Функция спектрального распределения, определение 509
 — относительного спектрального распределения 509
 Хеллинга компараторы цвета 236
 — стеклянные стандартные образцы цвета для определения рН 317
 Хольмгрена тест 106
 Хроматическая аберрация глаза 18
 Хрусталик глаза 16, 17
 — — пигменты 25, 26
 Цвет, аспекты 42
 — определение 421
 Цвет основные понятия 42
 — психологический аспект (с точки зрения покупателя) 49
 — психофизический аспект (что будет видеть средний покупатель) 52
 — физический аспект, энергия излучения и спектр 45
 — химический аспект, пигменты и краски 44
 Цвет излучения, игнорирование 415
 Цвет материала, не прошедшего влажной обработки 427
 Цвет предмета, тип восприятия 64, 415
 Цвета красок, канадский стандарт 318
 — — Федеральная цветовая карта красок США 318
 Цветная репродукция 268
 Цветное телевидение 271
 — — кривые спектральной чувствительности камеры 276 (рис. 2.53)
 — — люминофоры 274 (рис. 2.52)
 — — маскирование 278
 — — основные цвета 273 (рис. 2.51)
 Цветность 71
 — точки 71, 72 (рис. 1.15), 86 (рис. 1.20)
 Цветовая адаптация 395
 — — и закон коэффициентов Фон Криса 402, 404
 — — и уравнивание по цвету 65
 — — и цветопередача 408
 Цветовая гармония 436
 Цветовая карта ДИН 303, 305 (рис. 2.65)
 — — насыщенность 303
 — — степень темноты, серая шкала 303, 323
 — — — цветовой тон 303
 Цветовая слепота, врожденная 93, 99
 — — — попытки излечить 101
 — — — распределение 100
 — — нормального глаза 104
 — — приобретенная 93
 — — тесты для обнаружения 106
 — — — АО X—P—P 107
 — — — аномалоскоп 108
 — — — Исихара 107
 — — — Нагеля 106
 — — — Стиллинга 106
 — — — Хольмгрена 106
 Цветовая температура, коррелирующая 195, 198 (рис. 2.25)
 Цветовое постоянство 397, 416
 — — и коэффициенты фон Криса 404

- Цветовое пространство 292 (рис. 2.57)
 308, 364
 — — геодезическая линия 376
 — — кривизна 347
 — — линейный элемент 375
 — — метрика 376
 — — равноконтрастное 375
 — — рикманово 375
 — — эвклидово 310, 375
 Цветовое пространство 292 (тело) предметов, граница 370
 Цветовое различие 58, 390, 391
 — — восприимчивость 59, 367
 — — единица 357, 365
 — — приемлемость 59, 367
 Цветовой график 159, 161 (рис. 2.13), 163 (рис. 2.14), 170 (рис. 2.16), 171 (рис. 2.17)
 — — нелинейное преобразование 350 (рис. 2.84), 351 (рис. 2.85)
 Цветовой охват 75 (рис. 1.17), 88, 272, 273 (рис. 2.51)
 Цветовой робот, Марка II 284
 Цветовой сдвиг, адаптационный 398, 409
 — — колориметрический 398
 — — результирующий 398
 Цветовой стимул, определение 421
 Цветовой тон 51, 68
 — — в системах восприятия цвета 292
 — — определение 420
 — — психологически однозначный 294
 — — унитарный 294
 Цветовой тон по ДИН 303
 Цветовые допуски 384
 — — восприимчивость и приемлемость 391, 392 (рис. 2.89)
 — — для сигнальных огней 389 (рис. 2.88)
 — — использование формул цветовых различий 390
 — — наборы стандартных образцов цвета 386
 — — специальные стандартные образцы 386
 — — стандартные образцы, определенные в основной системе 388
 Цветовые системы, полученные в процессе растровой печати 288
 — — — — Мэрца и Пауля Слоуаря цвета 288
 — — — — цветовая система Фосса 291
 Цветовые стимулы, определение 421
 Цветовые шкалы 280, 293, 354
 Цветовые шкалы ASTM для нефтепродуктов 315
 — — двумерные 311
 — — для определения плотности дыма 317
 — — индикатор рН 317
 — — Ловибонда 233
 — — несистематизирующиеся 317
 — — несомержные 312
 — — равноконтрастные 320
 Цветопередача источников света 405
 — — — индекс МКО 409
 — — — и индекс прикрашивания 411
 — — — и метамерные цветовые стимулы 410
 — — — определение 408
 Цельсия шкала температуры 138
 Центральные цвета 319
 Частота 46, 47, 511
 Чистота 428
 Чистота в системе Оствальда 424
 — условная 203
 Чистый тон, определение 429
 Чистый цвет по Оствальду 424
 Шведская система естественных цветов 306
 Шредингера линейный элемент 378
 Эвклидово цветовое пространство 310, 375
 Электрофизиологические эксперименты и цветовое зрение 116
 — — L потенциалы 117
 — — S потенциалы 117
 — — приемное поле 118
 — — реакции возбуждения 118
 — — реакции торможения 119
 Энергетическая освещенность, определение 508
 Энергетическая светимость, определение 508
 Энергетическая сила света, определение 508
 Энергетическая яркость 80
 — — определение 509
 Энергия излучения (лучистая энергия) 46
 — — определение 508
 — — скорость 46
 — — спектр 47, 508
 Эффект волны в различении цвета 347

Эффект волны в шкалировании светлоты 327	Ядерный слой, внешний и внутренний 23 (рис. 1.3)
	Яркий цвет 34, 428
Юнга — Гельмгольца теория цветового зрения 110, 112 (рис. 1.24)	Яркость 174, 513
	— и светлота 174
	— переводные коэффициенты 516
	— полная 175
Язык потребителя 52	

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие	7
Введение	11
Глава 1. Основные факты	15
Глаз	15
Фокусирующие элементы	16
Светочувствительные элементы	19
Пигменты глаза	25
Интерпретирующие элементы	31
Некоторые нерешенные проблемы цветового зрения	41
Фундаментальные аспекты цвета	42
Химия — пигменты и краски	44
Физика — энергия излучения и спектр	45
Психология покупателя	49
Психофизика — как предсказать то, что увидит рядовой покупатель	52
Уравнивание по цвету	59
Сложение цветовых стимулов	60
Быстрая последовательность цветовых стимулов	89
Смешивание красителей	92
Аномалии цветового зрения	92
Классификация зрительных систем	94
Причины цветовой слепоты	99
Типы цветового зрения нормального глаза	104
Тесты для обнаружения цветовой слепоты	106
Теории цветового зрения	109
Глава 2. Средства и методы колориметрии	120
Спектрофотометрия	120
Выбор спектрофотометра	126
Основные стандарты в колориметрии	132
Стандартные излучения и источники света	135
Стандарт апертурного коэффициента отражения	152
Стандартные условия освещения и наблюдения	153
Стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1931 г.	155
Дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель МКО 1964 г.	165
Расчет координат цвета и цветности	171
Численные примеры	176
Сравнительная характеристика стандартных наблюдателей МКО 1931 и 1964 гг.	184
Цветовая и коррелированная цветовая температуры	195
Доминирующая длина волны и чистота цвета	201
Метамеризм	204
Колориметры	222
Визуальные колориметры	222
Фотоэлектрические колориметры	236
Колориметрия цветовых различий	244
Колориметрия люминесцирующих материалов	252
Цветная репродукция	268
Стандартные образцы цвета	279
Системный отбор образцов цветового тела	280
Системы смешения красок	281
Системы смешения цветов	284

Цветовые системы, полученные в процессе растровой печати	288
Системы восприятия цвета	291
Двумерные цветовые шкалы	311
Одномерные цветовые шкалы	312
Несистемный и неполный выбор образцов цветового тела	317
Равноконтрастные цветовые шкалы	320
Равноконтрастные шкалы светлоты	320
Равноконтрастные шкалы цветности	331
Комбинированные шкалы светлоты и цветности	353
Цветовые допуски	384
Темновая и световая адаптация — цветовая адаптация	395
Цветопередача источников света	405
Восприятие цвета предметов в сложной обстановке	412
Язык цветовых терминов	417
Основные или психологические цветовые термины	420
Психофизические цветовые термины	421
Терминология в области красителей	427
Названия цветов	433
Цветовая гармония	436
Глава 3. Физика и психофизика красочных слоев	443
Глянec	444
Отражение Френеля	445
Типы глянца	448
Связь между гляncем и цветом	457
Непрозрачность или кроющая способность	460
Теория Кубелки — Мунка	467
Экспоненциальное решение	469
Гиперболическое решение	473
Простейшие числовые примеры	478
Составление рецептуры красок	484
Идентификация красящих веществ	485
Прогнозирование красочных смесей	492
Приложение	508
Литература	547
Предметный указатель	577

ИБ № 1407

Д. Джадд, Г. Вышечки

ЦВЕТ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Редактор В. Соболев
Художник С. И. Брында
Художественный редактор В. К. Бисенгалиев
Технический редактор Н. Д. Толстякова
Корректор И. П. Максимова

Сдано в набор 23.12.77 г. Подписано к печати 24.04.78 г. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Обновленная гарнитура. Высокая печать. Объем 18,50 бум. л., 37 печ. л. Уч.-изд. л. 39,23. Тираж 5000 экз. Зак. № 0517. Цена 4 р. 30 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7
«Искра революции» Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9.