

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева**

Ш. К. Сакабекова

ТЕОРИЯ ЦВЕТА И ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

**Рекомендовано Учебно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия**

Алматы 2017

УДК 004.4.(075)
ББК 32.973.202 я 73
С 21

Рецензенты:

Сурашов Н. Т., д.т.н., профессор, академик НАЕН РК,
Тураев И. И., генеральный директор ТОО «Az PRINT CENTRE»,
Наурызбаев А. Н., генеральный директор издательства «ҰЛАҒАТ»

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2017 г.

Сакабекова Ш. К.

С 21 Теория цвета и цветовоспроизведения: Учебное пособие/
Ш.К. Сакабекова. – Алматы: КазННТУ имени К. И. Сатпаева,
2017. –199 с. Ил. –56 . Табл. – 4. Библиогр. – 19 наим.
ISBN 978-601-323-088-7

В учебном пособии, в соответствии с программой курса, даны представления о теории цвета; восприятии цвета; его воспроизведении. Значительное внимание уделено природе и свойствам излучений; преобразованиям излучений оптическими средами. Особый интерес для будущих профессионалов представляют управление цветом, принципы построения колориметрических систем, калибровка и профилирование устройств воспроизведения изображений, приборы для измерения цвета.

Настоящее учебное пособие предназначено студентам специальности «Полиграфия». Может быть полезно специалистам, работающим в смежных с полиграфией областях, а также широкому кругу читателей.

ISBN 978-601-323-088-7 © Сакабекова Ш.К., 2017

© КазННТУ имени К. И. Сатпаева, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Совершенству нет предела, особенно когда речь идет о предмете, связанном с восприятием цвета. Основа любого печатного издания – его оригиналы. Именно от них во многом зависят, и качество издания, и его общественная значимость. Цветные оригиналы – цветные изображения на плоскости (фотографии, рисунки, слайды, графика, в том числе компьютерная) играют особую роль в структуре любого издания, и особенно в тех, что несут, кроме информационной и эстетической, эмоциональную нагрузку, например, в рекламных и политических изданиях.

Необходимо подчеркнуть, что цветовоспроизведение, т.е. воспроизведение (репродуцирование) цветных оригиналов на оттиске, – одна из основных задач полиграфии. Вся история развития полиграфических технологий и создание различных способов печатания непосредственно связаны именно с решением этой задачи.

Обширен спектр вопросов, рассмотренных в данном учебном пособии, в числе которых: понятие о цвете, природа и свойства излучений, принципы построения колориметрических систем, синтез цвета, цветовое пространство, управление цветом, калибровка и профилирование устройств воспроизведения изображений, приборы для измерения цвета.

Знакомство с основами теории цвета и цветовоспроизведения важно для всех специалистов, работающих в сфере полиграфических технологий, но особенно для тех, кто занимается оптической регистрацией информации – изготовлением печатных форм, цифровой печатью.

Как одна из основных профилирующих дисциплин учебной программы теория цвета и цветовоспроизведения дает базовые основы для изучения курсов «Обработка текстовой

информации», «Обработка изобразительной информации», «Технология изготовления печатных форм», «Технология печатных процессов», «Проектирование технологических процессов».

В настоящее время в связи с повсеместным внедрением в полиграфической отрасли компьютерной обработки стало возможным достижение весьма высокого качества цветных изображений, их корректирование и редактирование. Результаты чего можно в реальном режиме времени видеть на мониторах компьютеров.

Однако при воспроизведении на твердых носителях (бумага, упаковочные материалы и др.) точная передача цвета связана с дополнительными проблемами, для успешного решения которых необходимо знание закономерностей синтеза цвета и его зрительного восприятия; колориметрических методов измерения цвета и методов оценки качества цветных изображений; факторов, влияющих на точность воспроизведения цвета. Основная цель курса «Теория цвета и цветовоспроизведения» – формирование у обучающихся знаний о синтезе цвета и прикладном применении спектра в полиграфии.

Первый (вводный) раздел является мини-обзором о восприятии цвета и представлении цвета в общем. *Второй* – посвящен основным понятиям цвета и природе излучения. *В третьем разделе* изложена информация о человеческом глазе как приемнике излучения. *В четвертом и пятом разделах* уделено внимание характеристикам цвета и его синтезу цвета, а также пространственному представлению цвета. *В шестом и седьмом* – рассмотрены управление цветом и информация о профилях, которые позволяют определить соответствие цветов при передаче графики с одного устройства на другое. *В восьмом разделе* освещены калибровка устройств и методы контроля процессов. *В девятом* – особый интерес для будущих профессионалов представляют приборы для измерения цвета, что является основой при составлении нормативных материалов в цветовоспроизведении.

1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТА

1.1. О восприятии цвета

Как человек воспринимает цвета? Возьмем, к примеру, яблоко (красное, зеленое или, скажем, желтое). В полной темноте яблоко не имеет цвета. Чтобы получить восприятие цвета, нужен источник света. Дело в том, что отраженный от поверхности объекта свет попадает на сетчатку глаз, а информация об этом передается в мозг, который и воспринимает/различает цвет (рис. 1.1).

Яблоко имеет красный (или зеленый, желтый) цвет, потому что его поверхность отражает, соответственно, красную (или зеленую, желтую) составляющую и поглощает остальную часть светового спектра.

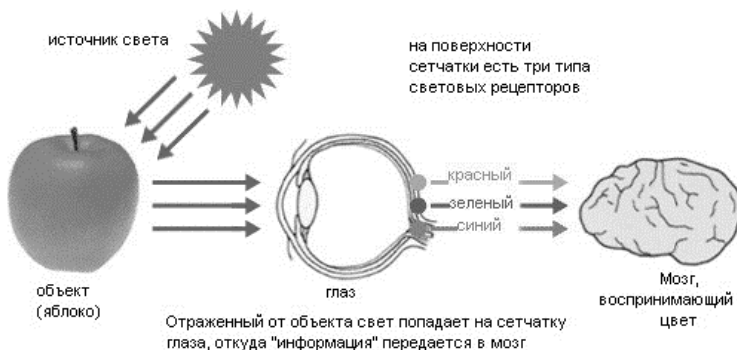


Рис. 1.1. Восприятие цвета человеком

1.1.1. Обоснование различий цветов

Оттенки цвета предмета в зависимости от источника света (солнце, флуоресцентные лампы или лампы накаливания) весьма отличаются. Одно и то же яблоко будет иметь самые различные оттенки цвета под воздействием света от каждого из вышеназванных и других источников света.

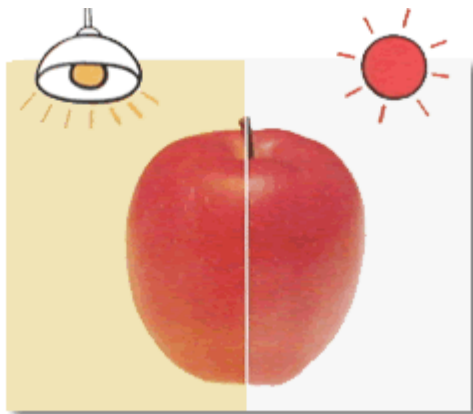


Рис. 1.2. Под воздействием света от разных источников предмет приобретает различные оттенки цвета

Ориентация в цвете в зависимости от угла освещения.
Цвет может восприниматься по-разному, например, краска на автомобиле в зависимости от различных положений, занимаемых наблюдателем, кажется то темнее, то светлее. Для правильного сравнения цветов предметов очень важно смотреть на них из одного и того же положения (под одним и тем же углом). Это имеет особое значение для цветов с прозрачным или металлическим эффектом.



Рис. 1.3. Ориентация в цвете в зависимости от угла освещения

Различия в восприятии цвета в зависимости от размера (площади) предмета. Зачастую, например, обои с привлекательным рисунком, которые были выбраны покупателем по небольшому образцу, после того, как их наклеили на стены, выглядят слишком кричащими. Идеальное покрытие для крупной площади по мелким образцам выбрать довольно трудно, однако замечено, что обычно большие площади цвета выглядят более светлыми и живыми (рис. 1.4), чем маленькие, что, безусловно, следует учитывать.

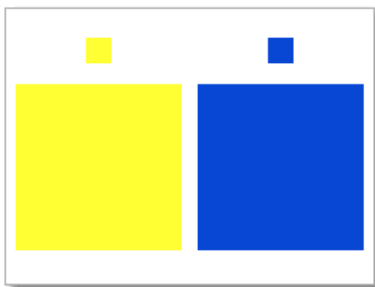


Рис. 1.4. Большие площади цвета выглядят более светлыми и живыми, чем маленькие

Различия в восприятии цвета в зависимости от фона, на котором находится предмет. Яблоко на светлом фоне, выглядит более темным, нежели то, что помещено на фоне темного квадрата (рис. 1.5). Это связано с так называемым «эффектом контраста», который значительно влияет на восприятие человеком цвета. Рассмотрим это явление подробнее.

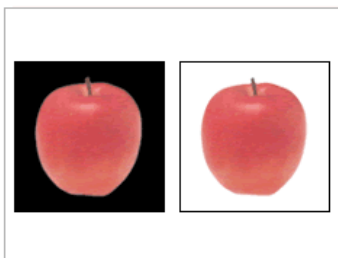


Рис. 1.5. «Эффект контраста» значительно влияет на восприятие цвета

Последовательный эффект контраста. Проведем простейший эксперимент: посмотрите в течение 30 секунд на зеленый квадрат (рис 1.6, слева), а затем – на мини-квадратик справа. В вашем восприятии он будет иметь красный цвет. Почему это происходит? Потому что зеленый и красный – это комплиментарные цвета. Красный цвет получается вычитанием зеленого цвета из белого. Таким образом, феномен восприятия цвета (в данном случае – зеленого) иным образом, т. е. как красного после созерцания первого (зеленого) в течение определенного промежутка времени вызван остаточным (после вычитания из белого) изображением второго (красного) цвета.



Рис. 1.6. Последовательный эффект контраста

Эффект контраста яркости. Разумеется, сразу видно (рис. 1.7), что серый квадрат выглядит более ярким на темном фоне и, соответственно, темнее – на светлом. Понятно, что полиграфист/дизайнер выберет именно тот вариант, который подойдет, по его мнению, для конкретного случая.

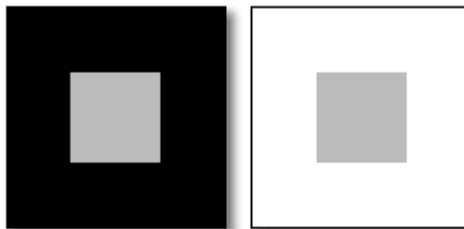


Рис. 1.7. Эффект контраста яркости

Эффект контраста тона. Оранжевый цвет квадрата на красном фоне выглядит несколько желтоватым, а на желтом фоне этот же квадрат приобретает явный красноватый оттенок (рис. 1.8). Это наглядно иллюстрирует зависимость непосредственного восприятия цвета (*малого квадрата*) от конкретного фона, на котором находится.

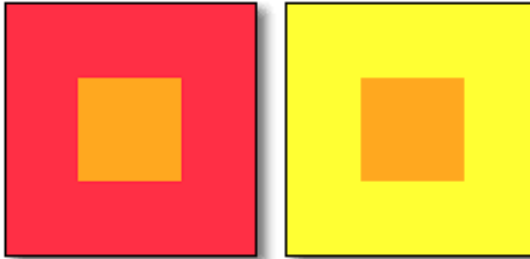


Рис. 1.8. Эффект контраста тона

Эффект контраста цветности можно наблюдать, когда два контрастирующих по яркости цвета расположены рядом. Синий квадрат на ярком, синем же фоне (рис. 1.9), явно выглядит тускло, а тот же квадрат, помещенный на фоне, явно уступающем ему в яркости, наоборот, смотрится весьма выразительно. Эффект контраста цветности распространяется и применительно к любым другим цветам.

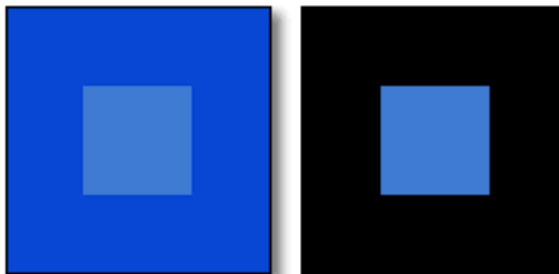


Рис. 1.9. Эффект контраста цветности

1.2. Устройство глаза как оптической системы

Абсолютная чувствительность глаза в качестве фотоприемника определяется по формуле:

$$S = 1/P_{эфф},$$

где $P_{эфф}$ – эффективно (полезно) поглощенная часть светового потока.

Кривые основных возбуждений иногда называют «физиологическими кривыми сложения», поскольку они выражают одновременные реакции фоторецепторов (палочек и колбочек).

В колориметрии за единичные реакции принято считать такое соотношение основных возбуждений, или базисных стимулов, при котором возникает ощущение ахроматического цвета (он не имеет цветового тона и отличается лишь по светлоте/яркости). Этот принцип применим не только при рассмотрении теории цветового зрения, но и при цветовоспроизведении.

1.2.1. Характеристика цвета в зависимости от его воздействия на организм человека

Красный цвет (теплый, раздражающий) стимулирует работу мозга, эффективен при меланхолии и плохом настроении.

Оранжевый цвет стимулирует чувства и слегка ускоряет пульс, но не увеличивает кровяное давление, создает чувство благополучия и радости, поднимает аппетит.

Желтый цвет активизирует работу мозга, эффективен при восприятии в течение небольшого количества времени при умственной недостаточности, поднимает настроение.

Зеленый цвет успокаивающе влияет на нервную систему и зрение, уменьшает боль, снимает раздражительность, усталость, снижает кровяное давление, ослабляет мигрень.

Голубой цвет – антисептический, снимает боль. Однако при слишком длительном воздействии вызывает угнетенность и усталость.

Синий цвет успокаивает, усыпляет, расслабляет мышцы; эффективен при бессоннице, нервных и физических перегрузках.

Фиолетовый (пурпурный) цвет благоприятно воздействует на сердце, легкие и кровеносные сосуды, увеличивает выносливость ткани.

Нежно-розовый цвет оказывает (особенно на детей) мощное седативное/успокаивающее воздействие. Снимает стрессы, благотворно влияет на нервную систему.

1.2.2. Индивидуальность восприятия цвета

Все люди видят цвета по-разному, и их восприятие не является предопределенным, а находится в категории личных ощущений. Восприятие цветов формируется у каждого индивидуально, поскольку в мозгу нет образца, с которым можно было бы сравнивать каждый новый цвет. Индивидуальное восприятие цвета во многом обусловлено психотипом человека, например:

- эмоциональные, легко возбудимые, подверженные влюбчивости выбирают красный цвет.
- спокойные, уравновешенные – зеленый.
- синий цвет предпочитают в чем-то разочарованные, расстроенные люди.
- коричневый цвет и его оттенки приятны людям, не желающим ничего менять.
- фиолетовый цвет необходим мистически настроенным людям и тем, кто ищет точку опоры в жизненных ситуациях.
- импульсивные и жизнерадостные любят оранжевые и желтые цвета.

Зная реакцию того или иного человека на отдельные цвета и цветосочетания, можно заранее предусмотреть особенности

колористического построения интерьера его жилища и буквально просчитать последующий позитивный эффект.

1.2.3. Ассоциативный ряд

Каждый цвет несет в себе некую информацию. Цветовая характеристика передает состояние природы, человека, его чувств.

- Добавляя красный цвет, символизирующий поток жизненной силы, в интерьер помещения, человек утверждает себя в этой жизни, привлекает внимание к себе.

- Желтый – цвет солнца (в некоторых странах – цвет богатства) создает ощущение тепла и укрепляет надежду на лучшее.

- Синий и голубой – цвета воды и неба – вызывают ощущение прохлады и отдохновения, поэтому их обычно не используют в северной (холодной) части помещений.

- Оранжевый цвет, находясь между красным и желтым, обладает характеристиками обоих цветов. Нежелателен в спальнях и кабинетах.

- Зеленый вызывает ассоциации с жизнью, ощущение связи с природой.

- При восприятии фиолетового (пурпурного) цвета возникает чувство торжественности, состояние уравновешенности, это цвет мудрости и царственности.

- Белый и черный цвета стоят в ассоциативном ряду особняком. У разных народов эти два цвета вызывают противоположные ассоциации: белый цвет на Востоке – цвет траура, а в Европе – торжества, праздника.

Следует заметить, что готового рецепта по сочетанию и применению тех или иных цветов не существует. В каждом случае нужно находить особые нюансы, учитывать индивидуальные пристрастия и вкусы, но, тем не менее, в целом руководствоваться общепринятыми в этой сфере положениями

1.2.3. Иллюзорность цвета

Цвет может зрительно увеличивать или уменьшать предметы, даже воздействовать на оценку промежутка текущего времени. Один и тот же цвет на стенах, потолке и на полу прямоугольного помещения выглядит совершенно по-разному. Изменяясь, цвет (а он безгранично изменчив, иллюзорен) меняет и восприятие человеком внешней среды. Цвет может активно влиять на интерьер помещения: зрительно сокращать или удлинять; сужать или расширять; повышать или понижать; утяжелять или облегчать его форму.

Все многообразие цветов называется «спектром». Его обычно изображают в виде цветового круга, развивающегося от красного цвета (через желтый) к синему и замыкающегося через глубокий фиолетовый на темно-пурпурный и вновь на красный. В спектре солнечного света различается около 130 цветов с оттенками. Человеческий глаз способен выделить в спектре от 100 до 200 различных оттенков (порогов) цвета.

Легче всего увидеть красный цвет. Свет в этом участке спектра имеет большую длину волны. С другой стороны – там, где синий свет переходит в фиолетовый и лиловый, волны короткие. В связи с этим у цветового спектра можно заметить такую особенность: он воспринимается как цилиндрическая поверхность, в средней части которой (красные цвета) возникает иллюзия рельефности и уменьшения пространства. Боковые части спектра (голубые и фиолетовые цвета) воспринимаются как углубления и создают иллюзию увеличения пространства.

Неслучайно в интерьерах для расширения пространства помещений, как правило, используют холодные тона, а для сужения – теплые. Вообще, выделение насыщенным цветом одной поверхности в комнате – довольно интересный профессиональный ход. Благодаря этому можно добиться необычной трансформации (иллюзорной, конечно) пространства комнаты. Например, синий цвет одной стены может зрительно отодвинуть ее, если все остальные будут другого цвета. Данный прием довольно часто используют в своей практике

архитекторы и дизайнеры. Это позволяет до неузнаваемости изменить привычное помещение, сделав его не только красивым, но и комфортным для проживания.

Весьма интересный результат получается, когда используют противоположный прием, так называемый «эффект парфюмерной коробки». Суть его состоит в том, что применяют именно один выбранный цвет и для стен, и для потолка. Особенно хорошо это смотрится при оклейке обоями спальни. Такой прием объединения цветом или одинаковыми цветосочетаниями всех внутренних поверхностей помещения создает зрительную иллюзию расширяющегося пространства.

Осторожно нужно использовать черный цвет при решении жилого интерьера. Отдельные включения в виде полос или пятен в сочетании с белым цветом вполне допустимы и даже бывают очень оригинальны. Такие интерьеры предпочитают сами архитекторы и дизайнеры. Они немного эстетские и хороши для сдержанных и собранных людей.

Вообще бело-черные цветовые решения привлекают своей простотой и аскетизмом, хотя кажущаяся простота исполнения весьма обманчива.

1.2.4. Некоторые секреты достижения гармонии

В декоративном оформлении интерьера достижение гармонии невозможно без правильного подбора цветовой гаммы. Сделать такой подбор поможет таблица сочетаемости цветов. Вот лишь некоторые примеры наиболее удачных подборов:

- Красный – Зеленый, серый, синий.
- Малиновый – Жемчужно-серый, розовато-лиловый.
- Темно-красный (бордо) – Черный, темно-голубой, беж.
- Алый – Светло-голубой, зеленый.
- Густо-розовый – Различные оттенки голубого.
- Коричневато-розовый – Голубой, кремовый.
- Бледно-розовый – Салатный, бледно-сиреневый, голубой.
- Оранжевый – Фиолетовый, бледно-голубой, ярко-синий.

- Салатно-желтый – Бледно-розовый, серовато-голубой.
- Желтый – Фиолетовый, голубой, зеленый.
- Бледно-желтый – Светло-лиловый, серовато-розовый, бледно-зеленый.
- Золотистый – светло-серый, зеленый, темно-красный.
- Темно-зеленый – Коричневый, беж.
- Серо-зеленый, цвет морской волны – Васильковый, оранжевый.
- Бледно-зеленый – Розовый, темно-зеленый, лиловато-розовый.
- Синий – желтый, песочный, оранжевый.
- Серо-голубой – Бордо, серый.
- Бледно-голубой – Бледно-сиреневый, бледно-желтый.
- Темно-лиловый – Оранжевый, серый.
- Фиолетовый – Светлые и темные оттенки зеленого.
- Бледно-сиреневый – Зеленый, серый, розовато-лиловый.
- Розовато-лиловый – Изумрудно-зеленый, темно-красный, коричневый.
- Коричневый – Оранжевый, красный, беж.
- Серый – Фиолетовый, малиновый, бледно-сиреневый.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА

За те годы, что существует наука о цвете, давались многочисленные оценки феномена цвета и цветового видения. Однако все их можно свести к одному простому определению: цвет есть совокупность психофизиологических реакций человека на световое излучение, исходящее от различных самосветящихся предметов (источников света) либо отраженное от поверхности несамосветящихся предметов, а также (в случае прозрачных сред) прошедшее сквозь них.

Таким образом, человек имеет возможность видеть окружающие его предметы и воспринимать их цветными за счет света – понятие физического мира, но сам цвет уже не является физическим понятием, поскольку это субъективное ощущение, которое рождается в нашем сознании под действием света.

Очень точное и емкое определение цвета дано Джадд и Вышецки: «... сам по себе цвет не водится к чисто физическим или чисто психологическим явлениям. Он представляет собой характеристику световой энергии (физика)» через посредство зрительного восприятия (психология).

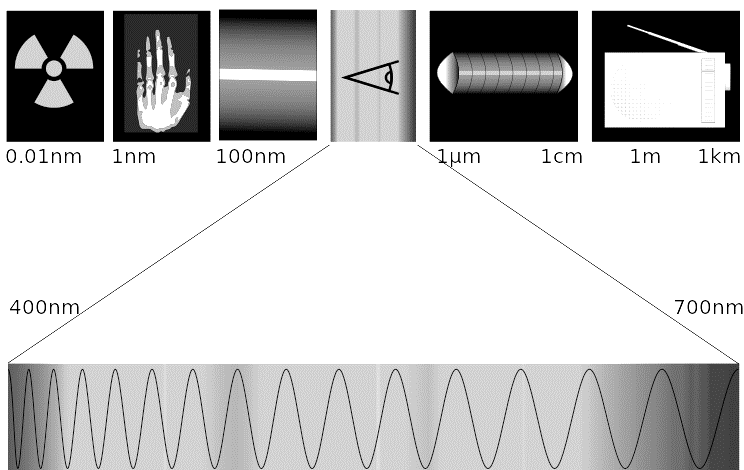


Рис. 2.1. Структура белого света

Свет (в физической оптике) – электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом.

В качестве коротковолновой границы спектрального диапазона, занимаемого светом, принят участок с длинами волн в вакууме 380–400 нм, а в качестве длинноволновой границы – 760–780 нм.

В широком смысле (вне сферы физической оптики) светом часто называют любое оптическое излучение, т.е. такое электромагнитное излучение, длины волн которого лежат в диапазоне с приблизительными границами от единиц нанометров до десятых долей миллиметра. В этом случае в понятие «свет», помимо видимого излучения, включают как инфракрасное, так и ультрафиолетовое излучение.

Свет может рассматриваться либо как электромагнитная волна, скорость распространения в вакууме которой постоянна, либо как поток фотонов – частиц, обладающих определённой энергией, импульсом, собственным моментом импульса и нулевой массой (или, как говорили ранее, *нулевой массой покоя*).

В колориметрии (наука об измерении цвета) излучение, попавшее в глаз и вызвавшее цветовые ощущения, называется цветовым стимулом.

Количественная характеристика цвета называется светлотой, качественная – цветностью. При этом цветность, в свою очередь, характеризуется цветовым тоном и насыщенностью.

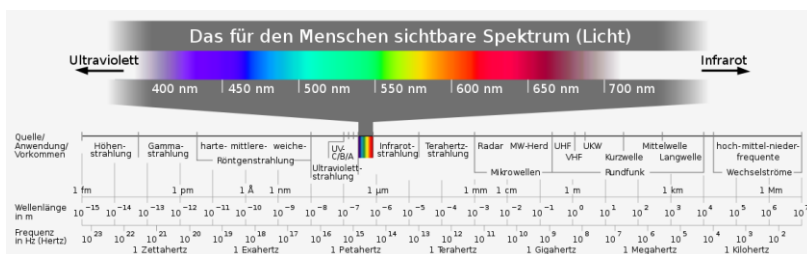


Рис. 2.2. Деление спектра электромагнитных излучений на зоны

Спектральные цвета. О спектральном составе белого света известно каждому: если неокрашенный свет разложить призмой, то образуются так называемые «семь основных цветов спектра». Названия основных цветов, приблизительные зоны (нм) спектра, которым они принадлежат и которые оказывают воздействие на зрительный аппарат, приведены ниже (в порядке уточнения можно добавить, что в спектре, по цветовому тону, глаз различает до 150 тонов, если рассматривать строго монохроматическое излучение, а также около 30 бихроматических, пурпурных).

Таблица 2.1
Спектральные диапазоны

Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон частот, ТГц	Диапазон энергии фотонов, эВ
<u>Красный</u>	625–740	480–405	1,68–1,98
<u>Оранжевый</u>	590–625	510–480	1,98–2,10
<u>Жёлтый</u>	565–590	530–510	2,10–2,19
<u>Зелёный</u>	500–565	600–530	2,19–2,48
<u>Голубой</u>	485–500	620–600	2,48–2,56
<u>Синий</u>	440–485	680–620	2,56–2,82
<u>Фиолетовый</u>	380–440	790–680	2,82–3,26

2.1. Природа и свойства излучений

Энергетические, эффективные и световые характеристики оптического излучения. Материальным носителем излучения является фотон, существующий только в

движении и обладающий, согласно квантовой теории излучения, корпускулярно-волновым дуализмом, т.е. свойствами волны и частицы одновременно. Как частица фотон характеризуется массой, как волна – длиной волны и частотой. Согласно формуле Планка, энергия фотона (квант энергии электромагнитного излучения) определяется как:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (2.1)$$

где ν – частота фотона;

$h=6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (фундаментальная физическая константа); а согласно формуле Эйнштейна:

$$\varepsilon = mc^2, \quad (2.2)$$

где m – масса фотона;

$c = 2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме
фундаментальная физическая константа).

Исключив энергию в выражениях (2.1) и (2.2), можно получить связывающую массу фотона с его частотой формулу:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (2.3)$$

Длина волны излучения λ связана с частотой соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (2.4)$$

Диапазон длин волн электромагнитных колебаний достаточно широк и простирается от долей ангстрема (10^{-10} м) до километров. К оптической области спектра относится лишь излучение с длинами волн от 0,01 до 1000 мкм. Такое излучение

создается в результате возбуждения электронных оболочек атомов и теплового движения молекул.

Как видно из табл. 2.2, в которой представлено примерное деление спектра электромагнитных излучений на зоны, в оптической области можно выделить три основных зоны: ультрафиолетовую, видимую, инфракрасную.

Ультрафиолетовое излучение обладает самой высокой мощностью (в пределах выделенной зоны) и сильным фотохимическим действием.

Излучение видимого диапазона, несмотря на узость интервала, позволяет видеть все цветное многообразие окружающего мира. Как будет показано далее, человеческий глаз практически не воспринимает излучения с крайними длинами волн. Видимый свет также обладает значительным фотохимическим и фотофизическим действием, но в меньшей степени, чем ультрафиолет.

Таблица 2.2

Деление спектра электромагнитных излучений на зоны

Наименование диапазона	Длина волны излучения, мкм
γ -лучи	менее 0,0001
Рентгеновское излучение	0,0001–0,01
Ультрафиолет	0,01–0,38
Видимый свет	0,38–0,78
Инфракрасное излучение	0,78–1000
Радиоволны	Более 1000

Инфракрасное излучение обладает минимальной мощностью; для него характерно, прежде всего, тепловое действие, и, в значительно меньшей степени, фотохимическое и фотофизическое.

Практическое значение освещения привело к тому, что световые измерения начали производить, начиная с XVII века, когда представления об энергии еще не были освоены наукой. Поэтому первоначально в основу фотометрии были положены произвольно выбранные величины.

За единицу силы света и в качестве эталона была принята обыкновенная свеча – в современной терминологии – *кандела*, *кд* (англ.).

Совершенно очевидно, поскольку свечи имели самые разнообразные характеристики, вскоре возникла острая необходимость стандартизировать этот ненадежный эталон. Оговаривались материал, диаметр или сколько свечей такого-то сорта идет на фунт веса и т.д.

До последнего времени за эталон силы света принималось излучение «абсолютно черного тела» (*физическая абстракция – см. далее*) при температуре затвердевания платины. Сила света, испускаемого с 1 см^2 абсолютно черного тела при температуре 2042° К в направлении нормали принята равной 60 кд.

Новое определение канделы, установленное в 1979 г., позволяет воспроизводить канделу без создания абсолютно черного тела, что, соответственно, дает возможность повысить точность ее воспроизведения. Согласно современному определению, кандела равна силе света источника, испускающего в заданном направлении монохроматическое излучение частотой 540×10^{12} Гц, сила излучения (*см. далее*) которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт/ср}$.

Для количественной оценки видимого излучения может быть использован достаточно широкий круг величин. Условно их можно разделить на две системы единиц: энергетическую и световую. В энергетической системе базовой величиной является энергия, переносимая излучением, в световой системе излучения оцениваются по их действию на человеческий глаз.

2.2. Энергетическая система единиц

Рассмотрим энергетическую систему единиц. Поток (мощность) излучения (Φ) в этой системе является основной единицей. За поток (мощность) излучения принимают энергию (dW), которая переносится излучением через некоторую поверхность в единицу времени (dt), превышающую период электромагнитных колебаний:

$$\Phi = \frac{dW_e}{dt}. \quad (2.5)$$

Величина Φ является интегральной с точки зрения длины волны и выражается в ваттах (Вт).

Интересует, как правило, не сам поток излучения, а его распределение по спектру излучения. В этом случае пользуются дифференциальной величиной (φ_λ), называемой спектральной интенсивностью или спектральной плотностью излучения:

$$\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}. \quad (2.6)$$

Зная вид функции распределения спектральной интенсивности $\varphi_\lambda = f(\lambda)$, можно определить как полный поток излучения, так и мощность излучения любой части спектра подбором соответствующих пределов интегрирования λ_1 и λ_2 :

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda d\lambda. \quad (2.7)$$

Для пространственного распределении потока излучения используют две смежные величины: *энергетическая освещенность* (используется также термин «облученность») – для несамосветящихся тел; *энергетическая светимость* – для самосветящихся тел и оценки отраженного потока излучения несамосветящихся тел. Под освещенностью (E_e) понимается отношение потока излучения к единице освещаемой поверхности:

$$E_e = \frac{d\Phi}{dQ}, \quad (2.8)$$

Под светимостью (R_e) понимают отношение потока излучения, испускаемого с единицы площади светящейся или отражающей поверхности к элементу освещаемой поверхности:

$$R_e = \frac{d\Phi}{dQ} . \quad (2.9)$$

Размерность обеих этих величин – ватт на м^2 ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

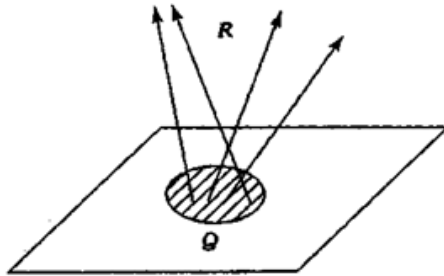


Рис. 2.3. К определению понятия «светимость»

Сила излучения (энергетическая сила света – I_e) есть аналог силы света, используемой в световой системе единиц. Под энергетической силой света в данном контексте понимается поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла $d\omega$, в пределах которого распространяется излучение:

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega} . \quad (2.10)$$

Единица измерения – ватт настерадиан ($\text{Вт}/\text{ср}$).

Что же представляет собой телесный угол? Это часть пространства, заключенная внутри одной полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Размерности телесный угол не имеет, однако существует единица его измерения –стерадиан. Согласно принятому определению,стерадиан равен

телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности этой сферы площадь квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Энергетическая яркость (B_e) – величина, равная отношению энергетической силы света (dI_e) элемента излучающей поверхности к площади (dQ) проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$B_e = \frac{dI_e}{dQ}, \quad (2.11)$$

Единица измерения – Вт/ср/м².

Связь между энергетической яркостью и основной величиной – потоком излучения – можно вычислить, подставив соответствующие значения (2.10) в формулу (2.11):

$$B_e = \frac{d^2\Phi}{dQ \, d\omega}. \quad (2.12)$$

Яркость характеризует не только источники, непосредственно излучающие свет (самосветящиеся объекты), но и вторичные источники – тела, отражающие свет от первичного источника (несамосветящиеся объекты).

Среди других энергетических величин, используемых в светотехнике, важными являются энергия излучения (W) и энергетическая экспозиция (H_e). Они определяются выражениями:

$$W_e = \int_0^t \Phi(t) dt, \quad (2.13)$$

где $\Phi(t)$ – функция изменения потока излучения во времени.

Под энергетической экспозицией (H_e) понимают отношение плотности энергии (dW_e) к элементу облучаемой поверхности (dQ):

$$H_e = \frac{dW_e}{dQ}, \quad (2.14)$$

где H_e – плотность энергии;

dQ – элемент облучаемой поверхности.

Согласно закону сохранению энергии, любой процесс взаимодействия излучения со средой может быть описан равенством:

$$dW_{полн} = dW_{эфф} + dW_{потерь}, \quad (2.15)$$

где $dW_{полн}$ – полная энергия, переданная среде;

$dW_{эфф}$ – энергия, преобразуемая средой в другие формы (энергия химических реакций, электрический ток и т.д.) и характеризующая ее полезную часть;

$dW_{потерь}$ – нежелательный сопутствующий процесс расходования энергии (например, нагрев).

Тела и среды, в которых происходит преобразование энергии оптического излучения в другие формы энергии, в фотометрии принято называть *приемниками оптического излучения*. Примерами могут служить человеческий глаз, фотоэмульсии, электронные фотоэлементы. (*Более подробно типы приемников будут рассмотрены далее*).

Продифференцировав выражение (2.15) по времени, можно перейти к потокам (мощностям):

$$\Phi = P_{эфф} + N_{потерь}, \quad (2.16)$$

где Φ , по определению (2.5), – поток излучения;

$P_{эфф}$ – эффективный поток; $N_{потерь}$ – мощность потерь.

Таким образом, эффективным потоком называется практически используемая полезная часть потока (мощности) излучения. Отношение эффективного потока к потоку, упавшему на приемник излучения, в фотометрии называется светочувствительностью (*спектральная чувствительность, световая эффективность*).

В общем случае светочувствительность зависит от длины волны падающего излучения и выражается формулой:

$$S(\lambda) = k \frac{P_{эфф}(\lambda)}{\Phi(\lambda)}, \quad (2.17)$$

где k – коэффициент, связанный с выбором единиц, в которых измеряются входящие в формулу величины.

Эффективный поток отличается от потока излучения лишь тем, что оценивается мерой реакции приемника, спектральная чувствительность которого (2.17) должна быть принята во внимание при определении эффективности потока. Во всех других отношениях эффективный поток аналогичен потоку излучения. Заметим, что, опираясь в качестве исходной величины на эффективный поток, можно построить систему эффективных величин. Примером такой системы является световая система единиц.

2.3. Световая система единиц

В световой системе единиц основной является сила света I – величина, равная отношению светового потока, распространяющегося от источника излучения в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к этому телесному углу. Единица измерения силы света – кандела (кд).

Под световым потоком F понимают мощность излучения, оцененную по его действию на человеческий глаз. Единица измерения светового потока – люмен (лм).

Действие светового потока на глаз вызывает его определенную реакцию. В зависимости от уровня действия светового потока работает тот или иной вид светочувствительных приемников глаза, называемых палочками и колбочками. В условиях низкого уровня освещенности (например, при свете Луны) глаз видит окружающие предметы в основном за счет палочек.

При высоких уровнях освещенности начинает работать аппарат дневного зрения, за который ответственны колбочки. По своему светочувствительному веществу колбочки делятся на три группы с разной чувствительностью в различных областях спектра. Поэтому, в отличие от палочек, они реагируют не только на световой поток, но и на его спектральный состав. Таким образом, можно сказать, что световое действие двумерно.

Количественная характеристика реакции глаза, связанная с уровнем освещения, называется светлотой.

Качественная характеристика, связанная с различным уровнем реакции трех групп колбочек, называется цветностью.

Было принято, что точечный источник (*см. далее*), излучающий свет равномерно во все стороны и имеющий силу света I , создает в телесном угле 4π световой поток F , который вычисляется по формуле:

$$F = 4\pi I, \quad (2.18)$$

а в любом другом телесном угле ($d\omega$):

$$dF = Id\omega. \quad (2.19)$$

Таким образом, $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \times 1 \text{ ср}$ стерадиан. 1 лм – это создаваемый равномерным источником света поток, сила которого равна 1 кд , внутри телесного угла 1 ср . Иногда бывает удобно за основную величину принять не канделу, а люмен. В этом случае сила света становится производной величиной:

$$I = \frac{dF}{d\omega}. \quad (2.20)$$

Пусть светящаяся поверхность наблюдается в направлении (l), составляющем угол γ с нормалью к поверхности. Обозначим dQ площадь элемента поверхности, сила света которого – dI . Проекция элемента с площадью dQ на плоскость, перпендикулярную l , будет иметь площадь $dQ \cos \gamma$. Это размер элемента dQ , видимого в направлении l . Отсюда следует, что в этом направлении (l) яркость поверхности (визуальная яркость – B) составляет:

$$B = \frac{dI}{dQ \cos \gamma} . \quad (2.21)$$

Единица измерения визуальной яркости – кандела на квадратный метр (кд/м²). Освещенные несамосветящиеся предметы отражают или рассеивают часть упавшего на них света и приобретают некоторую яркость, становясь вторичными источниками света. Освещенность при этом определяется формулой:

$$E = \frac{dF}{dQ} , \quad (2.22)$$

где dQ – элемент поверхности, на которую падает поток (dF). Единица освещенности – люкс (лк), размерность – люмен на квадратный метр (лм/м²). Если свет падает на поверхность dQ по нормали, то, по определению телесного угла:

$$dQ = r^2 \cdot d\omega , \quad (2.23)$$

где r – расстояние от источника света до освещаемой поверхности.

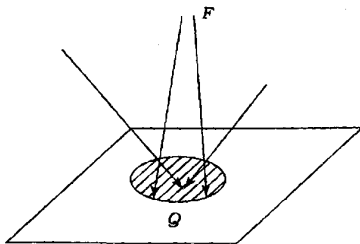


Рис. 2.4. К определению понятия «освещенность»

Подставив выражения (2.19) и (2.23) в выражение (2.22), получим:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2.24)$$

Формула (2.24) имеет простой физический смысл: освещенность поверхности, перпендикулярной к направлению распространения света, пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него («закон эр-квадрат»).

Световая энергия и световая экспозиция определяются так же, как и в энергетической системе единиц при условии замены лучистого потока световым.

Установить связь между энергетическими и световыми величинами можно, только изучив спектральную чувствительность глаза. Из всего спектра электромагнитных излучений глаз воспринимает как свет лишь небольшую область 380–780 нм. Но и в этом узком интервале чувствительность глаза к различным длинам волн весьма различна.

Способом количественных измерений служит визуальное выравнивание яркости двух фотометрических полей: стандартного и измеряемого.

Представим схематически возможность следующего простого эксперимента. На один из двух белых экранов, поставленных рядом, направляется излучение монохроматического источника с длиной волны λ_0 , мощностью Φ_0 , а на другой – излучение с длиной волны λ_1 , мощность которого варьируют до тех пор, пока не установят равенство яркостей обоих экранов.

Пусть это случится при мощности Φ_1 . Глаз с большой точностью устанавливает равенство двух яркостей (в благоприятных условиях) с погрешностью менее 1%. Яркости равны, визуальный эффект одинаков, а мощности различны.

Из этого следует, что чувствительность глаза к излучению определенной длины $V(\lambda)$ тем выше, чем меньше затрачиваемая мощность.

Данное утверждение можно записать в виде пропорции:

$$\frac{V_1(\lambda_1)}{V_0(\lambda_0)} = \frac{\Phi_0}{\Phi_1}. \quad (2.25)$$

Получив такие выражения для всего диапазона длин волн видимого света с разумно малым интервалом дискретизации $\Delta\lambda = 5\div 10$ нм, определим длину волны, для которой чувствительность максимальна – $V_{\max}(\lambda)$, и, приняв ее за единицу, выразим посредством нее другие чувствительности:

$$v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_{\max}(\lambda)}. \quad (2.26)$$

Введенная таким образом величина называется *относительной спектральной чувствительностью* (относительная спектральная световая эффективность). Это важная характеристика, представляющая практический интерес для установления связи между энергетическими и световыми единицами.

Трудность заключается в больших индивидуальных отличиях чувствительности. Были проведены многие измерения с различными испытуемыми и усреднены результаты. На основании анализа ряда подобных исследований Международная комиссия по освещению – МКО (часто используется аббревиатура CIE, от французского Commission Internationale de l'Eclairage) утвердила значения относительной спектральной световой эффективности для стандартного фотометрического наблюдателя (рис. 2.5 и табл. 2.3).

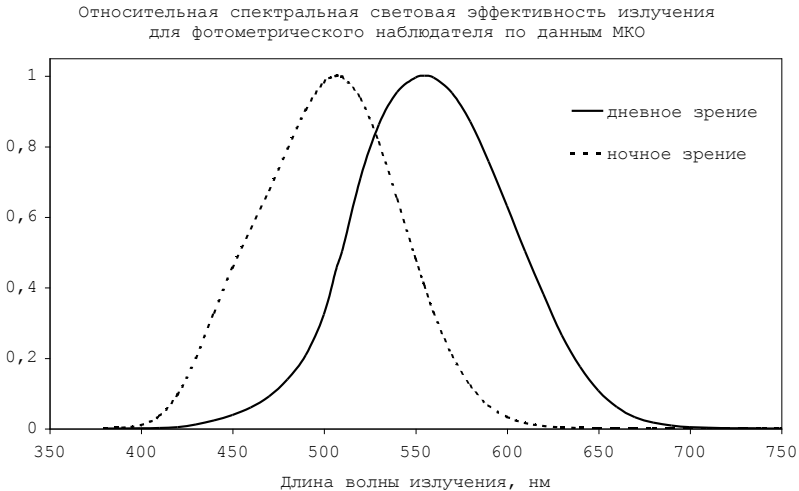


Рис. 2.5. Кривые видности

Сообразуясь с этими значениями, можно определить мощность излучения при переходе к световому потоку для монохроматического излучения с длиной волны λ в узком интервале длин волн $d\lambda$ по формуле:

$$dF = k\nu(\lambda)\varphi_{\lambda}d\lambda, \quad (2.27)$$

где $k = 683 \text{ лм/Вт}$ — (максимальная) спектральная световая эффективность, т.е. световой поток, создаваемый одним ваттом излучения с длиной волны, для которой $\nu(\lambda) = 1$.

На практике установлено, что в условиях дневного освещения максимальную чувствительность человеческий глаз имеет к излучению с $\lambda = 555 \text{ нм}$. При этом на каждую единицу светового потока F_{555} (на 1 лм) приходится мощность излучения $\Phi_{555} = 0,00146 \text{ Вт}$.

Таблица 2.3

Относительная спектральная световая эффективность излучения для стандартного фотометрического наблюдателя (по данным МКО)

λ , нм	v (дневное зрение)	v' (ночное зрение)	λ , нм	v (дневное зрение)	v' (ночное зрение)
380	0,000 0	0,000 589	580	0,870	0,121 2
390	0,000 1	0,002 209	590	0,757	0,065 5
400	0,000 4	0,009 29	600	0,631	0,033 15
410	0,001 2	0,034 84	610	0,503	0,015 93
420	0,004 0	0,096 6	620	0,381	0,007 37
430	0,011 6	0,199 8	630	0,265	0,003 335
440	0,023	0,328 1	640	0,175	0,001 497
450	0,038	0,455	650	0,107	0,000 677
460	0,060	0,567	660	0,061	0,000 312 9
470	0,091	0,676	670	0,032	0,000 148 0
480	0,139	0,793	680	0,017	0,000 071 5
490	0,208	0,904	690	0,008 2	0,000 035 33
500	0,323	0,982	700	0,004 1	0,000 017 80
507	0,458	1,000	710	0,002 1	0,000 009 14
510	0,503	0,997	720	0,001 05	0,000 004 78
520	0,710	0,935	730	0,000 52	0,000 002 546
530	0,862	0,811	740	0,000 25	0,000 001 379
540	0,954	0,650	750	0,000 12	0,000 000 760
550	0,995	0,481	760	0,000 06	0,000 000 425
555	1,000	0,405	770	0,000 03	0,000 000 241
560	0,995	0,328 8	780	0,000 015	0,000 000 139
570	0,952	0,207 6			

Из формулы (2.27) следует, что константой для всего видимого диапазона является коэффициент k :

$$k = \frac{F_{555}}{\Phi_{555}} = \frac{1}{0,00146} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}, \quad (2.28)$$

Для определения светового потока (F) сложного излучения нужно применить интеграл выражения (2.27). (Заметим, что

упрощенно интеграл можно представить как аналог суммы для бесконечного числа бесконечно малых слагаемых):

$$F = k \int \varphi_{\lambda} v(\lambda) d\lambda. \quad (2.29)$$

Теоретически следовало бы написать пределы интегрирования в выражении (2.29) от 0 до ∞ . Интеграл всегда сходится, так как вне узкого диапазона от 380 до 780 нм величина $v(\lambda)$ практически равна нулю. В дальнейших наших рассуждениях подразумевается, что интеграл (2.29) берется в пределах видимой области спектра.

От показателей светового потока легко перейти к силе света, яркости, освещенности, т.е. по формулам (2.20) – (2.24) связать световые единицы (табл. 2.4).

Именно установление связи между мощностью излучения и световым потоком позволило дать в 1979 г. современное определение канделы. Значение 540×10^{12} Гц, фигурирующее в определении канделы, точно соответствует 555 нм.

Итак, резюмируем: функция относительной спектральной световой эффективности $v(\lambda)$, о которой говорилось выше, характеризует дневное (фотопическое) зрение, когда работают только колбочки. Чувствительность палочек иная.

Она характеризует ночное (скотопическое) зрение, для которого максимум спектральной чувствительности приходится на $\lambda = 507$ нм (на рис. 2.5, показана пунктирной кривой).

При средних яркостях работают и колбочки, и палочки, чему соответствуют промежуточные значения эффективности.

Во избежание подобных разночтений в фотометрии введены стандартные источники освещения.

Таблица 2.4

Связь между энергетическими и световыми величинами

Энергетические	Световые			
Название, единица измерения	Формула	Связь	Формула	Название, единица измерения
Поток (мощность) излучения – Φ , ватт	Основная единица	$dF = k\nu(\lambda)\varphi_\lambda d\lambda$ $dF = k\nu(\lambda)d\Phi$ $\varphi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$	$dF = Id\omega$	Световой поток – F , люмен; в ряде случаев принимается за основную единицу
Сила излучения (энергетическая сила света) – I_e , ватт на стерадиан	$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}$	$dI = k\nu(\lambda)dI_e$	Основная единица в СИ	Сила света – I , канделла
Энергетическая освещенность (облученность) – E_e , ватт на квадратный метр	$E_e = \frac{d\Phi}{dQ}$	$dE = k\nu(\lambda)dE_e$	$E = \frac{dF}{dQ}$, $dE = \frac{dI}{r^2}$	Освещенность – E , люкс
Энергетическая светимость (излучательность) – R_e , ватт на квадратный метр	$R_e = \frac{d\Phi}{dQ}$	$dR = k\nu(\lambda)dR_e$	$R = \frac{dF}{dQ}$	Светимость – R , люмен на квадратный метр
Энергетическая яркость – B_e , ватт на стерадиан- квадратный метр	$B_e = \frac{d^2\Phi}{dQ \cdot d\omega}$	$dB = k\nu(\lambda)dB_e$	$B = \frac{dI}{dQ}$	Яркость – B , канделла на квадратный метр
Энергия излучения – W_e , джоуль, ватт- секунда	$dW_e = \Phi dt$	$dW = k\nu(\lambda)dW_e$	$dW_e = Fdt$	Световая энергия – W , люмен-секунда
Энергетическая экспозиция – H_e , джоуль на квадратный метр, ватт-секунда на квадратный метр	$dH_e = \frac{\Phi dt}{dQ}$ $H_e = \frac{\Phi t}{Q} =$ $= E_e t^{(*)}$	$dH = k\nu(\lambda)dH_e$	$dH = \frac{Fdt}{dQ}$ $H = \frac{Ft}{Q} =$ $= Et^{(*)}$	Световая экспозиция – H , люкс-секунда

Примечание: * используется в случае, если освещенность постоянна во времени.

Что касается объективности световых измерений. Согласно ГОСТ 7601-78, световой поток F определяется как «*Величина, пропорциональная потоку излучения, оцененному с учетом относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения*», т.е. с учетом $v(\lambda)$, которая характеризует субъективное восприятие света.

Естественно, возникает вопрос, что есть световой поток – физический стимул или субъективное ощущение? Если верно последнее, то все величины в световой системе единиц должны быть отнесены к области физиологии и психологии, но не к физике.

Было доказано, что глаз можно рассматривать как селективный приемник излучения, а функция $v(\lambda)$ определяется официально утвержденными международными соглашениями (табл. 2.4), но не произвольным наблюдателем. Кандела, люмен и люкс являются такими же равноправными единицами физических величин, как ватт и джоуль.

2.4. Источники излучения и их классификация

В теории цвета за источники излучения принимают не только тела, которые являются самосветящимися (первичными источниками излучения), но и источники отраженного или проходящего излучения (отражающие либо пропускающие свет) – вторичные источники. Мы под источником излучения будем понимать *источник оптического излучения*, т.е. устройство, преобразующее любой вид энергии в энергию электромагнитного излучения оптического диапазона спектра.

В рамках задач теории цвета источники излучения удобно классифицировать следующим образом:

- по размеру источника;
- по характеру распределения силы излучения в пространстве (по форме фотометрического тела);
- по спектральному составу излучения;
- по времени действия;
- по цветовой температуре.

В зависимости от соотношения размеров излучателя и расстояния до исследуемой точки фотоприемника источники излучения условно делятся на две категории: точечные источники и источники конечных размеров.

Точечным называется источник, максимальный линейный размер которого минимум на порядок (т.е. в 10 раз) меньше расстояния до точки наблюдения. Все остальные считаются источниками конечных размеров. Для точечных источников выполняется «закон эр-квадрат» (2.24) – закон обратных квадратов, а для источников конечных размеров верна формула:

$$dE = dI \frac{\cos \alpha}{r^2}, \quad (2.30)$$

где α – угол между направлением излучения и нормалью к освещаемой поверхности.

Если из точки, в которой расположен точечный источник излучения, отложить в различных направлениях пространства векторы силы света и через их концы провести поверхность, то получится *фотометрическое тело* источника, характеризующее распределение потока излучения данного источника в окружающем его пространстве.

По мере удаления точки наблюдения от источника конечных размеров, его относительные линейные размеры достигают значений, при которых источник можно считать точечным.

В зависимости от формы фотометрического тела источника излучателя делятся на симметричные и несимметричные. Симметричным называется источник, фотометрическое тело которого имеет осевую симметрию (иначе говоря, это тело вращения).

Спектральный состав излучения является важнейшей характеристикой источника. В рамках настоящего курса под спектром будем понимать выраженный графически вид функции спектральной плотности в зависимости от длины волны излучения: $\lambda = f(\lambda)$.

Принято различать спектры линейчатые (набор достаточно узких линий), полосатые (набор полос достаточно широких участков спектра) и сплошные (непрерывные). В светотехнике различают три основных вида источников излучения: тепловые, люминесцентные, лазерные. Спектр каждого вида источников отличается особыми характерными особенностями.

Любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, излучает энергию в виде электромагнитных волн. Если возбужденное состояние молекул и атомов вещества вызвано нагреванием, то излучение, посылаемое телом в пространство, является тепловым. Как источники теплового излучения для светотехники наибольший интерес представляют твердые тела.

Тепловые излучатели на основе твердых сред обладают непрерывным спектром. Это спектр есть факт сложения бесконечно большого количества монохроматических излучений, мощность которых непрерывно меняется с длиной волны. При температуре около 800 К большинство тел начинает светиться красным светом. С дальнейшим повышением температуры интенсивность излучения увеличивается, а спектр его обогащается излучениями с более короткой длиной волн. Излучаемый свет становится более белым.

Примером теплового источника является обыкновенная лампа накаливания, имеющая излучающий элемент в виде спирали из вольфрама. Помимо основных электрических параметров (номинальное напряжение, мощность), светотехнических (световой поток, сила света) и эксплуатационных (срок службы), лампы накаливания имеют важную характеристику – световую отдачу (η). Этот своего рода аналог КПД показывает величину светового потока, излучаемого в пространство, приходящейся на 1 Вт подведенной электрической мощности. Световая отдача ламп накаливания невысока и составляет 7–22 лм/Вт.

Для оценки и сравнения характеристик тепловых излучателей используют математическую модель – **абсолютно черное тело** (для краткости его обычно называют черным телом). Закон сохранения энергии показывает, что тело способное поглотить большую энергию при данной

температуре, сильнее ее излучает. В противном случае тело нагревалось бы само собой. Абсолютно черным называется тело, способное поглотить все упавшее на него излучение, т.е. ничего не отразить.

Черное тело нельзя получить, окрасив какой либо предмет черной краской. Во-первых, черная краска, поглощая свет видимой части спектра, может сильно отражать в недоступной человеческому глазу области спектра. Во-вторых, на опыте можно показать, что самая черная в мире краска все-таки отражает минимальную долю видимой части спектра (иначе мы бы просто не увидели предмет, окрашенный подобной краской). Чернота абсолютно черного тела означает, что нулю равны его коэффициенты отражения и пропускания.

Представить абсолютно черное тело можно следующим образом. Возьмем полый шар и выкрасим его изнутри и снаружи самой черной краской. Прделаем в шаре маленькое отверстие. Если мы теперь осветим шар, то заметим, что отверстие темнее черной поверхности шара, так как это отверстие, естественно, совсем не отражает падающего на шар света, а черная поверхность все же что-то отражает. Излучение, попавшее внутрь шара, будет поглощаться стенками и частично отражаться от них. Этот процесс происходит многократно, вплоть до полного поглощения. Сделав такой шар из огнеупорного материала, можно нагревать его до различных температур. Полость окажется наполненной излучением абсолютно черного тела, соответствующим установившейся температуре его стенок. Такое излучение называется равновесным.

Макс Планк, немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики, опираясь на предложенную им теорию излучения, вывел формулу, представляющую равновесное излучение абсолютно черного тела функцией температуры (закон Планка):

$$r_{\lambda}(T) = 2\pi\hbar c^2 \lambda^{-5} (\exp(\frac{ch}{\lambda kT}) - 1)^{-1}, \quad (2.31)$$

где r_λ – спектральная плотность энергетической светимости, т.е. мощность излучения с единицы поверхности (энергетическая светимость), приходящаяся на единичный интервал длин волн;

$c = 2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света;

λ – длина волны излучения;

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж·К – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

Часто множители, содержащие фундаментальные физические константы, объединяют в виде постоянных:

$$c_1 = 2\pi\hbar c^2, \quad c_2 = \frac{ch}{k}. \quad (2.32)$$

Очевидно, что спектральная плотность энергетической светимости имеет размерность $\text{Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{м}^{-1}$. Первые два множителя означают ватты с квадратного метра (энергетическая светимость), третий – в единичном интервале длин волн (спектральная плотность).

Формула Планка (2.31) обобщает выведенные до открытия квантовой теории света законы Стефана-Больцмана, Вина, Релея-Джинса. Так, проинтегрировав выражение (2.32) по всем возможным значениям длин волн, можно получить закон Стефана-Больцмана, который гласит: *энергетическая светимость абсолютно черного тела растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры*, и представляет собой формулу для энергетической светимости:

$$R_e = \sigma T^4, \quad (2.33)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$,

Взяв производную от выражения (2.2) по λ , приравняв ее к нулю и решив полученное уравнение относительно λ , считая T

константой, получим выражение, отражающее закон смещения максимума, выведенный Вином:

$$\lambda_{\max} T = 2.896 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (2.34)$$

Закон Вина гласит: *с повышением температуры максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела смещается в сторону более коротких длин волн.* Максимум спектральной плотности излучения черного тела лежит в видимой области спектра ($\lambda = 380 \div 780$ нм) для значений температуры излучателя в пределах от $T = 4760$ К до $T = 10\,000$ К.

Как уже говорилось, любое реальное тело при данной температуре на всех длинах волн излучает меньше, чем черное. Обозначим (по аналогии) спектральную плотность энергетической светимости реального излучателя r_{λ}^H . Поглощательные способности (коэффициенты поглощения, безразмерные величины – см. далее) черного и реального тел обозначим соответственно $\alpha(\lambda)$ и $\alpha^H(\lambda)$, в общем случае, обе величины зависят еще и от температуры.

Уже отмечалось, что $\alpha(\lambda) = 1$ (абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение безотносительно к длине волны последнего).

Для реального (нечерного) тела всегда $\alpha^H(\lambda) < 1$, а так как для каждого тела излучательная способность пропорциональна поглощательной, то:

$$r_{\lambda}^H = \alpha^H(\lambda) r_{\lambda}. \quad (2.35)$$

Применимость законов излучения абсолютно черного тела к реальным телам с поправкой на коэффициент поглощения реального тела показывает выражение (2.36).

Если для какого-либо тела коэффициент поглощения $\alpha^H(\lambda)$ не зависит от длины волны, такое тело называется «серым излучателем».

Для серого излучателя справедливо соотношение:

$$\varphi_{\lambda}^n = \alpha^n \varphi_{\lambda}, \quad (2.36)$$

Таким образом, спектральная плотность излучения серого излучателя равна таковой для абсолютно черного тела, умноженной на коэффициент поглощения для серого излучателя.

При анализе излучения реальных тел, обладающих значениями коэффициента поглощения $\alpha'(\lambda) < 1$, необходимо учитывать не только собственное излучение реального тела, но и отраженное излучение. Отношение полной (собственной и отраженной) плотности излучения реального тела к плотности излучения черного тела, имеющего одинаковую температуру с исследуемым излучателем, принято называть *коэффициентом излучения*:

$$\varepsilon_T = \frac{R_e^P}{R_e}, \quad \varepsilon(\lambda, T) = \frac{r_{\lambda}^P}{r_{\lambda}} \quad (2.37)$$

где $\varepsilon_T, \varepsilon(\lambda, T)$ – интегральный, спектральный коэффициенты излучения;

R_e^T – полная энергетическая светимость реального тела;

R_e – энергетическая светимость абсолютно черного тела, имеющего ту же температуру, что и исследуемый излучатель.

Простым способом практического сопоставления характеристик реального и абсолютно черного тел является метод эквивалентных температур.

Эквивалентной температурой называется такая температура абсолютно черного тела, при которой его излучение по одной из характеристик равно излучению исследуемого тела. Характеристиками излучения, на основе которых определяются эквивалентные режимы, приняты следующие: плотность потока излучения (энергетическая светимость), яркость излучения в узкой области спектра и

цветность теплового излучения, которая определяется формой кривой спектральной плотности излучения на видимом участке спектра.

В зависимости от выбора характеристики, по которой производится сопоставление эквивалентности излучения, различают следующие эквивалентные температуры излучения:

1. Радиационная (энергетическая) температура (T_p) – температура черного тела, при которой плотность его излучения равна плотности излучения исследуемого реального тела при заданной (истинной) температуре.

2. Яркостная температура (T_y) – температура черного тела, при которой его яркость в зоне $\lambda = 655$ нм равна яркости в той же зоне спектра исследуемого излучателя при заданной (истинной) температуре.

3. Цветовая температура (T_u) – температура черного тела, при которой цветность (спектральный состав) его излучения одинакова с цветностью исследуемого излучения при заданной (истинной) температуре.

Для установления энергетической эквивалентности излучений на основании закона Стефана-Больцмана (2.33) и значения $\mathcal{E}_T$ – интегрального коэффициента излучения – (2.37) запишем условия энергетической эквивалентности излучения:

$$\sigma T_p^4 = \mathcal{E}_T \sigma T^4. \quad (2.38)$$

Полученное выражение энергетической эквивалентности излучения позволяет определить истинную температуру излучающего тела по значению радиационной температуры:

$$T = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\mathcal{E}_T}}. \quad (2.39)$$

Это соотношение показывает, что истинная температура всегда больше радиационной, поскольку для реальных тел $\mathcal{E}_T < 1$.

Связь между истинной и яркостной температурой описывается выражением:

$$T = \frac{C_2}{\lambda} \left[-\frac{C_2}{\lambda T_J} + \ln \varepsilon(\lambda, T) \right]^{-1}, \quad (2.40)$$

При выводе формулы (2.40) используется закон Вина (*подробнее см. далее*). Здесь же лишь отметим, что спектральный коэффициент теплового излучения реальных тел, так же как и интегральный, всегда меньше единицы, следовательно, логарифм имеет отрицательное значение, и истинная температура теплового излучателя больше яркостной, т.е. $T > T_J$.

Для удобства сравнения различных тепловых источников по их спектральным характеристикам пользуются цветовой температурой. Понятие «цветовая температура» применимо только к источникам с непрерывным спектром излучения. Источники смешанного излучения можно характеризовать цветовой температурой лишь с достаточной долей приближения.

Цветовую температуру излучателя со сплошным спектром можно определять с достаточной точностью отношением значений спектральной плотности излучения двух крайних узких зон видимого спектра.

Газоразрядные источники излучения. В таких источниках энергии излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металлов или их смесей. По сравнению с тепловыми источниками излучения (лампы накаливания) газоразрядные источники имеют ряд преимуществ:

- более высокая световая отдача и продолжительный срок службы (до 117 лм/Вт, до 20 000 час.);
- линейчатый спектр с расположением линий в любой части оптического диапазона — характер спектра определяется элементарным составом атмосферы, в которой горит газовый

разряд, и энергетическими уровнями возбуждения атомов и молекул газа;

- значительно большая яркость, чем яркость лампы накаливания;
- возможность создания коротких вспышек большой мощности.

В числе главных недостатков следующие:

- ухудшение светопередачи за счет линейчатого спектра газоразрядных ламп, что не позволяет использовать их в качестве источников освещения;
- присущая газоразрядным лампам явление пульсация светового потока и появление связанного с этим опасного для людей стробоскопического эффекта;
- необходимость применения балансного устройства, которое компенсирующего особенности вольт-амперной характеристики газоразрядных ламп;
- требование применения сложных и громоздких пускорегулирующих аппаратов, поскольку напряжение зажигания газового разряда значительно превышает рабочее напряжение лампы, а часто и напряжение сети;
- длительный период разгорания ламп (до 15 мин).

Газоразрядные лампы могут быть непрерывного или импульсного горения. Для генерации излучения используется тлеющий и дуговой разряд.

2.4.1. Люминесценция. Люминесцентные источники излучения

Явление люминесценции известно достаточно давно. Еще в средние века алхимики, пытаясь превратить тяжелые минералы в золото путем прокалки, заметили, что некоторые из них некоторое время светятся в темноте. *(Кстати, алхимики отличали два вида прокалывания: фактическое, до определенной температуры, вызванное огнем – от древесины, углей и потенциальное – то, что вызвано потенциальным огнем,*

например, золото сжигали в отражающейся печи с ртутью и аммиачной солью; серебро – с солью поваренной соли и щелочи).

Надо заметить, что явление люминесценции долго не находило объяснения. В настоящее время под люминесценцией понимают способность некоторых веществ излучать энергию, накопленную в пределах атома, при переходе электронов с высоких энергетических уровней на более низкие. Различают возбужденное и невозбужденное состояние атомов.

Под нормальным (невозбужденным) состоянием атома понимают такое, при котором электроны находятся на нижних энергетических уровнях, характерных для данного атома. В невозбужденном (устойчивом) состоянии атом может находиться сколь угодно долго. Получая энергию извне, электроны атома переходят на более высокие энергетические уровни, поглощая энергию порциями (квантами). При этом сам атом переходит в возбужденное (неустойчивое, нестабильное) состояние.

Характер энергетических уровней является строго индивидуальным для каждого элемента. Вещество, в состав которого входят возбуждаемые атомы, называется люминофором. В зависимости от того, за счет какой энергии происходит возбуждение люминофора, различают следующие виды люминесценции:

- *фотолюминесценция* – возбуждение производится фотонами поглощенного излучения оптической части спектра;
- *рентгенолюминесценция* – возбуждение производится фотонами поглощенных рентгеновских лучей;
- *катодолюминесценцию* – возбуждение происходит за счет кинетической энергии электронов, бомбардирующих люминофор;
- *электролюминесценция* – возбуждение производится переменным электрическим полем высокой частоты;
- *радиолюминесценция* – возбуждение происходит за счет излучения, возникающего при радиоактивном распаде ядер (α -, β -, γ – излучения), и космического излучения;

- хемилюминесценция и биолюминесценция – возбуждаются энергией химических процессов в веществах и живых организмах.

Дополнительными признаками, позволяющими отличить излучение люминесценции от других излучений, являются селективность, определяемая свойствами люминофора, и некогерентность (*существенный разброс фотонов по фазовым состояниям и степени поляризации*). Различают также самостоятельную, вынужденную и рекомбинационную люминесценцию.

При создании источников оптического излучения наиболее широкое применение нашло явление фотолюминесценции. Примером может служить лампа дневного света. Она представляет собой стеклянную трубку, внутри которой находятся небольшое количество ртути и малая доза инертного газа (аргон или криптон). УФ-излучение возбуждает свечение порошкообразного люминофора, который нанесен тонким равномерным слоем в видимой части спектра на внутреннюю поверхность трубки. Тлеющий разряд в парах ртути дает линейчатый спектр преимущественно в УФ-зоне спектра (250 нм).

Спектр излучения люминесцентной лампы носит непрерывный характер при наличии максимумов, связанных с линейчатым ртутным спектром, линии которого проникают сквозь слой люминофора без возбуждения люминесценции. Составляя различные смеси люминофоров можно добиться различных оттенков свечения лампы.

2.4.2. Лазеры

Лазер (анг. – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), или *оптический квантовый генератор (ОКГ)* – это устройство для генерации оптического излучения, основанное на использовании эффекта вынужденного излучения (напомним, что когерентность – это согласованность / скоррелированность во времени, нескольких колебательных или волновых процессов, проявляющаяся при их сложении).

Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом способен излучить фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излученный фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение (является его «точной копией»). Таким образом, происходит усиление света.

Этим данное явление (излучение) отличается от спонтанного излучения, в котором излучаемые фотоны имеют случайные направления распространения, поляризацию и фазу. Вероятность того, что случайный фотон вызовет индуцированное излучение возбужденного атома, в точности равно вероятности поглощения этого фотона атомом, находящимся в невозбуждённом состоянии.

Поэтому для усиления света необходимо, чтобы возбуждённых атомов в среде было больше, чем невозбужденных (так называемая инверсия населенностей). В состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется, поэтому используются различные системы *накачки* (освещение внешним источником света с целью перевода данной среды в возбужденное электронное состояние) активной среды лазера (оптические, электрические, химические и др.).

Основные свойства лазерного излучения, отличающие его от излучений других источников света:

- высокая когерентность (объем такой когерентности может превышать в 10^{17} объем когерентности световой волны той же интенсивности от моноэнергетичных нелазерных источников света);
- возможность генерации импульсов предельно малой длительности (до $1,6 \times 10^{-14}$ с);
- высокая мощность излучения (до 10^{14} Вт) в импульсном режиме генерации.

Лазеры различаются:

1) по типу активной среды:

- газовые (атомные, ионные, молекулярные),
- твердотельные (на примесных кристаллах и стеклах, полупроводниковые, на центрах окраски),
- жидкостные;

2) по режиму генерации:

- непрерывные,
- импульсные (в режиме свободной генерации, с модуляцией добротности).

В полиграфии используются следующие типы лазерных источников света:

- аргон-ионный голубой лазер с длиной волны 488 нм;
- гелий-неоновый красный лазер с длиной волны 633 нм;
- маломощный красный лазерный диод с длиной волны 670 нм;
- мощный инфракрасный лазерный диод с длиной волны 830 нм;
- инфракрасный мощный лазер Nd YAG на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длиной волны 1064 нм;
- зеленый лазер на иттрий-алюминиевом гранате с двойной частотой Nd YAG с длиной волны 670 нм.

Лазеры применяются для записи информации в их носители на примере широкой номенклатуры изготавливающих печатные формы устройств Computer-to-Plate.

В экспонирующих модулях CtP-устройств используются газовые; твердотельные; полупроводниковые лазеры.

Для полиграфии наибольший интерес представляют газовые и твердотельные лазеры.

Газовые лазеры. Активной средой лазеров данного типа является газ или смесь газов. Особенностью газовой активной

среды является ее высокая оптическая однородность, что позволяет применять большие длины резонатора и добиваться высокой направленности и монохроматичности излучения. Оптическая накачка газовой системы неэффективна, так как в газе отсутствуют широкие полосы поглощения. Поэтому лазеры данной группы накачиваются пропусканием через активную среду электрического тока, или так называемым тлеющим разрядом. Реже используются методы химической накачки, газодинамического расширения и т.п.

Аргоновый лазер может испускать свет семи различных длин волн, однако более 80% подобных лазеров работают в диапазонах 488 (голубой) и 514,5 нм (зеленый). По сравнению с СО₂-лазером аргоновый лазер гораздо дешевле и проще в эксплуатации.

В технологии Computer-to-Plate аргоновый лазер сегодня используется редко. В настоящее время аргоновые лазеры являются самыми мощными источниками непрерывного когерентного излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

Широкому распространению мощных аргоновых лазеров мешают их высокая стоимость, низкий КПД (до 10%) и большая потребляемая мощность (3–5 кВт).

Вынужденное излучение создается атомами неона, а атомы гелия участвуют лишь в передаче энергии атомам неона. При возбуждении газовой смеси электрическим током (постоянным или переменным с частотой около 30 МГц) возникает тлеющий разряд, подобный разряду в рекламной неоновой лампе. В результате часть атомов неона переходит с основного энергетического уровня на долгоживущие возбужденные уровни, тем самым создавая накачку лазера.

В диапазоне видимого и инфракрасного спектров гелий-неоновый лазер может содержать большое количество (~130) спектральных линий. Выделение нужной спектральной линии осуществляется подбором зеркал оптического резонатора, введением в резонатор диспергирующего или селективно поглощающего элемента, а также постоянного магнита.

В гелий-неоновом лазере рабочая газовая смесь находится в газоразрядной трубке, длина которой может достигать 0,2–1,0 м. Трубка изготавливается из высококачественного кварцевого стекла. Мощность генерации существенно зависит от диаметра трубки. С увеличением ее диаметра, с одной стороны, возрастает объем рабочей смеси, с другой – уменьшается электронная температура плазмы, что приводит к уменьшению количества электронов, способных возбуждать атомы газов.

Твердотельные лазеры. Активной средой в современных твердотельных лазерах, как правило, является диэлектрический кристалл, в который введены ионы редкоземельных металлов, например, неодима (Nd:YAG). Система оптической накачки имеет вид отражателя в корпусном исполнении. Внутри отражатель имеет форму эллипса, в фокусе которого находятся активный элемент (активная среда) и лампы накачки. Оптическим резонатором служат противоположные полированные грани активного элемента, на которые нанесен слой металла.

В качестве активного элемента в первом промышленном лазере использовался рубин, однако в настоящее время твердотельные лазеры создаются в основном на основе кристаллов иттрий-алюминиевого граната.

От газовых твердотельные лазеры принципиально отличаются только характером накачки. В качестве активной среды в них используется кристаллический или амфорный диэлектрик, имеющий центры люминесценции. Для создания когерентного излучения используется оптическая накачка. Лазерное излучение имеет высокую направленность и монохроматичность.

Преобразование излучений оптическими средами. Замечено, что свет при прохождении через среду изменяется. Среда, которая изменяет свойства света (излучения), называется оптической. Если же среда преобразует энергию излучения в другие виды энергии, такая среда называется фотоприемником. К оптическим средам относятся линзы, зеркала, инвертированная активная среда лазера. Примерами

фотоприемников могут служить фотодиоды (фотоформы, фотографии).

Виды оптических излучений:

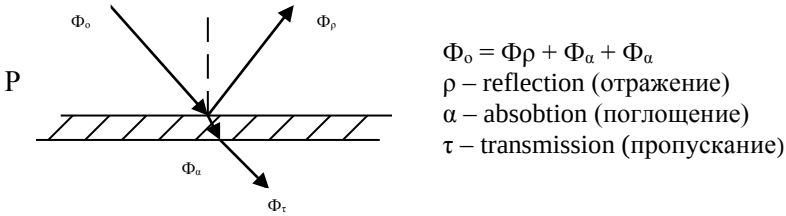


Рис. 2.6. Преобразование излучений оптическими средами

1. Пространственные изменения (отражение, преломление, дифракция);
2. Поглощение (спектрально-избирательное, спектрально-неизбирательное);
3. Структурные изменения излучения (поляризация, интерференция, дисперсия).

Для оценки характеристик среды вводят ее макрохарактеристики: коэффициент отражения (ρ), коэффициент пропускания (τ), коэффициент поглощения (α):

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_o}; \quad \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_o}; \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_o}; \quad (2.41)$$

Коэффициенты ρ , τ , α называются оптическими коэффициентами среды. Для пассивных сред: $\rho + \tau + \alpha = 1$.

Световые коэффициенты:

$$\rho = \frac{F_r}{F_o}; \quad \alpha = \frac{F_a}{F_o}; \quad \tau = \frac{F_t}{F_o} \quad (2.42)$$

В общем случае оптические и световые коэффициенты не совпадают, но всегда выполняется закон сохранения энергии:

$$\rho_{\text{св}} + \tau_{\text{св}} + \alpha_{\text{св}} = 1.$$

Все коэффициенты – интегральные. Можно также использовать (в зависимости от длины волны) дифференциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \rho(\lambda) &= \frac{\varphi_{\lambda\rho}}{\varphi_{\lambda o}}; & \rho_i &= \frac{\varphi_{\rho i}}{\varphi_{oi}}; \\ \alpha(\lambda) &= \frac{\varphi_{\lambda\alpha}}{\varphi_{\lambda o}}; & \alpha_i &= \frac{\varphi_{\alpha i}}{\varphi_{oi}}; \\ \tau(\lambda) &= \frac{\varphi_{\lambda\tau}}{\varphi_{\lambda o}}; & \tau_i &= \frac{\varphi_{\tau i}}{\varphi_{oi}}; \end{aligned} \quad (2.43)$$

На практике применяют зональные коэффициенты.

Преобразование оптическими средами мощности излучения и его спектрального состава

Оптическая плотность. Часто вместо коэффициентов пропускания и отражения используют оптическую плотность (D). Она связана коэффициентами с оптическими формулами:

$$D_{\tau} = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau; D_{\rho} = \lg \frac{1}{\rho} = -\lg \rho. \quad (2.44)$$

Существуют простые зависимости оптической плотности от концентрации светопоглощающего вещества и зрительного восприятия наблюдаемого объекта – его светлоты, чем и объясняется широкое использование этого параметра.

Заменяв оптические коэффициенты на потоки излучения – упавший на среду (Φ_0) и вышедший из нее (Φ_τ , или Φ_ρ) – получим выражения:

$$D_\tau = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi_\tau} = -\lg \Phi_\tau \quad \text{и} \quad D_\rho = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi_\rho} = \lg \Phi_0 - \lg \Phi_\rho \quad (2.45)$$

Чем больше света поглощается средой, тем она темнее и тем выше оптическая плотность как в проходящем (D_τ), так и в отраженном (D_ρ) свете.

Закон Бугера-Ламберта-Бера. Для этого закона (который ученые открыли независимо друг от друга), связывающего поглощение монохроматического излучения гомогенной средой с толщиной слоя этой среды, Ламберт предложил следующее математическое выражение:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{0\lambda} \cdot e^{-k_\lambda l} \quad (2.46)$$

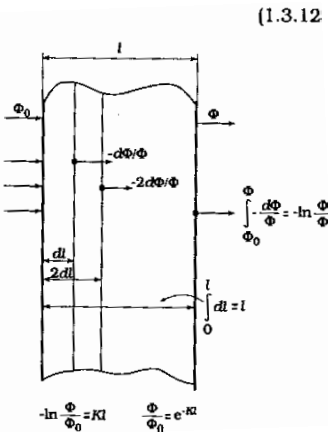


Рис. 2.7. К закону Бугера-Ламберта-Бера: вывод математического выражения закона (индекс « λ » у величин опущен)

где $\Phi_{0\lambda}$ – поток монохроматического излучения, падающий в виде пучка параллельных лучей на слой гомогенной поглощающей среды перпендикулярно ее поверхности;

Φ_λ – поток излучения, прошедший через слой;

K_λ – коэффициент поглощения, не зависящий от мощности излучения Φ_0 , но в то же время зависящий от природы вещества, составляющего слой, и длины волны падающего излучения. Закон выведен для условия $\alpha + \tau = 1$, когда отсутствует отражение излучения от поверхности слоя вещества.

Чем больше света поглощается средой, тем она темнее и тем выше оптическая плотность как в проходящем $(D)_\tau$, так и в отраженном $(D)_\rho$ свете.

При поглощении монохроматических излучений разбавленными растворами вещества в прозрачном растворителе коэффициент поглощения (K) в формуле Бугера-Ламберта, как было установлено Бэром, пропорционален концентрации светопоглощающего вещества: $K_\lambda = \chi_\lambda \cdot C$.

Отсюда зависимость:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{o\lambda} \cdot e^{-k_\lambda l} \quad (2.47)$$

Эта зависимость (рис. 2.7) называется «*объединенный закон Бугера-Ламберта-Бера*». На практике закон Бугера-Ламберта и объединенный закон Бугера-Ламберта-Бера обычно записывают следующим образом:

$$\Phi = \Phi_o \cdot 10^{-k l} \quad \text{или} \quad \Phi = \Phi_o \cdot 10^{-\chi C l} \quad (2.48)$$

При этом, как видно из формулы, осуществляется переход от основания натуральных логарифмов (e) к основанию 10, кроме того, обычно опускают индекс λ . Вместе с тем довольно часто используют логарифмическое выражение закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$D = \chi \cdot C \cdot l \quad (2.49)$$

где χ – удельный показатель поглощения.

Это постоянная величина, которая не зависит от толщины и концентрации светопоглощающего вещества, но зависима от его природы и длины волны излучения. Единица измерения данной величины определяется единицами измерения концентрации вещества (C) и толщины слоя вещества (l). Если C выражена в г/м^3 , а l – в метрах, то χ имеет размерность $\text{м}^2/\text{г}$.

Из формулы $D = \chi \cdot C \cdot l$ следует, что оптическая плотность зависит от природы светопоглощающего вещества и пропорциональна поверхностной концентрации вещества ($C \cdot l$).

Итак, **оптическая плотность** – мера ослабления света прозрачными объектами (такими, как кристаллы, стекла, фотопленка) или отражения света непрозрачными объектами (такими, как фотография, металлы и т. д.).

Вычисляется оптическая плотность как десятичный логарифм отношения потока излучения падающего на объект, к потоку излучения прошедшего через него (отразившегося от него), и это логарифм от величины, обратной к коэффициенту пропускания (отражения).

К примеру, $D = 4$ означает, что свет был ослаблен в $10^4 = 10\,000$ раз, т.е. для человека это полностью черный объект, а $D = 0$ означает, что свет прошел (отразился) полностью.

3. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ГЛАЗ КАК ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Оптическое излучение обладает высокой энергией и поэтому воздействует на многие вещества и физические тела.

Оптический диапазон: УФ (от 10 нм), видимый свет (380–780 нм), ИК (до 10^6 нм).

В результате поглощения оптического излучения (света) средой или физическим телом в средах и телах возникает целый ряд явлений:

- вторичное излучение: тепловое; люминесценция – излучение, избыточное над тепловым; индуцированное излучение; нагрев;

- фотоэлектрические явления: фотоэффект; изменение характеристик при воздействии света – фотодиод;

- фотохимические процессы: хемилюминесценция; фотографические процессы; светочувствительные материалы.

Данные явления приводят к качественному преобразованию поглощенной энергии и к изменению свойств материалов и тел. При этом могут происходить следующие процессы:

- тело, поглотившее излучение само начинает излучать. При этом вторичное излучение может иметь другой спектральный диапазон, по сравнению с поглощенным. Например, при освещении УФ-светом тело испускает видимый свет.

- энергия поглощенного излучения переходит в электрическую энергию, как в случае фотоэффекта, или производит изменение электрических свойств материала, что происходит в фотопроводниках. Такие превращения называют фотофизическими.

- другой тип фотофизического превращения – переход энергии в тепловую энергию. Это явление нашло применение в термоэлементах, используемых для измерения мощности излучения.

- энергия излучения переходит в химическую энергию. Происходит фотохимическое превращение поглотившего свет

вещества. Такое преобразование происходит в большинстве светочувствительных материалов.

Тела, в которых происходят такие преобразования под действием оптического излучения, в светотехнике называют *приемниками излучения*.

Приемники излучения делятся на 3 группы:

- человеческий глаз – естественный приемник излучения;
- светочувствительные материалы – служат для записи оптической информации обычным или цифровым способом (пример – CD);
- светочувствительные элементы измерительных приборов.

Зрительный аппарат человека состоит из приемника излучения (глаза), зрительных нервов и зрительных зон головного мозга. Каждый из двух зрительных нервов осуществляет доставку нервных сообщений в соответствующие зоны головного мозга, ответственные за обработку и восприятие световой информации. В этих зонах сигналы (нервные сообщения), формирующиеся в глазах и поступающие, как уже сказано, через зрительные нервы, анализируются и превращаются в зрительные образы.

Глазной нерв – это отростки светочувствительных клеток сетчатки, собирающиеся в единый пучок в зоне заднего полушария глаза. Нервных волокон более миллиона. У основания головного мозга волокна, идущие от внутренней половины сетчатки каждого глаза перекрещиваются (данный перекресток называется *хиазмой*). Благодаря этому в затылочную область каждого полушария мозга проецируется вся информация из контрлатеральной (противоположной) половины всего поля зрения. По пути к мозгу эти нервы перекрещиваются, и в хиазме происходит сложное перераспределение волокон, приводящее к тому, что предметы, расположенные справа от человека, воспринимаются левой половиной мозга и наоборот – находящиеся слева – правой.

Что же представляет собой глаз как приемник излучения? Это два глазных яблока, каждое из которых с помощью шести

наружных мышц может легко поворачиваться в глазнице, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

При рассмотрении объекта глаза скачкообразно перемещаются, поочередно фиксируясь на различных его точках. Это перемещение носит векторный характер, т.е. направление каждого скачка определяется рассматриваемым объектом.

Скорость скачка очень велика, а точки фиксации, на которых глаз останавливается на 0,2–0,5 сек, располагаются, в основном, на границах деталей, где имеются перепады яркостей.

Во время «остановок» глаз не совершает быстрые микросаккады (перемещения взора в пределах 1–50 угловых минут) относительно точки фиксации, возникающие при зрительной фиксации объекта. Несмотря на это, в точках фиксации происходит фокусирование наблюдаемого участка объекта на центральной ямке светочувствительной сетчатки каждого глаза.

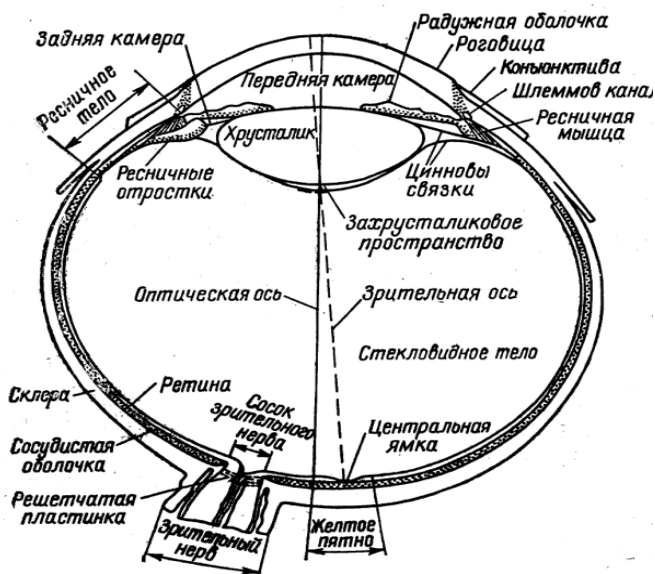


Рис. 3.1. Горизонтальное сечение глаза

Глазное яблоко (рис. 3.1) имеет шарообразную форму, его тело состоит из непрозрачной оболочки – склеры, толщина которой около 1 мм, и жидкого стекловидного вещества с показателем преломления (n) = 1,336. Черная внутри склера поглощает избыток цветовой энергии, чтобы не вуалировать излучение.

В передней части глаза находится прозрачная выпуклая камера, заполненная жидкостью. С наружной стороны «передняя камера» покрыта прозрачной роговицей с $n = 1,376$ (толщина ее составляет примерно 0,5 мм).

С задней стороны роговица отделена от стекловидного тела хрусталиком, прикрытым радужной оболочкой, которая определяет цвет глаз. В середине радужной оболочки находится круглое отверстие переменного диаметра – это зрачок. Роговица и хрусталик вместе образуют эквивалент объектива фотоаппарата, а зрачок – его диафрагму.

Свет, входя в глаз через переднюю камеру, из-за большой разницы между показателями преломления воздуха и роговицы, а также за счет формы роговицы фокусируется и направляется через зрачок на хрусталик. Основное значение хрусталика – фокусировка изображения предметов на центральной ямке сетчатки.

Чтобы удаленные и близко расположенные предметы давали одинаково резкое изображение, эластичный хрусталик изменяет кривизну. Для этого служит система мышечных волокон, которые при взгляде на удаленные предметы натягивают связки, удерживающие хрусталик, что делает его более плоским.

При рассматривании близко расположенных предметов мышцы увеличивают кривизну хрусталика, уменьшая фокусное расстояние. Такое приспособление органа либо организма в целом к изменению внешних условий называется *аккомодацией* и происходит автоматически, без участия сознания.

При изменении уровня освещенности наблюдаемых предметов группа радиальных и круговых мышечных волокон соответственно меняет диаметр зрачка и количество света, проходящего внутрь глаза.

На глазном дне находится светочувствительная сетчатка (ретины), состоящая из 10 слоев. Основной ее частью, где образуется отчетливое изображение объектов, является овальное «желтое пятно» ($2 \times 0,8$ мм), в середине которого находится углубление, называемое *центральной ямкой*. Оптическое изображение предмета, образующееся в центральной ямке, воздействует на светочувствительную сетчатку. Формирующиеся в ней зрительные сигналы передаются по зрительному нерву в мозг.

В сетчатке расположены светочувствительные клетки – *палочки и колбочки*. Это фоторецепторы, которые поглощают падающий на них свет и перерабатывают его в химическую и электрическую энергию. Этот процесс можно назвать *эффективным поглощением*. Свет, не поглощенный фоторецепторами, проходит дальше и поглощается – уже пассивно – пигментным эпителием. Такое поглощение необходимо, чтобы рассеянный внутри глазного яблока свет не вуалировал изображения внешних предметов на сетчатке.

Таким образом, пигментный эпителий играет ту же роль, что и чернение внутренних поверхностей фотокамер или зрительных труб. Фоторецепторы сложным образом связаны с окончаниями волокон зрительного нерва, которые передают сигналы в мозг.

В сетчатке происходит некоторая обработка полученной информации. Нервные волокна, окончания которых устилают сетчатку, сходятся к зрительному нерву; место выхода его из глаза называется *слепым пятном*, так как на его поверхности фоторецепторов нет.

В центральной ямке (фовеа), поперечник которой составляет примерно 0,4 мм, острота зрения наибольшая. В фовеа присутствуют только колбочки, притом очень тонкие, поперечный размер фовеальной колбочки около 2 мкм, т.е. меньше минуты в угловой мере.

Каждая фовеальная колбочка через биполярную клетку связана со своим волокном зрительного нерва и, таким образом, имеет индивидуальное представительство в мозгу.

Палочки присоединяются к зрительному волокну целыми группами, в которые включаются (в небольшом количестве) и периферические колбочки. Чем дальше от фовеа, тем больше становится палочек и меньше колбочек. Всего в сетчатке около 120 млн палочек и приблизительно 7 млн колбочек, а волокон зрительного нерва примерно 1 млн.

Соответственно, изображение на сетчатке разбивается примерно на 1 млн элементов, каждый из которых представляет собой рецепторное поле. Следует заметить, что палочки обладают большой световой чувствительностью и обеспечивают возможность видеть хотя бы большие предметы в сумерках и ночью, при низких уровнях яркости.

Но палочки не воспринимают свет, а ниже порога цветового ощущения все предметы кажутся серыми. Вот почему, как утверждает известная поговорка, «ночью все кошки серы». Обнаружено, что существует и высший порог цветового ощущения. При чрезвычайно ярком освещении глаз снова перестает различать световые оттенки: все окрашенные поверхности кажутся одинаково белыми.

Световая чувствительность у колбочек меньше, чем у палочек. Но именно колбочки обеспечивают цветовое зрение. Колбочки отличаются друг от друга по спектральной чувствительности, а именно: чувствительные к коротковолновой части спектра (условно – синие); чувствительные к средней части спектра (условно – зеленые); чувствительные к длинноволновой части спектра (условно – красные).

Показатель преломления водянистой влаги и стекловидного тела составляет приблизительно 1,34, а показатель преломления хрусталика – примерно 1,4. Поэтому при уменьшении радиусов кривизны поверхностей хрусталика оптическая сила глаза увеличивается, что позволяет фокусировать на сетчатке изображение предмета, приближающегося к глазу, т.е. аккомодировать глаз на то или иное расстояние.

Разрешающая сила глаза

Разрешающую силу любого прибора, дающего изображение, принято характеризовать предельным углом (δ),

т.е. угловым размером наименьшего объекта, который различим отдельно. Чем меньше δ , тем больше разрешающая сила прибора.

Разрешающая сила глаза (V) позиционируется как *острота зрения*:

$$V = 1/\delta, \quad (3.1)$$

где δ – минимальный угловой размер объекта, который различим как отдельный;

V – острота зрения (разрешающая сила глаза) = 1Мпиксел.

Дифракционная формула для предела разрешения (δ) имеет вид:

$$\delta = \frac{1,22\lambda}{d_z} = \frac{2,33}{d_z}. \quad (3.2)$$

Контраст (напомним, что это величина, описывающая различие в яркости по разному освещенных объекта и фона или участков объекта в конкретном случае) вычисляется по формуле:

$$K = \frac{B}{B} \frac{B_{об}}{B}, \text{ где } K \text{ — контраст,}$$
$$B \text{ — яркость фона, } B_{об} \text{ — яркость объекта} \quad (3.3)$$

Малую остроту зрения на периферии в значительной степени компенсирует подвижность глаз. Как только в поле зрения попадает объект, достойный внимания, оба глаза согласованно фиксируются на нем, и его изображение попадает на фовеальные области сетчаток, где острота зрения максимальна.

Соотнесенность. Зрительный процесс начинается с того, что оси обоих глаз направляются на некоторую точку предмета в пространстве перед человеком и сходятся в ней под некоторым углом β .

Как только в поле зрения попадает объект, достойный внимания, оба глаза согласованно фиксируются на нём и его

изображение попадает на фовеальные области (ямки) сетчатки, где острота зрения максимальна.

Подвижность глаз в значительной степени компенсирует малую остроту зрения на периферии.

Сведение осей глаз называется *конвергенцией*. Чем ближе точка фиксации, тем больше угол конвергенции (β). Одновременно происходит фокусировка т.е. *аккомодация* фиксируемой точки. При этом, чем больше β , тем сильнее степень аккомодации. Степень напряжения глазных мышц при конвергенции, которую человек фактически не ощущает, тем не менее, позволяет ему непосредственно оценить расстояние до точки фиксации.

Пара глаз в данной ситуации работает как дальномер, база которого равно расстоянию между зрачками. Изображения точки фиксации в обоих глазах ложатся близко к центрам фовеальных областей, и часть предмета, окружающая точку фиксации, воспринимается особенно четко. Заметим также, что сетчатка глаз воспринимает изображения и других предметов, попавших в поле зрения человека.

От каждого элемента изображения на сетчатке в мозг посылаются нервные импульсы, сложным образом кодирующие сведения об этом элементе. В мозгу происходит декодирование импульсов, и воссоздаются картины, соответствующие изображениям в каждом из глаз.

Эти две картины сливаются в одну (трехмерную), позволяющую непосредственно ощущать, какие предметы находятся дальше фиксируемого, какие ближе и как эти предметы отличаются друг от друга по удаленности. У отдельного предмета виден его рельеф, т.е. различие по удаленности его частей.

По законам геометрической оптики (изучающей законы распространения оптического излучения, т.е. света на основе представлений о световых лучах) на сетчатке глаза появляется обратное, т.е. перевернутое, изображение наблюдаемых предметов. Опыт и действие сознания трансформируют это изображение и «возвращают» предметы на место реального

расположения, что соответствует их непосредственному восприятию человеком.

Благодаря соотнесенности зрение дает рельефную картину реального мира, в которой положение предметов достаточно точно совпадает с истинным положением в пространстве, и ясно видны их отличия по форме и цвету. Соотнесенность – врожденное свойство зрения, закрепленное, в силу его огромного биологического значения, наследственностью.

Восприятие яркости сетчаткой глаза. Под действием поглощенного света в зрительном аппарате появляется ощущение, характеризующееся светлотой и цветностью. *Светлота* связана с мощностью излучения. *Цветность* определяется спектральным составом.

Сигналы, возникающие в сетчатке, поступают в мозг через зрительный нерв, составленный из аксонов так называемых *ганглиозных* клеток, по-разному реагирующих на освещение центра и периферии. Каждая из этих клеток получает сигналы от группы фоторецепторов.

Связанная с одной нервной клеткой группа фоторецепторов образует *рецептивное поле*, а значит, вся сетчатка может рассматриваться как система рецептивных перекрывающихся полей разных диаметров. При этом центр поля одной клетки входит в периферию поля другой клетки, а центр рецептивного поля включает один или несколько фоторецепторов. Их сигналы передаются ганглиозной клетке прямым путем через биполярную клетку.

Центр и периферию условно можно выбрать в каждом рецептивном поле. Центр отвечает за восприятие яркости рассматриваемого объекта, а периферия – за восприятие средней яркости фона, на котором человек видит объект. На освещение центра и периферии поля клетка отвечает соответствующими – противоположными – реакциями.

Клетка, которая по-разному реагирует на освещение центра и периферии, называется (как уже говорилось) *ганглиозной*. Если центр и периферия освещены одинаково, то ганглиозная клетка «молчит», т.е. сигнал не поступает. *Он-центры*

реагируют на светлые объекты на темном фоне; *off-центры* – на темные объекты на светлом фоне.

Порог яркостного различия, на который реагирует ганглиозная клетка, – 2%. Если яркостное различие больше 2%, сигнал есть. Реакцию вызывает лишь тот участок, яркость которого отличается от яркости фона. Из этого следует: клетка реагирует на относительную, а не на абсолютную освещенность.

Диаметр центра рецептивного поля может быть различным – от ширины одной колбочки – в центральной ямке до нескольких десятков микрометров – в удалении от ямки. Большое количество рецепторов, составляющих периферию ганглиозной клетки, связано с ней непрямым путем.

Ганглиозная клетка принимает сигнал (через амакриновую клетку) от нескольких биполярных клеток, которые связаны с рецепторами периферии через горизонтальные клетки, имеющие множество отростков.

Внешний диаметр рецептивного поля, определяемый размером периферии, также изменяется в широких пределах. Самые маленькие рецептивные поля – в центральной ямке, что объясняет повышенную остроту зрения при ярком освещении, когда в основном и работают колбочки центральной ямки.

По мере удаления от центральной ямки размеры центров и внешние диаметры рецептивных полей увеличиваются, что снижает остроту зрения, но повышает силу сигнала, передаваемого ганглиозной клетке.

Чтобы детали объекта и сами объекты были видимы, они должны отличаться по светлоте или яркости цвета от окружающего их фона, т.е. составлять достаточный контраст с фоном. В случае, когда объект и фон различаются только по светлоте, отразившиеся от объекта и фона излучения, попадающие на сетчатку глаза, имеют одинаковый спектральный состав.

Таков, например, серый объект на белом фоне. Но чем больше разница светлот объекта и фона $\Delta W = W_{об} - W_{фона}$, тем больше контраст между ними, и тем сильнее они различаются. Светлота (W) определяется яркостью объекта, и это

субъективное ощущение. Яркость – объективная физическая величина.

Закон Вебера-Фехнера

В 1851 г. немецкий физик Вильгельм Вебер открыл, общий для всех органов чувств закон, в соответствии с которым данная величина раздражения посредством веса, яркости света, силы звука и др. является *мерой замечаемости изменения раздражения*.

Это означает, что чем больше величина первоначального раздражения, тем больше минимальная пороговая разница веса или силы звука, которую человек в состоянии заметить. Согласно Веберу, люди воспринимают не абсолютное, а относительное изменение веса, силы звука, яркости.

Изучая (1858 г.) зрительное восприятие яркости, другой немецкий физик – Густав Фехнер использовал с этой целью метод пороговых приращений, состоявший в следующем: на двух фотометрических полях (I и II) устанавливают одинаковую яркость (B_0).

Увеличивают яркость поля II до достижения едва заметного порогового различия по светлоте с полем I. Далее увеличивают яркость поля I до тех пор, пока его светлота не станет на порог больше, чем у поля II. Получают яркость B_2 . Затем увеличивают яркость поля II до B_3 , при которой его светлота станет на порог выше, чем у поля I, и т.д.

Сопоставив изменение светлоты с изменением яркости, Фехнер установил, что порогу различения светлоты $W_{\text{пор}}$ соответствует постоянное относительное изменение яркости:

$$\psi = \frac{\Delta B}{B}, \quad (3.4)$$

где ψ – дифференциальный порог, или пороговый контраст.

В диапазоне яркостей 1–1000 кд/м² порогу различения соответствует дифференциальный порог около 2%, а для обычного наблюдателя – более 2%.

Если принять пороговые приращения светлоты ($\Delta W_{\text{пор}}$) и яркости ($\Delta B_{\text{пор}}$) за бесконечно малые величины, получим формулу:

$$dW = k_1 \cdot \frac{dB}{B}, \quad (3.5)$$

Это соответствует закону Вебера-Фехнера в форме дифференциального уравнения:

$$\Delta W_{\text{пор}} = k_1; \quad \psi = k_1 \cdot \frac{\Delta B}{B}; \quad (3.6)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Проинтегрируем это выражение и перейдем к конечному различию светлот, которое отвечает математическому выражению закона Вебера-Фехнера, утверждающего, что приращение светлоты пропорционально приращению логарифма яркости:

$$\Delta W = k \cdot \Delta \lg B, \quad (3.7)$$

где k – количество порогов различения, соответствующих 10-кратному изменению яркости объекта. Величина $k = \frac{1}{\psi}$, обратная дифференциальному порогу, называется *контрастной чувствительностью глаза*. В условиях дневного освещения k доходит до 50 единиц.

Закон Вебера-Фехнера позволяет объяснить, почему шкала кажется зрительно равномерной, если ее логарифмы яркости, или оптические плотности изменяются от поля к полю на одинаковую величину, а также то, почему график зависимости светлоты от логарифма яркости имеет вид прямой линии.

Однако этот закон строго соблюдается лишь в некотором интервале яркостей – границы его зависят от средней яркости, к которой адаптирован глаз.

3.1. Адаптация. Механизм адаптации

Освещенности окружающих нас объектов колеблются в широких пределах. Человек способен видеть предметы при их освещенности от 0,2 до 50–120 тыс. люкс. Большой диапазон светочувствительности глаза обусловлен способностью зрительного аппарата настраиваться на средний уровень яркости и оценивать яркость всех предметов относительно этого уровня, благодаря чему возникает явление, называемое *адаптацией*.

Ряд следующих особенностей строения глаза человека и нервных клеток его зрительного аппарата делают адаптацию возможной:

- величина диаметра зрачка человека, составляющая 2–8 мм, и зрачковый рефлекс, т.е. непроизвольные сокращения (или расслабления) гладкой мускулатуры радужной оболочки, приводящие к изменению величины зрачка настолько, что это способно компенсировать 16-кратную освещенность объектов окружающей среды.

- двойственность световоспринимающей системы человека, что позволяет видеть в большом диапазоне освещенностей: в сумерках включаются колбочки и работают палочки, а на ярком свету палочки «ослепляются», но начинают работать колбочки. При средних освещенностях работают и те, и другие.

- закон Вебера-Фехнера, обуславливающий восприятие не абсолютного, а относительного изменения изображения, иначе говоря, механизм формирования зрительных импульсов нервными клетками сетчатки.

При этом в мозг поступают сигналы не об абсолютной яркости деталей объекта, а о соотношении яркостей детали и фона; яркость окружающих предметов сопоставляется со средним уровнем освещенности глаза рассеянным светом.

Закономерности зрительного восприятия объекта

1. Зрительный образ практически не зависит от освещенности (стол – и в сумерках стол);

2. Человек не способен оценить средний уровень яркости или освещенности объектов;

3. Человек с высокой точностью определяет различия светлот близко расположенных предметов или деталей.

3.2. Спектральная чувствительность глаза

Следует отметить, что глаз человека по-разному воспринимает излучения различных длин волн. Это различие имеет как качественный, так и количественный характер.

Качественное различие заключается в зависимости цвета излучения (восприятия человеком) от длины волны. При увеличении длины волны, т.е. при перемещении по спектру, цветовой тон излучения изменяется от фиолетового до красного.

Количественная разница состоит в том, что глаза проявляют чувствительность, которая отвечает соответствующей длине волны излучения. При одинаковой мощности эти излучения вызывают в глазу различные психофизические и химические реакции, благодаря которым глаза человека могут воспринимать различные светлоты.



Рис. 3.1. К модели эффекта Пуркинье:
*цветок герани, видимый в нормальном ярком свете,
в сумерках и ночью*

Эффект Пуркинье. При уменьшении освещенности и цветового объекта красные цвета темнеют быстрее, а синие – медленнее всех других. Красные и синие цвета, например, полевых цветов мака и василька (рис. 3.1), одинаково яркие

днем, ночью приобретают различную светлоту. Мак становится черным, а василек выйдет серым.

В течение суток цветовая гамма, воспринимаемая глазом, различна. Во время рассвета и заката, т.е. в моменты, когда солнце частично находится за линией горизонта, солнечный свет насыщен цветами красного спектра, это происходит из-за рассеивания лучей атмосферой.

Чем ближе солнце к горизонту, тем дальше от нас, и тем больше слоев воздуха проходит свет. А поскольку свет красного спектра обладает наибольшей длиной волны, то он проникает в закатное и рассветное время интенсивнее других. В это время любой цвет становится немного красноватым.

Когда солнце поднимается выше горизонта, мы воспринимаем цвета естественными, или правильнее сказать, такими, какими привыкли их видеть. Во всех предыдущих случаях определением цвета и его яркостью занимаются колбочки сетчатки глаза. Однако в сумерках эту роль принимают на себя палочки. При этом долгое время было принято считать, что палочки не способны различать цвета. Оставив сторонников трех- и двухкомпонентной теории с их противоречиями в этой области, обратимся к графику исследования поглощения света.

Черной пунктирной кривой на графике обозначен пигмент палочек – робопсин. Красной, зеленой и синей кривыми обозначены пигменты колбочек, которые воспринимают соответствующий цветовой спектр. Обращает на себя внимание то, что интенсивность поглощения света на частоте синего спектра значительно выше интенсивности поглощения на частоте красного.

Другими словами, палочки лучше «видят» синий, чем красный. Подобный эффект назван именем чешского биолога Пуркинье, первым описавшего этот феномен. Он обратил внимание на то, что в сумерках синий цвет выглядит ярче красного, хотя при дневном свете более яркий – красный.

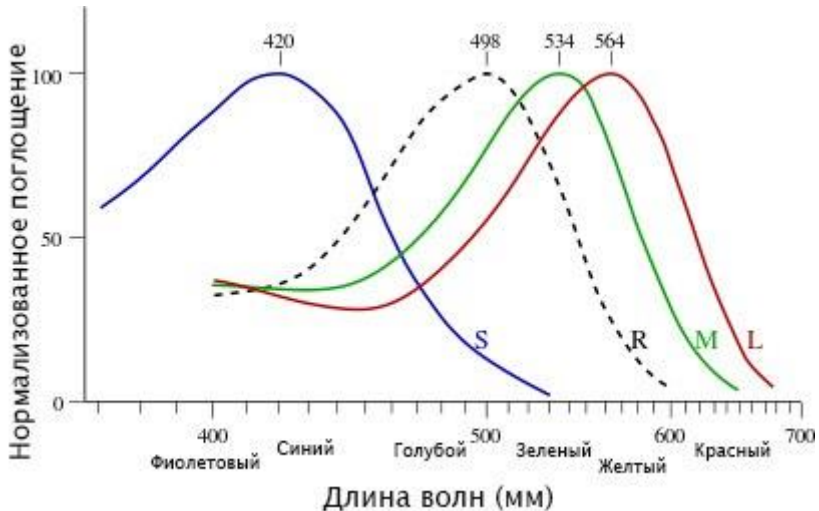


Рис. 3.2. Поглощение света глазным дном

Поскольку переход от «колбочкового» зрения к «палочковому» происходит независимо от воли человека, а палочки более инертны и не отличаются четкостью передаваемого в мозг изображения, люди иногда вынуждены «обманывать» природу.

Итак, палочки, плохо воспринимающие красный спектр, создают, тем не менее, красное освещение, которое вынуждает активизироваться колбочки. Таким образом, при создании красного сумрака, человек способен зорко видеть и замечать их динамику.

Данное явление способности системы зрения человека приспосабливаться к изменившимся условиям освещения и сохранять неизменными исходные цвета элементов изображения, получило название «*хроматическая адаптация*».

Удивительно, но хроматическая адаптация обладает свойством эволюционировать, т.е., накапливая полезные признаки, развиваться.

Однако в области предпечатной подготовки цветных изданий это создает немало проблем для дизайнеров и

полиграфистов. И поскольку остановить процесс такой адаптации невозможно, то, по крайней мере, следует исключить основные источники ошибок при принятии ответственных решений по управлению цветом.

Вся предпечатная подготовка цветных публикаций должна проходить в условиях освещения, основные параметры которого находятся под полным контролем. Неслучайно многие препресс-бюро и художественные мастерские имеют специально созданные условия освещения.

Это значит, что работа ведется на высококачественных и тщательно откалиброванных мониторах в подготовленных для этого помещениях с равномерным неярким освещением, но без доступа прямых солнечных лучей. Стены и потолок в них обычно равномерно покрываются светло-серой краской. Здесь нет репродукций или любых ярких декоративных элементов, которые могут быть источником искажений цветового восприятия.

Если по каким-то причинам невозможно обеспечить нейтральный фон во всем рабочем помещении, то цветные оттиски исследуют и оценивают в специально подготовленных кабинках, в которых на ограниченных площадях намного проще обеспечить стандартные условия освещения. Получили распространение и технологии, позволяющие выполнить всю необходимую работу по оценке цветового пространства изображения или печатной страницы в портативной обстановке.

3.3. Основы теории цветового зрения

Характер цветового ощущения связан с распределением чувствительности фоторецепторов по спектру. Их спектральные свойства изучались многими исследователями, начиная с Максвелла (XIX в.).

Достаточно достоверные данные были получены в середине прошлого века Е.Н. Юстовой (1950), а также Томсоном и Райтом (1953). Графики, изображенные на рис. 3.3, выражают среднюю спектральную чувствительность

светоадаптированных цветочувствительных фоторецепторов. Данные усреднены по 56 наблюдениям и были получены для углов зрения 2°.

Нет гарантии, что кривые выражают реакции только колбочек, поэтому они называются кривыми основных возбуждений (*другое название – физиологические кривые сложения*).

Реальные кривые основных возбуждений, во-первых, перекрываются практически во всех зонах спектра, во-вторых, имеют различные по уровню реакции в основных зонах спектра.

Рассмотрим (рис. 3.3) эти различия подробнее. Излучения начала видимой части спектра (до 430 нм) действуют только на синечувствительные колбочки (*остальные чувствительности относительно малы*). Реакция этих колбочек приводит к возникновению ощущения фиолетового цвета.

Различие цветов спектра в пределах 380–430 нм связано только с уровнем реакции синечувствительных рецепторов, поэтому с увеличением длины волны повышается светлота цвета (растет чувствительность – увеличивается реакция фоторецептора).

При дальнейшем продвижении по спектру начинают работать и зеленочувствительные рецепторы, поэтому изменяется цветовой тон, цвет становится синим.

Поскольку общая чувствительность увеличивается, цвет делается светлее. Затем (с 450 нм) начинает реагировать и третий фоторецептор – красночувствительный. Цвет переходит в голубовато-синий, а затем – в голубой.

Если считать, что реакции складываются, изменения цвета можно проследить по всему спектру, пользуясь данными, приведенными на рис. 3.3.

При объяснении того или иного цветового ощущения приходится сравнивать реакции рецепторов разных типов. Такое сравнение возможно только в случае, если есть общая мера этих реакций. В колориметрии принято за единичные реакции принимать их соотношение, при котором возникает ощущение ахроматического цвета. Этот же принцип используется в рассматриваемой теории цветного зрения и в

цветовоспроизведении, где количества красок считаются равными, если их наложение дает ахроматический цвет (серый).

Другой пример необходимости нахождения общей меры реакций фоторецепторов следующий. Спектральная чувствительность каждой группы рецепторов выражается одной из кривых основных возбуждений. Если их сложить, то полученная кривая отличается от кривой относительной спектральной эффективности светлого адаптированного глаза.

Объяснение состоит в том, что вклады каждой группы рецепторов в цветность и светлоту различны. Поэтому, чтобы перейти от кривых основных возбуждений к кривой относительной спектральной эффективности, необходимо ординаты кривых основных возбуждений умножить на соответствующие яркостные коэффициенты.

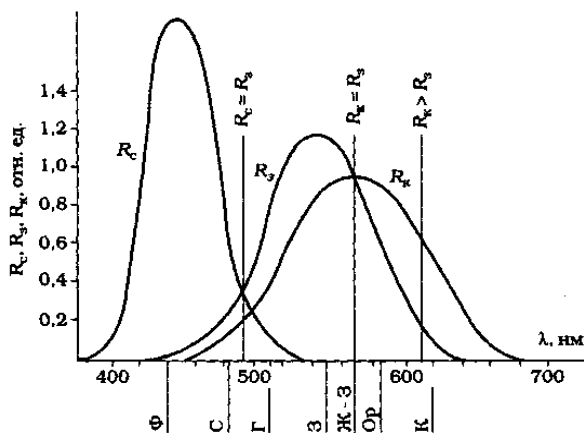


Рис. 3.3. Кривые основных возбуждений:
по данным Е.Н. Юстовой

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦВЕТА

Ощущение цвета («цвет») – это сложное психофизическое явление, которое можно выразить трехмерной величиной, включающей физические, физиологические и психологические аспекты.

- *Физика цвета* рассматривает оптические явления (в отраженном или проходящем свете), а также аппаратуру, методы получения и измерения спектров.

- *Физиология цвета* исследует действие излучения на глаз, работу зрительного аппарата, причины возникновения ощущений светлоты и цветности.

- *Психология цвета* изучает влияние психологических факторов на ощущения, вызванные излучениями с определенными характеристиками (светофор).

Суммирующий результат таких воздействий обычно проявляется в разной степени физического и эмоционального состояния, чувстве бодрости или утомления, приподнятости или подавленности.

Эмоциональность восприятия в отношении к цвету проявляется через его ассоциативное влияние. Связь явлений и предметов со своими характерными цветами трансформируется в сознании человека в определенные чувственные ощущения. Так, солнце, огонь – желтый и красный цвета – создают ощущение тепла и называются «теплыми»; небо, воздух, лед – голубые, синие цвета – «холодные» и т.д.

Для целенаправленного использования цвета необходимо знать устойчивые связи между цветом и психологической реакцией человека. В этом аспекте установлен ряд закономерностей – по предпочтительности цветового тона, образной ассоциативности цветов, по гармоничности цветосочетаний. Предпочтительное отношение к определенным цветам заметно проявляется в разных возрастных группах.

В общем виде для детей предпочтительны теплые цвета яркой насыщенности (чистый цвет), для взрослых – холодные цвета средней насыщенности и более смешанные, для пожилых – ахроматические цвета пастельных тонов.

Цвет может успокаивать и волновать, радовать и печалить. Цветом можно лечить, вызвать чувства голода и холода, легкости и тяжести. Известны случаи, когда люди жаловались на холод в помещениях, окрашенных в голубые или темно-зеленые цвета, хотя температура в них была в пределах нормы. После окраски помещений в светло-оранжевые и красно-желтые тона недовольство пропадало. Теплые цвета, как правило, вызывают бодрое настроение – их очень часто называют активными, холодные же, наоборот, успокаивают, их называют пассивными.

Ведущим фактором в формировании цветовых значений является, как свидетельствуют данные психофизиологических и психологических исследований, объективный характер цветового воздействия на человека. Окружающие цвета оказывают воздействие на его организм, нервную систему и психику. Большая интенсивность цвета, воздействующая длительное время, утомляет зрение, яркая окраска надоедает и раздражает. Кроме того, при синем освещении снижается острота зрения и скорость зрительного восприятия, которые повышаются при желтоватом и белом свете.

Оправдывают свои характеристики как релаксирующие (успокаивающие) синий и, в какой-то мере, зеленый цвета. Их предпочитают люди, испытывающие нужду в расслаблении и отдыхе. Однако длительное воздействие этих цветов вызывает впечатление печали и скуки, приводит к заторможенности мыслительных процессов и даже депрессии.

Красный и желтый (стимулирующие цвета) всецело отвечают своим традиционным характеристикам цветов «активной стороны». В них «заинтересована» нервная система хорошо отдохнувшего человека, восстановившего силы, испытывающего потребность в интенсивной деятельности, активном проявлении своей энергии. Однако длительное воздействие этих цветов может привести к перевозбуждению, а затем и к защитному торможению нервной системы.

Взаимосвязь цвета и центральной нервной системы человека представляет более сложную картину.

Благодаря определенным отделам центральной нервной системы, у человека формируются цветовые ощущения и более сложные формы обработки информации. Цвет как энергия, безусловно, необходим для поддержания тонуса центральной нервной системы. Известны случаи «цветового голодания», когда при цветовой бедности окружающего пейзажа и обстановки развивались симптомы задержки интеллектуального развития.

Естественными науками накоплен большой экспериментальный материал о психофизиологическом влиянии цвета на человеческий организм. Благодаря определенным отделам центральной нервной системы цветовые ощущения, восприятия света, сложные формы обработки этой информации взаимосвязаны с ощущением звука, вкуса, обоняния и др.

Особые заслуги в данном направлении исследований принадлежат научной школе известного русского физиолога профессора С.В. Кравкова. Результаты экспериментальных работ его научной школы показали, что цветовое воздействие приводит к определенным изменениям тонуса вегетативной нервной системы. Так, установлена зависимость цветового зрения от разнородных не прямых раздражителей: слуховых, обонятельных, вкусовых, температурных. Исходя из этого, становится «психофизиологически» понятным ряд «положительных» и «отрицательных» воздействий цветов.

Эмоциональное отношение к цвету может характеризоваться предпочтениями человека, безразличием или его негативной оценкой. Это дает возможность использовать психодиагностический учет таких эмоциональных отношений.

Так, швейцарский психолог Макс Люшер разработал «глубинный» тест, который выявляет неосознанное предпочтение того или иного цвета, основанный на том, что выбор цвета отражает направленность испытуемого на определенную деятельность, настроение, функциональное состояние и наиболее устойчивые черты личности, т.е. ярко выраженные ее особенности.

Для понимания значения цвета и формы в человеческих эмоциях в психодиагностике применяются прожективные тесты,

в которых используется изобразительный материал. Изображение обычно бывает многозначным по сюжету, формальным характеристикам и допускает не одну интерпретацию.

Способ интерпретации человеком изображения рассматривается как проекция особенностей личности. Для этих целей используется тест Роршаха, являющийся «чистым» тестом восприятия. Он выявляет ряд конкретных свойств личности, в том числе в качестве одного из немногих тестов оценивает степень развитости эстетического отношения к действительности.

Тесты большей частью демонстрируют роль цветовых и формальных характеристик восприятия в отношении личности к миру, взятом в его целостности и являются инструментом исследования взаимодействия личности и социальной среды.

Из этого следует, что и физическое, и психическое воздействие цвета во многом определяются личностными характеристиками воспринимающего человека.

4.1. Субъективные и объективные характеристики цвета

Цвета, как уже говорилось, можно оценивать и сравнивать, используя для этого ряд критериев, как объективно, так и субъективно.

Субъективные психологические характеристики зависят как от качественных, так и количественных параметров электромагнитных излучений видимого диапазона, поскольку именно эти излучения и воспринимаются зрительным аппаратом в качестве определенного оттенка какого-либо спектрального (или пурпурного) цвета с большей или меньшей выраженностью этого цвета и определенной светлотой.

Поэтому одни и те же термины – «цветовой тон», «светлота», «яркость» используются как в физике, так и в физиологии и психологии.

Основные психофизические характеристики цвета измеряются с помощью специальных приборов. К таким характеристикам относятся:

- *цветовой тон* – свойство цвета, указывающее на его сходство с каким-либо спектральным цветом или оттенком пурпурного цвета, выражаемый длиной волны излучения (измеряется в нанометрах – *нм*), преобладающего в спектре данного цвета, а для оттенков пурпурного цвета, отсутствующего в спектре, – длиной волны (отмечается штрихом) дополнительного к нему зеленого цвета.

- *насыщенность* – качество цвета, которое характеризуется ощущением доли чистого хроматического цвета, определяющего цветовой тон в наблюдаемом цвете;

- *чистота цвета*, выражаемая процентным содержанием чистого спектрального или пурпурного цвета, определяющего цветовой тон данного цвета;

- *светлота (относительная яркость)* – качество наблюдаемого цвета, которое определяется ощущением большей или меньшей относительной яркости сравнительно с другими цветами при одинаковых условиях наблюдения

Светлоту также можно определить как близость наблюдаемого цвета к белому или черному (для поверхностей непрозрачных тел с рассеянным отражением светлота выражается коэффициентом отражения (ρ) в %, а для прозрачных тел – коэффициентом пропускания (τ) также в %;

- *яркость – величина*, характеризующая интенсивность свечения. Представляет собой отношение силы света (излучаемого, отражаемого или пропускаемого поверхностью) к площади ее проекции на плоскость, перпендикулярную оси наблюдения (выражается в нитах – *нт*).

Совокупность светлоты и цветности обозначается термином «цвет». Ощущение цвета рассматривается только в связи с воздействием на зрительные органы человека. Ощущения светлоты и цветности воспринимаются совместно. Пример: однородно окрашенный объект частично освещен, частично находится в тени.

Освещенное и затененное поля воспринимаются с ощущением разной светлоты, но одинаковой цветности. При этом возникает ощущение различных цветов. Однако необходимо четко отличать два понятия, которые на бытовом уровне обычно не различаются, – «окраска предмета» и «цвет».

Окраска характеризует спектральные свойства поверхности отражать излучение той или иной длины волны в направлении глаза или измерительного прибора. Цвет предмета – это то, как реализуется отражательная способность с учетом его освещения и рассматривания.

Базой и инструментом при изучении и воспроизведении цвета является метрология цвета, которая определяет способы его численного выражения, измерения и классификации, а также величины и методы установления допусков на воспроизведение цвета. Сложный спектральный состав белого цвета известен всем из школьного опыта (разложение света в призме). Из рассмотрения упрощенного механизма цветовосприятия становится понятной необходимость исследования, как реакцией отдельных фотоприемников, так и их суммарной составляющей.

В отличие от модельного механизма цветовосприятия, светлотная реакция отдельных фоторецепторов определяется (рис. 4.1) следующим образом:

Физиология восприятия цвета образует самостоятельную колориметрическую систему, основанную на кривых основных возбуждений. По сути – это метод воспроизведения цвета, основанный на смешении излучений, принимаемых за основные (базовые).

Итак, рассмотрев психохарактеристики цвета (светлота, цветовой тон, насыщенность), резюмируем: все они субъективны и имеют отношение к ощущениям, возникающим при восприятии цвета.

В полиграфии при цветовоспроизведении, как правило, возникает вопрос: какие объективные физические характеристики можно сопоставить с субъективными ощущениями для однозначного описания цвета?

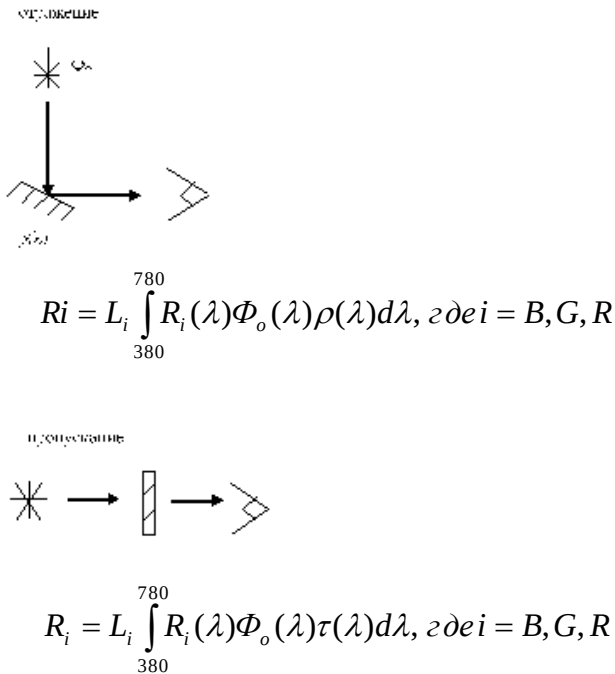


Рис. 4.1. Схема выражения цветовосприятия посредством реакции отдельных фоторецепторов

Цветовой тон и насыщенность, так же, как и светлоту (пороговый принцип исследования светлоты был рассмотрен при изучении глаза как оптической системы и конкретной чувствительности глаза – закон Вебера-Фехнера), можно выразить через световые величины. Такой способ выражения основан на том, что в спектре монохроматических излучений присутствует все природные цвета, за исключением пурпурных, которые являются искусственными, бихроматическими и могут быть получены смешением красных и фиолетовых излучений.

Принцип исследования восприятия цветности тот же: к любому цвету, т.е. цветовому пучку можно подобрать тождественный монохроматический, который вызовет субъективное ощущение аналогичного цветового тона. Исключение составляют пурпурные цвета, отсутствующие в

спектре. Для них подбирается бихроматическая смесь. Таким образом, цветовой тон любого цвета можно задать соответствующим монохроматическим излучением. Необходимым условием являются одинаковые насыщенности сравниваемых цветов.

Субъективному ощущению *цветового тона* ставится в соответствие объективная физическая характеристика – доминирующая длина волны ($\lambda_{дом}$). Субъективному ощущению *насыщенности цвета*, соответственно, – колориметрическая чистота цвета:

$$p = \frac{B_{\lambda}}{B_{\delta} + B_{\lambda}}, \text{ где } B_{\lambda} - \text{ яркость излучения } \lambda_{дом}. \quad (4.1)$$

Длина волны такого монохроматического излучения называется доминирующей длиной волны λ , или $\lambda_{дом}$. Исключения составляют пурпурные цвета. Эти цвета выражают доминирующей длиной волны дополнительного цвета. Обозначение: λ' , или $\lambda'_{дом}$ с указанием численного значения.

Физическим выражением субъективной характеристики насыщенности служит величина, которая называется *колориметрической чистотой цвета*:

$$P = \frac{B\lambda}{B\lambda + B\delta}, \quad (4.2)$$

где $B\lambda$ – яркость монохроматического излучения, тождественного данному по цветовому тону;

$B\delta$ – яркость белого излучения, которое добавляется в монохроматическое для получения насыщенности, аналогичной данному цвету.

Цвет излучений на границах крайних диапазонов воспринимается как красный и фиолетовый, соответственно. Поэтому, обычно рассматривают диапазон 400-700 нм.

Человеческий глаз по цветовому тону различает до 150 монохроматических излучений плюс – до 30 бихроматических, пурпурных. Подчеркнем, что из-за явления метамерности задача оценки цвета по цветовому тону не решается просто благодаря определению длины волны излучения.

4.2. Метамеризм цвета. Виды метамеризма

Метамеризм излучения возникает, когда цветовые координаты многомерной пары показывают равенство объективных цветовых характеристик или цветовосприятия при одном и том же излучении.

Метамеризм наблюдателя проявляется, когда метамерная пара воспринимается одинаковой по цвету одним наблюдателем (например, это продавец) и различной – другим наблюдателем (покупатель).

Метамеризм поля зрения, воспринимаемый глазом одновременно при неподвижном взоре и фиксированном положении головы, имеет определенные границы, соответствующие переходу оптически деятельной части сетчатки в оптически слепую, например, издали осенний лес наблюдается полностью желтым, а вблизи явно различимы разные оттенки цвета листвы деревьев.

Геометрический метамеризм возникает при изменении геометрии наблюдения, например, образцов красок с металлическим эффектом может показывать равенство при определенном угле освещения и наблюдения, но не сохранять такое равенство, когда угол освещения изменяется.

«Приборный» метамеризм возникает, когда объективные (приборные) цветовые характеристики одного образца, окрашенного данным набором красителей, при некотором освещении может соответствовать аналогичным характеристикам образца, окрашенного другими красителями, а при ином освещении – не соответствовать.

Предположим, что диапазон излучений длин волн 480–510 имеет голубой цвет. Это вовсе не означает, что любой голубой

цвет обладает тем же диапазоном излучений. Так, цвет голубого неба содержит все излучения видимого спектра, а смешивая в определенной пропорции излучения с длинами волн $\lambda = 436$ нм и $\lambda = 546$ нм, можно получить тот же голубой цвет неба. Таким образом, визуальное тождество сравниваемых пучков излучений вовсе не означает тождество их спектральных составов.

Если сравниваемые пучки одинаковы по цвету, но имеют различный спектральный состав, они называются *метамерными*; если спектральный состав одинаков – *изомерными*.

При полиграфическом тиражировании цвета исходного оригинала и копии, как правило, метамерны. Цвета в пределах одного тиража должны стремиться к изомерности. В связи с этим необходимо измерять и воспроизводить цвет вне зависимости от спектрального состава вызвавшего его излучения. Проблемы возникают при оценке или измерении цвета копии в условиях, отличных от условий оценки оригинала.

4.3. Синтез цвета

Синтез (*греч.* – сочетание, составление) – это соединение различных элементов, сторон предмета в единое целое, которое осуществляется как в практической деятельности, так и в процессе познания.

Получение различных цветов с помощью нескольких основных (первичных) излучений или красок называется «цветовым синтезом». Согласно трехкомпонентной теории цветового зрения и упрощенному механизму цветовосприятия, при действии на глаз смеси излучений (синтез) реакции рецепторов на каждое излучение складываются, и результат воспринимается как единое целое.

Смешение окрашенных цветовых пучков даст пучок нового цвета. Смесь красок и/или окрашенных жидкостей имеет иной цвет, чем исходные компоненты.

Необходимое уточнение: синтез цвета – это получение нового цвета в результате смешения окрашенных излучений или сред. Изучение закономерностей синтеза показало, что в основе смешения сред и смешения излучений лежат разные физические явления: смесь голубой и красной красок даст черный цвет, а смесь голубого и красного излучений – белый; светлота смеси красок уменьшается, а смеси излучений – увеличивается.

В связи с этим различают два типа синтеза цвета – аддитивный и субтрактивный. *Аддитивный синтез* имеет место, когда идет сложение окрашенных пучков. Исторически исследование закономерностей аддитивного синтеза цвета происходило по мере развития трехкомпонентной теории цветового зрения.

Ньютон показал, что разные цвета можно получать смешением других цветов. Юнг ввел понятие трех основных цветов и на простом опыте показал, как их смешением можно получить другие цвета. *(Впрочем, в опыте Юнга способ получения основных цветов для аддитивного синтеза – субтрактивный).*

Максвелл построил первый колориметр, в котором измеряемый цвет освещал половину поля зрения, в то время как другая освещалась смесью трех излучений: красного, зеленого и синего. Интенсивность каждого из излучений можно было изменять до тех пор, пока не устанавливалось равенство обоих полей прибора. На основании визуального равенства было выведено следующее уравнение:

$$\text{Ц} = rR + gG + bB \quad (4.3)$$

где Ц – измеряемый цвет,

r, g, b – коэффициенты, пропорциональные интенсивностям излучений R, G, B (красного, зеленого и синего цветов), соответственно.

В опыте Максвелла коэффициенты были пропорциональны ширине щели пропускающей каждое из излучений к полю сравнения.

Цвета излучений и сами излучения, используемые для синтеза, называются «основными», что подразумевает как основные цвета, так и основные излучения. Основные Максвелла: $\lambda_r = 630$, $\lambda_g = 528$, $\lambda_b = 457$.

4.4. Основные цвета аддитивной смеси

Аддитивный синтез основан на трехзональной теории цветового зрения. Цвета излучений, используемых для синтеза, и сами эти излучения называются *основными*. Получение заданного цвета смешением основных излучений и является аддитивным синтезом этого цвета.

Всегда можно выбрать три излучения (рис. 4.2), одно из которых в наибольшей степени раздражает синечувствительные рецепторы, другое, соответственно, – зеленочувствительные, третье – красночувствительные рецепторы. Смешивая эти излучения в различных комбинациях по мощности, можно вызвать множество цветовых ощущений.

Глаз человека может регистрировать только три вида различий в цвете, выражаемых, например, в терминах цветового тона, чистоты цвета и яркости. Цветовые модели расположены в трехмерной системе координат, образующей цветовое пространство, а из *законов Грассмана* следует, что цвет можно выразить точкой в трехмерном пространстве.

Первый закон Грассмана (закон трехмерности). Цвет трехмерен и для его описания необходимы три компоненты. Любые три цвета находятся в линейной зависимости. И, значит, для любого заданного цвета можно записать цветовое уравнение, выражающее линейную зависимость цветов (хотя существует неограниченное количество и линейно независимых совокупностей трех цветов). Любой цвет однозначно выражается тремя составляющими, если они линейно независимы. Линейная независимость заключается в невозможности получить любой из этих трех цветов сложением двух остальных.

Второй закон Грассмана (закон непрерывности). При непрерывном изменении излучения цвет смеси также меняется непрерывно. Если в смеси трех цветовых стимулов один меняется непрерывно, в то время как два другие остаются постоянными, цвет смеси также меняется непрерывно. Из закона непрерывности следует, что не существует такого цвета, к которому нельзя было бы подобрать бесконечно близкий.

Третий закон Грассмана (закон аддитивности). Цвет смеси излучений зависит только от их цвета, но не спектрального состава. Таким образом, прямоугольная трехмерная координатная система цветового пространства для аддитивного способа формирования изображения имеет точку начала координат, соответствующую абсолютно черному цвету (цветовое излучение отсутствует) и три оси координат, соответствующих основным цветам. Любой цвет (C) может быть выражен в цветовом пространстве (рис. 4.2) вектором. Направление вектора характеризует цветность, а его модуль выражает яркость.

4.4.1. Способы аддитивного сложения цветов

Чтобы провести аддитивный синтез, необходимо иметь красный, зеленый, синий световые пучки. Они могут быть получены либо непосредственно от источника, испускающего такие пучки, либо от обычных тепловых источников света, экранированных красным, зеленым, синим светофильтрами.

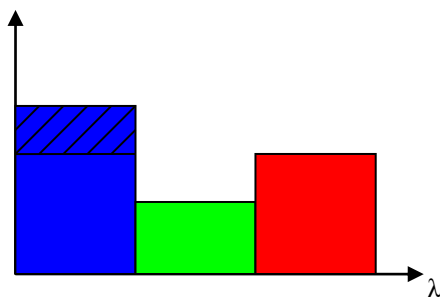


Рис. 4.2. Основные цвета аддитивной смеси

Существует ряд способов аддитивного сложения цветов:

- одновременное смешение трех окрашенных пучков цвета на белом экране, молочном стекле, белой призме, внутри белого (фотометрического) шара;

- смешение излучений с использованием такого явления, как зрительная инерция (лат. *ersisto* – постоянно пребывать, оставаться) – особенность зрительного восприятия дискретных последовательных событий, которые кажутся непрерывными (персистенция). Так, например, когда крутят горящий факел, глаз видит огненный круг вместо нескольких положений одного и того же горящего факела;

- подача поочередно трех модулированных по времени сигналов на одно из рассмотренных устройств; использование вертушки Максвелла;

- пространственное смешение световых пучков от объектов, имеющих меньшую, чем глаз, разрешающую способность.

Схема аддитивного синтеза цвета. Рассмотрим (рис. 4.3) простой вариант с использованием трех проекторов и белого экрана.

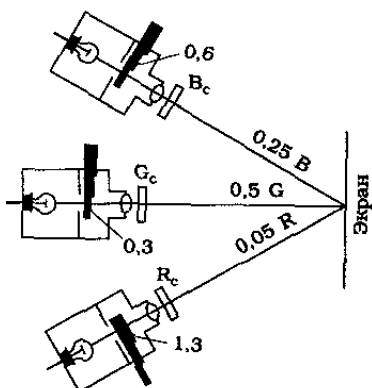


Рис. 4.3. Схема аддитивного синтеза цвета

Основные в этой схеме получаются субтрактивно с использованием синего, зеленого и красного светофильтров на

объективах проекторов. Для дозирования основных используются оптические клинья. На экране смешиваются, образуя заданные цвета, световые пучки, пропускаемые светофильтрами и клиньями. Мощности этих основных излучений (*они называются единичными*) подбираются так, чтобы на экране получался белый (ахроматический) цвет.

По оптическим плотностям полей дозирующих клиньев можно рассчитать количество основных, направленных на экран. Для этого надо пересчитать оптические плотности в коэффициенты пропускания. Затем, вспомнив, что коэффициент пропускания показывает, какая часть потока пропущена оптической средой, судить об относительных количествах смешанных основных.

Цветовое уравнение, его анализ. Если при помощи клиньев получить определенные соотношения основных, например, 0,05R, 0,5G, 0,025B, то такой цвет будет зелено-голубым, достаточно насыщенным. Эти соотношения можно записать в виде уравнения:

$$Ц = 0,05R + 0,5G + 0,025B \quad (4.4)$$

где Ц – цвет равен сумме световых окрашенных пучков в относительных единицах. Таким образом, для конкретного случая выбора основных цветов получено *уравнение цвета*.

Количество основных, необходимых для аддитивного синтеза некоторого цвета, называется его *цветовыми координатами* (красной, зеленой, синей) и обозначается R, G, B. Количество основных может быть больше единицы, например, если увеличить мощность лампы с зеленым светофильтром в 10 раз, то вместо 0,5 G надо будет написать 5 G. Изменится не только написание формулы, изменится цвет. Он сместится в зеленую зону. В общем виде можно записать следующее уравнение:

$$Ц = RR + GG + BB \quad (4.5)$$

где R, G, B – основные;

R, G, B – цветовые координаты этих основных;

RR, GG, BB – члены уравнения (4.2), которые называются «цветовыми составляющими».

Это каноническая форма уравнения, в которой порядок расположения его членов всегда один и тот же: красный, зеленый, синий. Читается уравнение так: «в результате сложения R, G, B единиц основных R, G, B образуется цвет, тождественный цвету Ц»:

$$Ц = a_1R + a_2G + a_3B \quad (4.6)$$

Цвет, записанный в виде уравнения, может быть оценен численно по цветовому тону и насыщенности. Наименьший член уравнения цвета оказывает влияние на его ахроматическую составляющую, два других – на цветовой тон. Все три выражают его насыщенность.

Отобразим эти утверждения формулами. Обозначим цветовые координаты a_1, a_2, a_3 , где a_1 – наибольшая координата, a_3 – наименьшая. Из чего, в соответствии с нашими рассуждениями, уравнение можно рассматривать как сумму двух:

$$\begin{aligned} Ц &= (a_1 - a_3)R + (a_2 - a_3)G \\ Ц &= a_3R + a_3G + a_3B \end{aligned} \quad (4.7)$$

Причем первое уравнение выражает насыщенный хроматический цвет, второе – ахроматический. Напомним, что наименьшая координата определяет ахроматическую составляющую цвета, а разности координат $(a_1 - a_3)$ и $(a_2 - a_3)$ – хроматическую.

В этом случае тон можно выразить показателем цветового тона:

$$\kappa_{ц.т.} = \frac{a_1 - a_3}{a_2 - a_3} \cdot \left| \frac{R}{G} \right| \quad (4.8)$$

Отношение (4.8) показывает, во сколько раз преобладающая координата вносит больший вклад в ощущение цветового тона, чем средняя. Если две координаты равны и больше третьей, то цвет – дополнительный основному, определяемому наименьшей координатой ($\kappa_{ц.т.}=1$). Если две координаты равны и меньше третьей, показатель цветового тона становится бесконечно большим. Это означает, что цветовой тон соответствует основному, определяемому наибольшей координатой. Насыщенность можно выразить показателем насыщенности κ_n :

$$\kappa_n = \frac{(a_1 - a_3) + (a_2 - a_3)}{a_1 + a_2 + a_3} \quad (4.9)$$

Из данного выражения следует, что показатель насыщенности – это доля хроматической компоненты в цвете. Не все насыщенные цвета могут быть воспроизведены смешением излучений, выделенных из спектра. Например, оранжевые, голубые, часть пурпурных и т.д. Для получения этих цветов требуются раздражения только двух видов, а, как видно (см. кривые основных возбуждений на рис. 3.3), раздражения возникают и в других зонах спектра.

Например, насыщенный голубой – это сине-зеленый цвет, т.е. должны быть возбуждены только синие и зеленые рецепторы. На деле возбуждаются также красные рецепторы, цвет теряет насыщенность.

Колориметристы для измерения такого цвета нашли выход. К насыщенному голубому цвету добавляют красное излучение

до тех пор, пока измеряемый цвет не уравнивается с синтезируемым. Тогда уравнение (4.4) примет вид:

$$\begin{aligned} \text{Ц} + \text{RR} &= \text{GG} + \text{BB}, \text{ или в каноническом виде} \\ \text{Ц} &= -\text{RR} + \text{GG} + \text{BB}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Это означает, что цветовое уравнение в общем случае может иметь отрицательные цветовые составляющие, а цвета – отрицательные координаты.

Итак, резюмируем: *основные законы аддитивного синтеза*, о которых говорилось выше, были сформулированы в 1853 г. математиком Германом Грассманом.

Первый закон (закон трехмерности). Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы. Закон позволяет описывать цвета при помощи цветовых уравнений.

Второй закон (закон непрерывности). Из этого закона следует основной принцип измерения цвета: не существует такого цвета, к которому невозможно подобрать бесконечно близкий.

Третий закон (закон аддитивности). Цвет смеси излучений зависит только от их цветов, но не от спектрального состава. Таким образом, цвет смеси нескольких излучений выражается суммой цветов этих излучений. Если:

$$\begin{aligned} \text{Ц}_1 &= R_1R + G_1G + B_1B, \\ \text{Ц}_2 &= R_2R + G_2G + B_2B, \\ \text{-----} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\text{Ц}_n = R_nR + G_nG + B_nB,$$

то

$$\text{Ц}_\Sigma = (R_1 + R_2 + \dots + R_n)R + (G_1 + G_2 + \dots + G_n)G + (B_1 + B_2 + \dots + B_n)B$$

Цветность и ее выражение. Координаты цвета выражают количество каких-то единиц, например, мощности каждого из основных. Тогда сумма координат представляет собой количественную характеристику цвета, в нашем примере –

мощность излучения носителя цвета. Эта сумма называется модулем цвета (m):

$$R + G + B = m \quad (4.12)$$

Для многих практических целей достаточно знать лишь качественную характеристику цвета – его цветность. Разделив координаты цвета на модуль, получим их относительные значения (I), называемые координатами цветности (это частный случай уравнения цвета, модуль которого равен единице). Основные координаты цветности (*записываются строчными буквами*) выглядят следующим образом:

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B}, \quad (4.13)$$

В этом случае уравнение цветности имеет вид:

$$Ц = rR + gG + bB \quad (4.14)$$

Это уравнение дает представление о цвете независимо от его количества и называется уравнением цветности. Как мы уже говорили, модуль этого уравнения равен единице, поэтому это уравнение иногда называют единичным, как и цвет, который оно выражает. Зная величины двух членов уравнения, всегда можно найти величину третьего. Удобство этого уравнения заключается также в том, что единичный цвет можно однозначно представить на плоскости координатами двух членов уравнения.

4.5. Основы субтрактивного синтеза

В отличие от аддитивного синтеза субтрактивный основан не на сложении, а на вычитании цветов. Образование цвета происходит при прохождении белого цвета, содержащего основные цвета, через прозрачные окрашенные среды.

Если на пути излучения будет находиться несколько сред, то вычитаемое в уравнении будет состоять из нескольких членов. Поскольку при субтрактивном синтезе используется именно несколько сред, они не могут быть окрашены в основные цвета, так как каждая из таких сред поглощала бы по две трети спектра.

При парном сочетании эти среды будут полностью поглощать проходящее через них излучение. В связи с этим для субтрактивного синтеза применяют среды, окрашенные не в основные, а в дополнительные цвета – желтый, пурпурный, голубой.

Среды, окрашенные в эти цвета, пропускают две трети и поглощают одну третью часть спектра светового излучения. Поэтому для многокрасочного печатания применяют краски, окрашенные в желтый, пурпурный, голубой цвета, комплект которых называется триадой.

При трехкрасочном печатании синтез цветов осуществляется на основе применения трех красок, каждая из которых поглощает один из основных цветов. Особенность его заключается еще и в том, что в красочном слое избирательное вычитание одних излучений и пропускание других происходит дважды. Излучение сначала проходит через красочный слой до подложки, а затем, отражаясь от нее, вторично проходит тот же слой и, испытав при этом селективное поглощение, поступает в глаз наблюдателя.

Чтобы пропущенная часть излучения имела максимальную величину, краска должна обладать в зоне пропускания прозрачностью, а подложка должна характеризоваться высоким и неизбирательным значением спектрального коэффициента отражения. Поэтому при проведении трехкрасочного печатания используют главным образом мелованную бумагу, отличающуюся высокой белизной.

Образование цветов при субтрактивном синтезе на примере использования триадных красок (рис. 4.4) – это случай идеального субтрактивного синтеза, выполненного при использовании источника с единичными основными

излучениями, красок, абсолютно прозрачных в зонах пропускания и полностью поглощающих одну треть часть спектра, и подложки, полностью отражающей падающий свет.

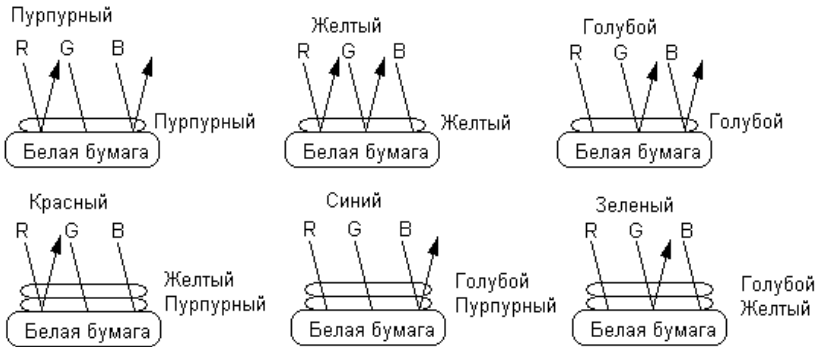


Рис. 4.4. Схема образования основных и дополнительных цветов при субтрактивном синтезе триадных печатных красок: (излучения: R- красное; G-зеленое; B-синее)

В результате такого субтрактивного синтеза образуется восемь различных цветов: белый – при отсутствии красок (незапечатанная бумага), три дополнительных цвета – при наложении на подложку одной триадной краски, три основных цвета – при парном совмещении триадных красок, черный – при тройном наложении тех же красок.

Четырехцветная автотипия (СМΥК: Cyan, Magenta, Yellow, Key colour) – субтрактивная схема формирования цвета, используемая в полиграфии для стандартной триадной печати, в живописи, в принтерах с применением набора красок и т.д.

Схема СМΥК по сравнению с RGB содержит меньший набор монохроматических цветов, так как она отражает часть лучей света, прошедших через фильтры. Из схем на рис. 4.5 видно, что аддитивный и субтрактивный синтезы цвета взаимосвязаны.

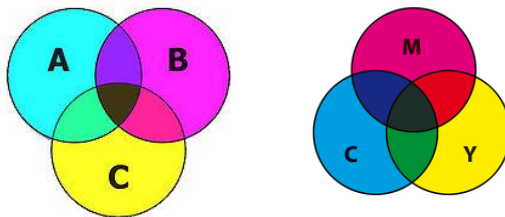


Рис. 4.5. Схемы субтрактивного синтеза в СМΥК

Как отмечалось ранее, новый цвет может быть получен смешением окрашенных сред. Главным инструментом регулирования цвета при субтрактивном синтезе служат краски. Самое важное требование к краскам – вычитать основные в одной зоне спектра и пропускать в двух других. Цвет краски является дополнительным к дозируемому цвету излучения.

Пропускание должно быть управляемым. Средством управления является толщина красочного слоя в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$D = \chi \cdot c \cdot l, \quad (4.15)$$

где χ – удельный показатель поглощения, зависящий от природы вещества;

c – концентрация; l – толщина слоя.

Первый множитель определяет качество поглощающего вещества, два последних – служат количественной характеристикой. Поэтому спектральное выражение для оптической плотности, как правило, имеет вид:

$$D_{\lambda} = \chi_{\lambda} C_n, \quad (4.16)$$

где $C_n = c \cdot l$ – поверхностная концентрация;

D_{λ} – безразмерная, но спектрально зависящая величина.

Если в случае аддитивного синтеза цвета основная характеристика объекта – коэффициент отражения (ρ), то при субтрактивном синтезе основной характеристикой краски является коэффициент пропускания ($\tau = 10^{-D}$).

Когда известно (по зональным коэффициентам пропускания), во сколько раз ослабились основные RGB, то *уравнение субтрактивного синтеза в аддитивной форме* для рассмотренного случая будет выглядеть так:

$$\text{Ц} = 0,5R + 0,1G + 0,7B \quad (4.17)$$

Схема управления основными излучениями при субтрактивном синтезе цвета приведена на рис. 4.6.

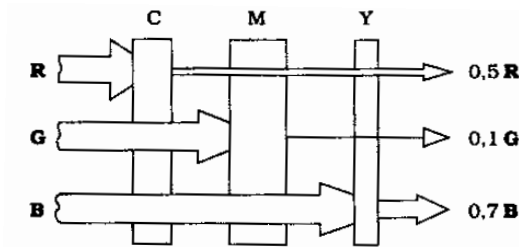


Рис. 4.6. Схема управления основными излучениями при субтрактивном синтезе цвета

В уравнении субтрактивного синтеза для количественного выражения цвета иногда пользуются субтрактивными координатами цвета. В этом случае оно принимает вид:

$$\text{Ц} = C_r^c C + C_g^m M + C_b^y Y \quad (4.18)$$

где C, M, Y – основные краски субтрактивного синтеза;

C_r^c, C_g^m, C_b^y , – количества красок субтрактивного синтеза, выраженные через поверхностную концентрацию (субтрактивные координаты цвета).

Особенности автотипного синтеза. Заметим, что применение субтрактивного синтеза цвета в полиграфии касается только случая наложения равномерных по всей площади красочных слоев. При растровом воспроизведении цветных изображений происходит синтез цвета растровым методом – «автотипный синтез цвета». В этом синтезе участвует субтрактивный синтез цвета при прохождении света через краску и аддитивный, когда происходит пространственное смешение цветов.

Итак, *автотипный синтез цвета* – это воспроизведение цвета в полиграфии на оттиске путем аддитивного смешения цветов, получаемых комбинациями наложений печатных красок на запечатываемый материал. При этом цветное полутоновое изображение формируется разноцветными растровыми элементами (точки или микроштрихи) с одинаковой светлотой (насыщенностью цвета) отдельных печатных красок, но различных размеров, форм и частоты.

Эффект полутонов сохраняется благодаря тому, что темные участки изображения воспроизводятся крупными растровыми элементами, а светлые – более мелкими. При наложении растровых элементов изображения на оттиске в процессе печатания синтез цвета носит смешанный аддитивно-субтрактивный характер.

Таким образом, в автотипной печати создание (синтез, воспроизведение) цвета на бумаге происходит путем поглощения света и изменения его спектрального состава. Свет, проходящий через несколько поглощающих сред, подчиняется сравнительно сложным законам (произведение кривых пропускания). Еще более сложным законам подчинено действие отраженного света; при этом необходимо учесть также и кроющую способность краски.

Если в однокрасочной печати автотипным способом передаются только градации яркости, то на многокрасочной репродукции отношения площади элементов, отпечатанных голубой, пурпурной и желтой красками определяют цветовой тон, а также чистоту цвета.

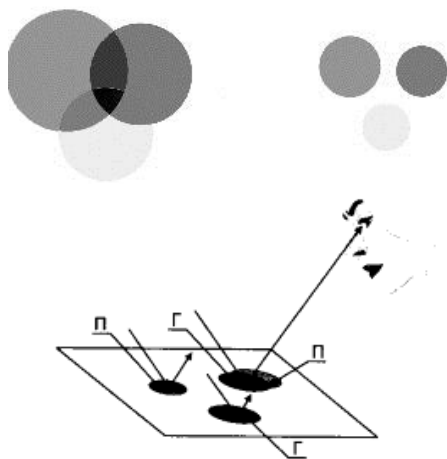


Рис. 4.7. Автотипный синтез цвета:
П – пурпурный; Г – голубой

Автотипный метод позволяет передать всю цветовую палитру, несмотря на то, что микроструктуру растровой иллюстрации создают всего восемь цветов: цвет подкладки (бумаги); голубой, пурпурный и желтый – цвета одинарных красок; красный, зеленый и синий – цвета их двойных наложений; черный – цвет тройного наложения.

Чистота цвета представляет собой долю монохроматического потока излучения в смеси его с белым (для источников излучения) или потока отражения (пропускания) в смеси с белым и черным (для красок, растворов и поверхностей).

Трехкомпонентная теория зрения является теоретической базой цветного синтеза при многокрасочном воспроизведении цветных оригиналов средствами полиграфической технологии, где используют триаду цветных красок ГПЖ (СМУ): голубая (Г, cyan, С), пурпурная (П, magenta, М) и желтая (Ж, yellow, Y). Применение четвертой, черной краски (Ч, black, key, К) не противоречит принципу трехкрасочного воспроизведения цветов, так как черную краску теоретически и практически можно рассматривать как смесь трех цветных красок.

Черная краска одновременно заменяет три цветные и вместе с тем увеличивает их общее количество за один краскопробег в печатной машине. Применение черной краски позволяет экономить цветные краски, а также увеличивать общий контраст изображения.

В традиционной автотипной печати черная печатная краска выполняет вспомогательную роль и вводится не только для расширения цветового охвата за счет увеличения количества темных тонов, но и с целью создания благоприятных условий при использовании чистых цветных печатных красок (с узкими зонами спектрального поглощения).

Чистые печатные краски обладают меньшей степенью вредного поглощения (имеют узкий спектр, в краске нет черного компонента), что также ведет к расширению цветового охвата изображения на оттиске за счет синтеза его насыщенных (незачерненных) ярких одинарных и бинарных цветов.

Несмотря на то, что технологический процесс автотипного воспроизведения цветных оригиналов сложен и дорог, цветовой синтез четырьмя красками в полиграфии имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с трехкрасочным синтезом, особенно в плане расширения цветового охвата и улучшения качества оттиска. Во всех случаях, когда на оттиске необходимо печатать текст, при печати должна использоваться черная краска, так как текст печатают не тремя цветными красками (голубая + пурпурная + желтая), а только одной черной либо (в редких случаях) – лишь голубой или пурпурной.

В полиграфическом автотипном воспроизведении изображений особенно сложна для воспроизведения однокрасочная репродукция, для которой свойственно отличие в любом цвете всегда только одной из его характеристик, а именно: светлоты, яркости цвета. Самая качественная однокрасочная репродукция получается при печати на белой бумаге либо на материале, покрытом толстым слоем белил или черной краски, а самая нечитаемая однокрасочная репродукция – при использовании желтой краски. Светлотное различие на оттиске однокрасочной репродукции создается благодаря аддитивному смешению световых потоков, образуемых бумагой (подложка репродукции) и микроштрихами черной краски (если

световым потоком можно назвать отсутствие светлоты, пустоту) или любой другой краски.

Однокрасочная репродукция стремится передать контрасты оригинала только по одной светлоте и, в отличие от многокрасочной цветной репродукции, может называться «светлотной репродукцией» (как предлагает, например, Н.Д. Нюберг).

Двухкрасочная репродукция (дуплекс) не относится к цветной репродукции, так как вторая краска – вспомогательная. Дуплекс – способ автотипной печати (автотипия), применяемый для репродуцирования черно-белых полутоновых оригиналов двумя печатными красками, одна из которых обычно черная, а вторая – серая, палевая, голубая, коричневая и пр.

Дуплекс делает печатное изображение, особенно воспроизведенное с черно-белых фотографий, более выразительным, чем обычное однокрасочное, а при использовании серой краски увеличивается интервал оптических плотностей изображения.

Главная задача двух красок при дуплексе остается такой же, как и при печати в одну краску. При дуплексе получается и дополнительный эффект: изменение яркостей на оттиске сопровождается изменением цветового тона и насыщенности. Дуплекс печатается красками, одна из которых в большей или меньшей степени поглощает свет длин волн, отражаемых другой. В этом случае цвет решает в основном градационные задачи, но уже за счет слабого цветового контраста.

В полиграфии полноценный синтез цвета на оттиске при автотипном воспроизведении цветных оригиналов начинается при синтезе с применением не менее трех красок разного цвета. И даже в тех случаях, когда общее количество красок (ранее оно приближалось к 20) значительно больше, синтез все равно остается трехцветным.

Принципиальное значение имеют варианты воспроизведения оригиналов на оттиске одной и тремя красками, а все остальные случаи группируются вокруг них.

В отличие от фотографического воспроизведения натуральных объектов, в полиграфическом репродуцировании оригинал и оттиск представляют собой плоские однотипные изображения и

рассматриваются при одинаковых или сравнимых условиях освещения.

Это делает задачу цветного репродуцирования достаточно определенной. На каждом участке оттиска необходимо получить такие количества трех красок, при которых эти участки совпадут по цвету с соответствующими участками оригинала, т.е. получить колориметрически (по поглощению света растворами) или физиологически точную репродукцию.

Случается, что репродукции, не совпадающие по цвету с оригиналом на многих или даже на всех участках изображения, при отсутствии оригинала воспринимаются как высококачественные. Этот феномен подтверждает установленный психологами факт, что глаз менее критичен к ошибкам в воспроизведении цвета, чем к ошибкам в градации и в серых тонах. Н.Д. Ньюберг назвал такие репродукции «психологически точными».

Основная задача синтеза цвета при автотипном воспроизведении цветных оригиналов – выбор спектральных характеристик красок, используемых при печатании оттисков. Установлено, что многие излучения, несмотря на различие в спектральном составе, зрительно воспринимаются одинаковыми по цвету.

Как уже упоминалась выше, цвета с различными спектральными составляющими, зрительно воспринимающиеся одинаковыми, называются «метамерными».

Максимальное количество визуально тождественных излучений соответствует ахроматическим цветам средней яркости, а наименьшее – сильно насыщенным.

Наиболее насыщенные цвета (спектральные) вообще могут быть созданы только определенными монохроматическими излучениями.

В практике автотипного воспроизведения цветных оригиналов, и в частности, при выборе спектральных характеристик печатных красок, уменьшение количества визуально тождественных излучений с возрастанием насыщенности цветов имеет большое значение

Присутствие ярких насыщенных цветов в цветных оригиналах маловероятно, и при автотипном воспроизведении

можно отказаться от синтеза на оттисках ярких насыщенных цветов в пользу менее ярких и менее насыщенных, применяя печатные краски с побочным спектральным поглощением.

Выбор оптимальных спектральных характеристик печатных красок, применяемых при автотипном воспроизведении цветных оригиналов, связан главным образом с воспроизведением на оттиске малонасыщенных по цвету излучений, среди которых наиболее часто встречаются визуально тождественные.

Чтобы повысить насыщенность цветного изображения на оттиске, полученном методом офсетной печати, и расширить таким образом цветовой охват, некоторые авторы предлагают использовать для синтеза цвета с целью увеличения количества красок дублирование основных двухзональных красок, применяемых в трехцветной печати. Так, вместо одной желтой, одной голубой и одной пурпурной красок рекомендуют использовать две желтые, две голубые и две пурпурные.

По ряду причин наиболее целесообразно применять разносветлые и разнонасыщенные краски, например, голубую (более светлую и менее насыщенную), красную (менее светлую и более насыщенную) и розовую (более светлую и менее насыщенную).

Подобные пары красок, кроме различия по светлоте и насыщенности, могут иметь и некоторые различия в цветовом тоне. Опытные данные дублирования желтой краски не дали значительного эффекта – оказалось возможным дублирование только двух красок.

5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТА

Есть две принципиально различные возможности (системы) оценки и представления цвета, а именно:

1. Посредством построения колориметрической системы (исходя из законов аддитивного синтеза).

2. На основе системы спецификации цветов (т.е. практического применения конкретных красок – субтрактивный синтез, где цвет имеет материальный носитель в виде окрашенных образцов).

Общим базисом для обеих систем является фундаментальное понятие «цветовое пространство».

5.1. Цветовое пространство

В настоящее время общепринятым (устоявшимся) является представление о цветовом пространстве и его строении как о трехмерном.

Исаак Ньютон предложил систематизировать цвета при помощи белого света, разложенного призмой в спектр. Этот спектр ученый расположил по кругу, указав на существование семи основных цветов спектра К О Ж З Г С Ф (*по первым буквам названий цветов излучений: красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый*).

Впоследствии между фиолетовым и красным монохроматическими излучениями были помещены бихроматические пурпурные цвета. Все природные цвета, плавно переходя один в другой, располагаются внутри круга с белой точкой в центре. Насыщенность цвета увеличивается от центра круга к периферии.

5.1.1. Законы цветового пространства

1. Признается трехмерность цвета как свойство, лежащее в основе его восприятия. Размерность цветового пространства равна 3.

2. Цветовое тело всех реальных цветов – это часть цветового пространства. Цветовое тело строится вокруг ахроматической оси, черный – внизу, белый – вверх. Для самосветящихся объектов светлота меняется от невидимой до слепящей. Для несамосветящихся она имеет границы от min (черный цвет) до max (белый цвет).

3. Последовательность цветов – это замкнутая геометрическая фигура, определяющаяся спектром. Интервал между красным и фиолетовым замыкают пурпурные цвета.

4. Чем дальше цвет находится от ахроматической оси, тем он более насыщен. Ахроматические цвета имеют только одну характеристику – светлоту.

5. Цвета одного цветового тона находятся на полуплоскостях, проходящих через ахроматическую ось, и называются *«вертикальными сечениями цветового тела»*.

6. В вертикальном сечении цветовой тон не изменяется. Цвет изменяется: *за счет изменения насыщенности* – в направлении от ахроматической оси; *за счет изменения светлоты* – в направлении, параллельном ахроматической оси.

Цветовое тело и цветовой охват. В колориметрии используют представления цвета методом задания его координат. Любой, линейно независимой триадой красок или основных стимулов можно воспроизвести некоторую конечную, в смысле цветового пространства, совокупность цветов.

Если известны координаты каждого из цветов в этой совокупности, можно построить фигуру, используя, например, декартово пространство. Это и будет цветовым телом.

Сечение данной фигуры по какому-либо принципу, например, исходя из того, что модуль всех цветов в сечении равен 1 (плоскость единичных цветов), дает цветовой охват, т.е. все многообразие цветов, которые можно воспроизвести с помощью выбранной триады красок или основных стимулов.

На рис. 5.1 показано сравнение цветовых охватов глаза человека (А), монитора (В) и печатающей машины (С). Цветовой охват монитора соответствует модели RGB, печатающей машины – CMYK.

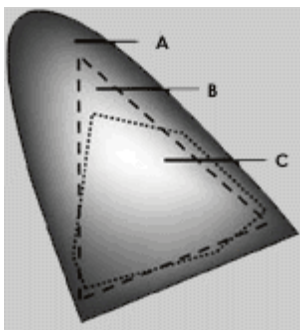


Рис. 5.1. Цветовые охваты:
глаза человека, монитора
и печатающей машины

Диапазон цветов, который может быть воспроизведен, зафиксирован или описан, называется «цветовым охватом». Определенным цветовым охватом обладают электронно-лучевая трубка монитора или телевизора, цветовые модели, полиграфические краски и, конечно, глаз человека.

5.2. Принципы построения колориметрических систем

Теория цвета использует в основном два способа описания цвета – с помощью колориметрических систем и систем спецификации.

На основании законов Грассмана, любой цвет можно представить точкой в пространстве. Каждому цвету соответствует только одна точка и наоборот – каждой точке соответствует один цвет. Таким образом, цветовое пространство можно считать формой геометрического представления различных цветов.

Для упорядочения цветов и выполнения над ними математических действий в цветовом пространстве вводят систему цветовых координат. Таких систем может быть великое множество. Как правило, началом координат служит точка, соответствующая черному цвету. В этой точке вообще отсутствует свет.

Система цветовых координат полностью определяется заданием координатных осей и выбранным на них масштабом. Каждый цвет выражается через основные цвета этой системы. Главным ограничением при выборе основных является обязательная *линейная независимость цветов, т.е., чтобы ни*

один из основных не мог быть получен смешением двух других, и сумма основных в равных количествах давала ахроматический цвет. В остальном выбор основных цветов, направление осей, масштаб на осях произвольны и зависят от поставленной цели.

Цветовое пространство при выборе осей новой системы цветов и произвольном их расположении может измениться по сравнению с первоначальным пространством. Это означает, что положения точек, представляющих различные цвета, могут измениться, однако соотношения между цветами меняться не должны.

Цвет можно представить в цветовом пространстве не только точкой, но и цветовым вектором. Его начало будет совпадать с началом координат, а конец – с точкой данного цвета. В этом случае координаты цвета будут являться координатами цветового вектора.

Цветовое пространство основных цветов – красного, зеленого и синего, обозначенных R G B, изображено на рис. 5.2. Их координаты могут быть прямоугольными или косоугольными. Оси выходят из одной точки и не лежат в одной плоскости. Это означает, что координаты задаются тремя величинами.

Если по осям выбрать одинаковый масштаб по основным, то плоскость, проведенная через эти основные, отсечет равносторонний треугольник, через $1/3$ высоты которого пройдет вектор ахроматических цветов (обычно эта точка относится к равноэнергетическому источнику света, т.е. такому, у которого все монохроматические излучения равны по мощности).

Данный треугольник называют «треугольником единичных цветов», так как соответствующая ему плоскость проходит через три точки с координатами 1R, 1G, 1B. Направление вектора ахроматических цветов указывает на увеличение светлоты. Любой другой вектор, не совпадающий с ахроматическим, будет выражать не только светлоту, но и цветность.

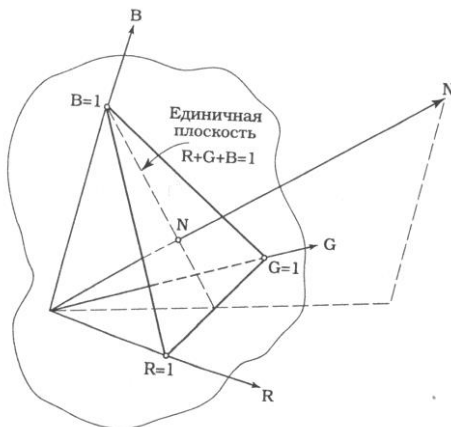


Рис. 5.2. Пространство RGB

Чем ближе к осям проходит вектор цвета, тем больше будут выражены насыщенность и цветовой тон. Если единичные цвета для сравнения спроецировать на белый экран рядом, то окажется, что они различаются по яркости.

Очевидно, что, изменяя количества основных, можно подобрать их так, чтобы цвета были одинаковыми по яркости, но при этом не все основные будут принадлежать плоскости единичных цветов, поскольку принадлежат плоскости равных яркостей. Это хорошо видно, если на осях отложить (*в том же масштабе*) количества основных, имеющих одинаковые яркости.

Проведя через концы новых векторов плоскость равных яркостей, можно увидеть, что эта плоскость пересечется с единичной плоскостью по прямой линии – линии равных яркостей. Из этого следует, что некоторые единичные цвета принадлежат двум плоскостям и имеют одинаковые яркости. Таких линий и плоскостей можно провести множество, и все они будут параллельными.

В колориметрии имеется понятие «*плоскость нулевых яркостей*», т.е. плоскость, где яркость отсутствует. Пересечение плоскости нулевых яркостей с единичной плоскостью дает линию нулевых яркостей, или *алихну*.

Плоскость нулевых яркостей и алихна используются для построения специфических колориметрических систем типа XYZ.

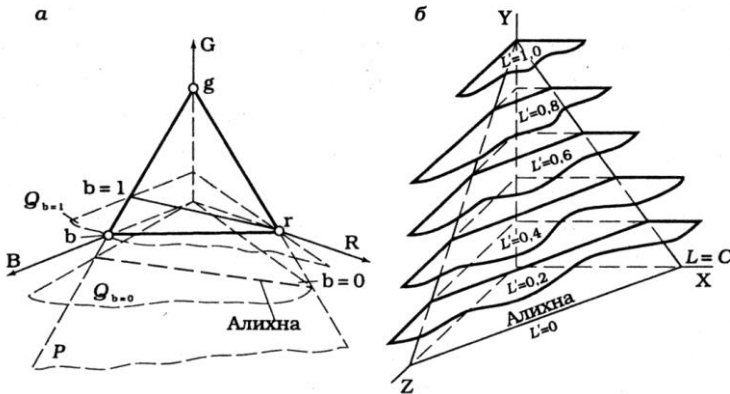


Рис. 5.3. Плоскости и линии равных яркостей

Большинство колориметрических систем использует аддитивный синтез цвета. Поэтому принципы составления уравнений цвета и цветности идентичны, и, соответственно, возникают аналогичные проблемы с отрицательными членами уравнениями цвета. А это значит, что не все реальные цвета лежат в треугольнике единичных цветов.

Для определения области единичных цветов, которую занимают цвета, воспринимаемые глазом (цветовой охват в данной системе координат), используют следующий прием: находят координаты цвета монохроматических излучений, имеющих мощность 1Вт.

Это так называемые *кривые сложения*. Они и показывают, какое количество основных надо смешать, чтобы получить цвета, визуально не отличимые от спектральных единичной мощности.

Теория цвета использует в основном два способа описания цвета (о чем уже говорилось выше): с помощью

колориметрических систем и посредством систем спецификации.

Колориметрические системы. Цвет можно воспроизводить разными триадами основных. Разными в том смысле, что цветовые тона одной из них могут отличаться от цветовых тонов другой. Естественно, что количественный результат измерения некоторого цвета связан с цветовыми тонами основных.

Цвет несамосветящегося объекта может быть охарактеризована тремя координатами: доминирующая длина волны (λ), чистота цвета (p), интегральный коэффициент диффузного отражения (ρ):

$$\rho = \frac{\int P_{\lambda} \rho(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int P_{\lambda} V(\lambda) d\lambda}, \quad (5.1)$$

где P_{λ} – спектральная плотность мощности излучения – в знаменателе стоит световой поток, падающий на тело, а в числителе – отраженный;

ρ – коэффициент, характеризующий яркость для несамосветящегося тела.

Преимущество этого коэффициента состоит в том, что он не может превышать 1, и ни одна из координат цвета (λ , p , ρ) не уходит в бесконечность.

Система координат λ , p , ρ очень наглядна, поскольку непосредственно ощущаются цветовой тон и яркость объекта. Однако большой недостаток системы состоит в том, что по осям координат отложены физические величины различной размерности. Производить расчеты в такой системе координат чрезвычайно сложно.

Основная физиологическая система КЗС. Выбор основных цветов, ограниченный лишь условием линейной независимости между ними, позволяет иметь неограниченно большое количество колориметрических систем. Одной из таких систем является физиологическая система КЗС.

В этой системе координаты цвета К З С – уровни возбуждения трех приемников глаза в единичных значениях К З С-компонентов цвета.

Особенность данной системы заключается в том, что, в отличие от всех других, в ней любой цвет не только выражается суммой трех основных, но и определяется уровнем и соотношением реакций трех цветоощущающих рецепторов глаза. В связи с этим неоспорима особая важность данной системы там, где есть необходимость анализа реакций цветоощущающих рецепторов, цветовой адаптации и т.д.

Основная трудность построения такой системы заключается в невозможности точного измерения спектральной чувствительности каждого из трех цветоощущающих рецепторов.

5.2.1. Основы колориметрической системы CIERGB

Чтобы цвет выражался однозначно, триаду основных цветов стандартизируют в международных колориметрических системах. Например, CIERGB и CIEXYZ. Международная колориметрическая система базируется на одном из основных законов Грассмана, согласно которому любой цвет может быть выражен через три линейно независимых цвета.

В 1931 г. CIE приняла в качестве трех линейно независимых цветов для CIERGB следующие монохроматические излучения: красное ($R = 700 \text{ нм}$), зеленое ($G = 546,1 \text{ нм}$), синее ($B = 435,8 \text{ нм}$).

Для колориметрических измерений удобнее выбирать единицы световых величин таким образом, чтобы одинаковые количества основных давали белый цвет. Это один из принципов синтеза в колориметрии. Экспериментально было установлено, что такое возможно при соотношении яркостей соответствующих цветов $R:G:B = 1:4,59:0,06$.

Эти качества основных получили название *яркостных коэффициентов*: $L_R = 1$; $L_G = 4,59$; $L_B = 0,06$.

Чтобы перейти к энергетическим величинам, за единицы количеств основных RGB принимают не яркостные коэффициенты, а яркостные единицы (Br; Bg; Bb):

$$\begin{aligned} B_R &= 680 \cdot L_R = 680 \text{ кд/м}^2; \\ B_G &= 680 \cdot L_G = 3121 \text{ кд/м}^2; \\ B_B &= 680 \cdot L_B = 41 \text{ кд/м}^2. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Учитывая, что яркости пропорциональны световым потокам, можно считать, что при соотношении световых потоков $F_R:F_G:F_B = 1:4,59:0,06$ будет также получен белый цвет. Это позволяет выразить количества основных в люменах: $F_R = 680 \text{ лм}$; $F_G = 3121 \text{ лм}$; $F_B = 41 \text{ лм}$.

Так как потоки излучения, переносимые основными, обозначаются R, G, B, можно записать:

$$R = \frac{Fr}{680 \cdot vr} \quad G = \frac{Fg}{680 \cdot vg} \quad B = \frac{Fb}{680 \cdot vb} \quad (5.3)$$

Одним из недостатков системы RGB является наличие отрицательных координат для целого ряда реальных цветов. Другой ее существенный недостаток – необходимость нахождения всех трех составляющих цвета для определения такой его количественной характеристики, как яркость.

В настоящее время колориметрическую систему RGB следует рассматривать как вспомогательную. Она практически не применяется. Вместе с тем нужно отметить, что для большинства разработанных в дальнейшем колориметрических систем основой служила именно RGB.

5.2.2. Основы стандартной колориметрической системы CIEXYZ

Данная система была принята одновременно с колориметрической системой RGB. В качестве основных в

системе CIEXYZ были выбраны цвета более насыщенные, чем спектральные. В связи с тем, что таких цветов в природе не существует, их обозначили символами XYZ, а сама система получила название CIEXYZ.

В связи с недостатками системы RGB, в основу построения новой колориметрической системы CIEXYZ были заложены следующие условия: 1) все реальные цвета должны иметь только положительные координаты; 2) яркость должна определяться одной координатой цвета. В соответствии со вторым условием построения колориметрической системы XYZ, цвета X и Z имеют нулевые яркостные коэффициенты: $L_X = 0$; $L_Z = 0$; L_Y принимают равным 1. В этом случае формула для расчета яркости ($B_{\text{ц}}$) значительно упрощается:

$$B_{\text{ц}} = 680 \cdot Y, \quad (5.4)$$

где Y – координата цвета.

Яркостной коэффициент цвета в этом случае определяется координатой цветности: (y) : $L_Y = y$.

В настоящее время стандартная колориметрическая система XYZ является рабочей. Именно в ней проводят непосредственно колориметрические измерения по определению цветовых характеристик (яркости, доминирующей длины волны и чистоты цвета).

Только в этой системе действуют законы Грассмана, позволяющие рассчитывать координаты и другие физические характеристики цвета, остальные системы – производные, кроме CIERGB, которая выполняет функцию контрольной, напрямую связанной со зрением человека.

5.3. Особенности равноконтрастной системы CIE

В этой системе оценки цвета величины воспринимаемых глазом цветовых различий (ΔE) в данных условиях наблюдения пропорциональны расстоянию между соответствующими точками цветового пространства. Принятая в 1976 г.

равноконтрастная система CIE-76 использует два равноконтрастных пространства – CIELUV и CIELAB.

CIELUV применяется для оценки малых различий в аддитивном синтезе цвета, особенно в телевидении, представляет собой уточненное пространство.

Уточнения коснулись главным образом светлоты. Формулы координат цвета следующие:

$$\begin{aligned}L &= 116 \cdot (Y/Y_0)^{1/3} - 16; \\U &= 13 \cdot L \cdot (u - u_0); \\V &= 13 \cdot L \cdot (v - v_0).\end{aligned}\tag{5.5}$$

В этих формулах: $Y/Y_0 \geq 0,01$;

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}.\tag{5.6}$$

При расчете с использованием координат цвета:

$$u = \frac{4x}{x + 15y + 3z}, \quad v = \frac{9y}{x + 15y + 3z}.\tag{5.7}$$

Формула расчета цветовых различий в этом пространстве:

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

CIELAB базируется на нелинейных преобразованиях пространства XYZ и предназначена для оценки малых цветовых различий в субтрактивном синтезе цвета.

Очень активно используется в полиграфии – в программах обработки изобразительной информации и представления изображений.

Показатели цветности рассчитываются через соответствующие координаты XYZ по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \\ b &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \quad (5.8)$$

где X_0 , Y_0 , Z_0 – координаты цвета соответствующего источника; X , Y , Z – измеренные координаты цвета образца.

Цветовой контраст между двумя цветами определяется по формуле:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}. \quad (5.9)$$

Использование CIELAB в управлении цветом объясняется тем, что это стандартная колориметрическая система и с ее помощью описывают цвет в равноконтрастной системе не зависящей от устройств с численными значениями, т.е. CIELAB позволяет проводить систематический контроль данных о цвете, начиная с обработки оригинала, вплоть до получения оттиска.

5.4. Системы спецификации цветов. Цветовые атласы

Два цвета можно сравнивать и без всяких приборов, непосредственно с помощью глаза. Если имеется некоторое количество красок, координаты цвета которых известны (*назовем эти краски образцами*), можно хотя бы приближенно определить цвет неизвестной окраски, подобрав к ней наиболее близкий образец.

Для определения или приближенной оценки цвета таких образцов должно быть очень много, и они должны быть систематизированы. Систематический набор образцовых красок называют *цветовым атласом*.

Для создания цветового атласа вряд ли целесообразно основываться на системе XYZ, которая базируется на нереальных цветах. Использование системы RGB также

наталкивается на некоторые затруднения. Здесь лучше всего выбрать систему λ, p, ρ , о которой было рассказано ранее.

В дальнейшем доминирующую длину волны (λ) будем называть *длиной волны*, или *цветовым тоном*, интегральный коэффициент диффузного отражения (ρ) – *коэффициентом отражения*, и (p), как и раньше, *чистотой цвета*. Модель цветового тела, построенного на таких координатах, можно представить в виде цилиндра, на оси которого лежат ахроматические (белые) цвета с коэффициентом отражения от $\rho = 0$ до $\rho = 1$ (или 100%).

Каждый разрез цилиндра плоскостью перпендикулярной оси можно рассматривать как цветовой круг, аналогичный цветовому кругу Ньютона. На периферии лежат спектрально-чистые цвета – от фиолетового до красного. Замыкается цветовой круг пурпурными цветами.

Чистота цвета (p) убывает от периферии к центру круга. Подчеркнем, что каждому кругу соответствует свое значение коэффициента *отражения* ρ . Яркость окраски пропорциональна ее интегральному коэффициенту ρ . В атласах в ряде окрасок одного цветового тона λ и одной чистоты p коэффициенты отражения ρ стараются подбирать так, чтобы разница в светлоте любой пары соседних окрасок воспринималась по возможности одинаковой. Таким же образом подбирают коэффициенты отражения и для шкал с тем или иным цветовым тоном λ . Аналогично распределяют также ступени чистоты цвета p . В некоторых атласах система построения ступеней несколько более сложная. Однако цель остается та же: создание шкалы, воспринимаемой глазом как наиболее равномерная.

5.4.1. Стандартные источники света CIE

Точное определение характеристик источника света является важной частью описания цвета во многих

приложениях. Стандарты CIE создают универсальную систему определенных спектральных данных для нескольких широко применяемых *типов источников света*.

Стандартные источники света CIE впервые были учреждены Комитетом CIE в 1931 году и обозначены латинскими буквами **A, B, C, D**.

•**тип A** – лампа накаливания с цветовой температурой примерно 2856 К.

•**тип B** – прямой солнечный свет с цветовой температурой примерно 4874 К.

•**тип C** – не прямой солнечный свет с цветовой температурой примерно 6774 К.

Впоследствии CIE добавил к этому набору типов источников света тип **D**, гипотетический тип **E** и тип **F**.

Типу **D** соответствуют различные условия дневного освещения с определенной цветовой температурой. Два таких источника – *D50* и *D65* – это стандартные источники, широко применяемые в освещении специальных кабин для просмотра полиграфических оттисков (индексы «50» и «65» отвечают цветовой температуре 5000 К и 6500 К, соответственно).

При проведении цветowych вычислений учитываются также спектральные данные источников света. По сути источники света являются *эмиссионными (излучающими)* объектами, но их спектральные данные практически ничем не отличаются от спектральных данных отражающих цветных объектов.

Соотношение определенных цветов в различных типах источников света можно выяснить путем исследования относительного распределения мощности световых волн, имеющих разную длину, и представить в виде спектральных кривых. Итак, исходя из вышесказанного, делаем заключение: 1) описания цвета, составленные по трем координатам, значительно зависят от стандартных цветowych систем CIE и от источников света; 2) при спектральном описании цвета эту дополнительную информацию напрямую не используют.

Тем не менее, стандарты CIE играют важную роль в процессе преобразования цветовой информации из трехкоординатных данных в спектральные.

6. УПРАВЛЕНИЕ ЦВЕТОМ

Ранее уже отмечалось, что существует столько цветовых пространств RGB, сколько в мире мониторов, и столько CMYK-пространств, сколько печатных устройств. В такой ситуации дизайнерам, когда они создают цвет и выводят пробные отпечатки в настольных системах, приходится иметь дело с огромным количеством неоднозначностей и работать практически наугад. Рассмотрим подробнее, как соотносятся между собой спектральные и трехкоординатные данные.

Сканированные цвета выглядят на мониторе не так, как в оригинале; экранные цвета не совпадают с пробными отпечатками; цвета, сохраненные в файлах изображений, выводятся на экран и на печать по-разному на различных устройствах (в дизайн-студии, сервис-бюро, в типографии).

Решить эту проблему помогают *системы управления цветом Color Management Systems, или (CMS)*, которые действуют на уровне настольных издательских систем, но также оказывают влияние и на решения, принимаемые по технологической цепочке «ниже».

Итак, системы управления цветом призваны выполнять две ответственные задачи, а именно: 1) выяснить, какие именно воспринимаемые нами цвета представляют числовые значения RGB и CMYK; 2) сохранить постоянство этих цветов при переходе от одного типа устройства к другому.

Большая часть вопросов, связанных с управлением цветом, относится к решению второй задачи, тем не менее, важно понимать, что до тех пор, пока не будет выполнена первая задача, решить вторую не удастся, т.е. согласовать цвета невозможно, если неизвестно, что они собой представляют.

Главной движущей идеей разработки систем управления цветом был принцип: получить при печати то, что видишь на экране монитора.

Подробности реализации управления цветом и его применения в конкретных приложениях могут оказаться безумно сложными, поскольку производитель каждого приложения настаивает на разработке собственного уникального интерфейса

и собственной терминологии, хотя основной принцип работы систем управления цветом относительно прост, и, как уже говорилось, в действительности функции этих систем заключаются в следующем:

- наделить числовые значения RGB и CMYK конкретным значением цвета, устраняя неоднозначность. Благодаря управлению цветом всегда известно, какой именно цвет эти числовые значения представляют;

- подобрать числовые значения RGB и CMYK, посылаемые на различные устройства – мониторы, струйные принтеры и офсетные печатные машины – так, чтобы они воспроизводили одни и те же цвета.

На первый взгляд может показаться, что реализация некоторых условий (требований) систем управления цветом предполагает выполнение ими более сложных функций, однако тщательный анализ показывает, что все эти функции сводятся к определенному их сочетанию в процессе решения именно двух упомянутых выше задач.

Подчеркнем, что понимание принципа действия системы управления цветом, позволяет без особых затруднений разобраться в сложностях интерфейсов приложений, в которых реализована эта система.

Чтобы в ходе технологического процесса преобразовать цветовую информацию в нужном для производителя направлении, используется огромное количество разнообразных устройств. Для ввода применяются не только высококачественные барабанные сканеры, но и планшетные сканеры, настольные планшетные сканеры, настольные сканеры слайдов и цифровые камеры.

Что касается устройств вывода, то здесь есть не только самые разные типы печатных машин (офсетные, рулонные, листовые), на которых применяются безводные краски и краски на основе растительных масел; печать с прямым копированием на печатные формы и высококачественная цветная печать, но и цифровые устройства цветопробы, флексография, устройства записи на пленку, шелкотрафаретные печатные устройства, цветные копировальные устройства, лазерные и струйные

принтеры и мониторы в качестве устройств вывода окончательного результата.

Вследствие такого разнообразия оборудования прежде замкнутый технологический цикл разбивается на множество отдельных подциклов. Поэтому возникает весьма большое количество возможных вариантов преобразования цветовой информации с устройств ввода для устройств вывода (рис. 6.1).

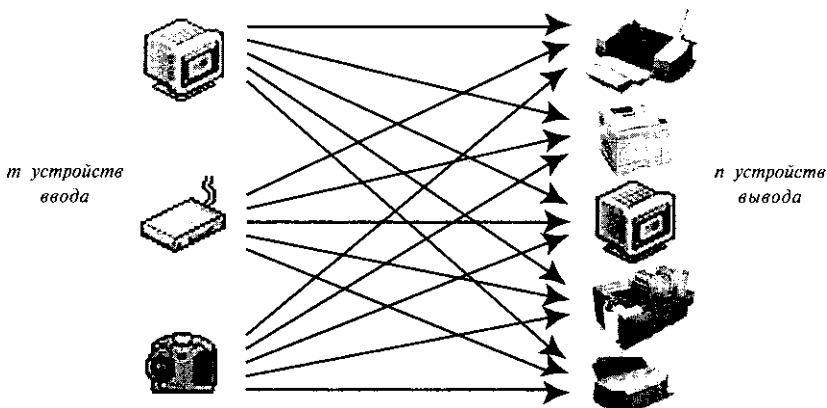


Рис. 6.1. Варианты преобразования цветовой информации устройствами ввода для устройств вывода

В настоящее время в полиграфии приходится иметь дело с достаточно большим количеством разнотипных устройств ввода (произвольно обозначаемых здесь m) и с не меньшим количеством разнотипных устройств вывода (также произвольно обозначаемых n). Таким образом, для технологического процесса с m -кратным вводом и n -кратным выводом требуется $m \times n$ разных преобразований ввода-вывода, что значительно усложняет дело.

Оригинальное решение управления цветом заключается во введении промежуточного представления требуемых цветов, которое называется *пространством привязки профилей (PCS)*. Назначение пространства PCS – служить в качестве аналога сетевого концентратора всех преобразований ввода-вывода.

Такой концентратор направляет данные по сети от 10 одних ПК к 10 другим ПК, используя 10 входящих и 10 выходящих линий вместо 100 линий для связи между отдельными ПК.

Замечательная особенность пространства PCS состоит в том, что оно сводит проблему $m \times n$ -связей между устройствами ввода-вывода к $m + n$ связям. При наличии m -связей устройств ввода с пространством PCS и n -связей этого пространства с устройствами вывода на каждое устройство приходится лишь одна связь (рис. 6.2).

Каждая связь, по существу, описывает режим воспроизведения цвета для конкретного устройства. Подобные связи называются профилями устройств. Пространство PCS и профили устройств являются двумя из четырех основных составляющих системы управления цветом.

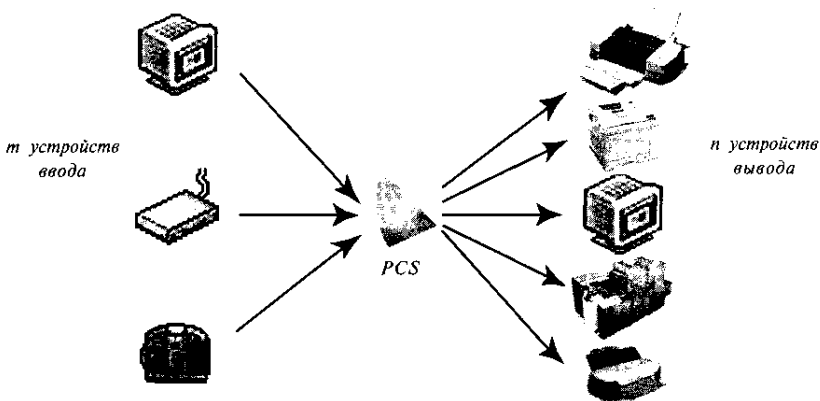


Рис. 6.2. Связь m -устройств ввода с пространством PCS и n -связей этого пространства с устройствами вывода

Составляющие управления цветом. Все системы управления цветом, основанные на стандарте ICC, содержат четыре основных составляющих:

1. PCS-пространство привязки профилей, позволяющее присвоить цвету однозначные числовые значения из цветовых пространств CIEXYZ и CIELAB вне зависимости от

особенностей различных устройств, применяющихся для воспроизведения этого цвета, а с точки зрения его восприятия человеком.

2. Профили, описывающие зависимость между сигналами RGB или CMYK, которые управляют устройством и конкретными цветами, воспроизводимыми с помощью этих сигналов. В частности, профили определяют значения CIEXYZ и CIELAB, соответствующие заданному набору числовых значений RGB или CMYK.

3. СММ – программное обеспечение, выполняющее все расчеты, необходимые для преобразования значений RGB или CMYK. Модуль СММ (иногда его называют *программным механизмом*) обрабатывает данные, хранящиеся в профиле.

4. Цели цветопередачи – описание стандарта ICC, содержащее четыре цели цветопередачи, или просто различные способы интерпретации цветов, находящихся вне цветовой гаммы (т.е. тех цветов, которые присутствуют в исходном цветовом пространстве, но не могут быть физически воспроизведены устройством вывода).

6.1. Пространство привязки профилей

Пространство PCS служит мерилom для определения цвета. В описании стандарта ICC в качестве пространства привязки разных типов профилей фактически используются два разных пространства – CIEXYZ и CIELAB. Главная особенность этих цветовых пространств состоит в том, что они представляют *воспринимаемый* цвет.

Именно эта особенность позволяет использовать цветовые пространства CIEXYZ и CIELAB в качестве «концентратора», через который проходят все преобразования цвета. Если цвет определен с помощью значений XYZ и LAB, значит, известно, каким образом его будет воспринимать человек с нормальным цветным зрением.

Профили и их функции. Принцип организации профилей достаточно прост, хотя их внутреннее строение может оказаться довольно сложным. Так, профиль может описывать единственное устройство (конкретный сканер, монитор или принтер), класс устройств (дисплеи Apple Cinema, принтеры Epson Stylus Photo 1280, стандартные рулонные офсетные печатные машины) или абстрактное цветовое пространство Adobe RGB (1998), CIELAB.

Однако, независимо от того, что профиль описывает, он, по существу, играет роль справочной таблицы, содержащей один столбец со значениями управляющих сигналов (числовые значения RGB или CMYK) и другой столбец с конкретными цветами, выраженными в пространстве PCS и полученными с помощью этих управляющих сигналов (рис. 6.3).

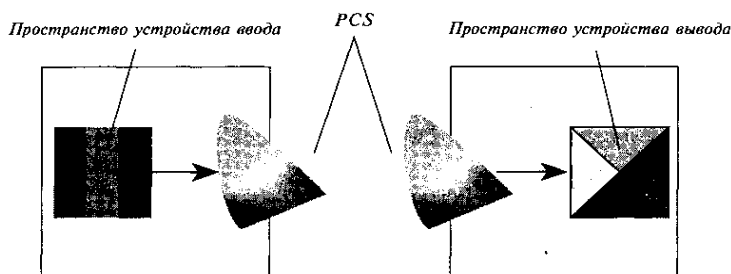


Рис. 6.3. Профили ввода и вывода

Профиль содержит два набора значений, а именно: значения RGB или CMYK, управляющие устройством, и соответствующие значения цвета, воспроизводимого с помощью CIEXYZ или CIELAB.

Профиль наделяет определенный цвет конкретными числовыми значениями RGB или CMYK. Исходные значения RGB или CMYK неоднозначны, поскольку они воспроизводят разные цвета на разных устройствах. Сам профиль не изменяет числовые значения RGB или CMYK – он просто придает им конкретное значение, указывая, что данный набор числовых

значений RGB или CMYK представляет цвет, определенный в цветовом пространстве CIEXYZ или CIELAB.

Для преобразования цвета всегда требуются два профиля: исходный и целевой. *Исходный профиль* сообщает системе управления цветом, какие цвета содержит документ, а *целевой профиль* – какие новые управляющие сигналы требуются для воспроизведения этих цветов на целевом устройстве. Таким образом, исходный профиль сообщает системе управления цветом источник цвета, а целевой профиль – место его назначения.

6.2. Модуль управления цветом

Такой модуль представляет собой программный механизм преобразования значений RGB или CMYK в профили с использованием данных о цвете (Color Management Module). Профиль не может содержать определение PCS для каждой из возможных комбинаций числовых значений RGB или CMYK, иначе его размер превысил бы гигабайтную отметку.

Для расчета промежуточных значений применяется модуль СММ. Этот модуль обеспечивает способ преобразования значений сначала из исходных цветовых пространств в пространство PCS, а затем из пространства PCS в любые целевые пространства.

Система управления цветом использует профили для определения цветов, которые должны совпадать с исходными, а также значения RGB или CMYK, которые должны совпадать с целевыми цветами, но все необходимые преобразования фактически выполняет модуль СММ.

Назначение модуля управления цветом. Профиль устройства ввода не может содержать определение PCS для каждой из возможных комбинаций значений RGB, а профиль устройства вывода – перечень значений CMYK для каждого из возможных цветов PCS. Например, если каждый из трех каналов RGB содержит 256 дискретных значений (от 0 до 255), пространство RGB будет содержать около 16,7 млн (!)

возможных значений RGB. Если бы профиль устройства RGB содержал определение PCS для каждого из 16,7 млн значений RGB и на каждое определение PCS было бы выделено лишь три байта, размер только одного профиля RGB составил бы более 48 Мб (!) Профили такого размера было бы просто невозможно вставлять в изображения или сверстанные страницы документов, содержащих цвет из разных источников.

Поэтому вместо хранения точки для каждого возможного значения RGB (в профиле ввода) или каждого возможного цвета PCS (в профиле вывода) модуль CMM описывает способ расчета новых точек на основании уже существующих. Данный процесс называется *интерполяцией*. Благодаря этому значительно сокращается количества точек, которые необходимо хранить в профилях.

В простейшем случае модуль CMM предполагает, что подобная интерполяция выполняется в цветовом пространстве CIELAB. В самом деле, если цветовое пространство CIELAB используется в качестве пространства PCS, модулю CMM достаточно взять значения LAB, полученные в профилях ввода, найти ближайшее значение PCS в профиле вывода и определить выходное значение.

Но на практике это не позволяет добиться отличных результатов, поскольку модель LAB не обеспечивает достаточную равномерность восприятия, которая требуется для подобного рода расчетов. В связи с этим производители модулей CMM используют разные механизмы выполнения интерполяции.

Одни производители дополняют модель LAB специальным математическими расчетами для исправления известных ее неточностей, другие – вообще избегают модели LAB и предпочитают выполнять преобразование в иное цветовое пространство с целью интерполяции, третьи – создают профили, поддерживающие дополнительные, частные пространства преобразования, помимо одного из двух обязательных пространств преобразования – XYZ и LAB.

Продолжающееся постоянное соперничество этих методов за получение наилучших результатов управления цветом служит

одной из причин, по которой многие производители создают и распространяют собственные модули СММ, заявляя, что их модули дают лучшие результаты, чем у конкурентов.

Модуль СММ, как правило, действует незаметно для пользователя системы управления цветом, четко выполняя свои функции. Но, если есть несколько модулей СММ (например, модули компаний «Adobe», «Agfa», «Apple», «Kodak «X-Rite»»), полезно знать, для каких именно операций они предназначены.

ИСС-совместимые модули СММ являются функционально совместимыми и взаимозаменяемыми, однако их точность расчета интерполяции и адаптации к белой точке (с использованием точек профиля в качестве образца) несколько отличается, а некоторые профили содержат специальные настройки для конкретных модулей СММ.

Отличия модулей СММ в точности расчетов незначительны. Если установлено несколько таких модулей и один из них дает неожиданные результаты, всегда можно испробовать другой. Но вот при наличии разного математического аппарата для расчета адаптации к белой точке в некоторых модулях СММ возникают определенные затруднения.

Дело в том, что белый цвет имеет немало оттенков, и человеческий глаз автоматически адаптируется к наблюдаемому в данный момент оттенку белого, на основании чего формируется суждение об остальных цветах. Из этого факта следует, что при выполнении преобразований цвета белый *цвет исходного пространства* обычно превращается в белый *цвет целевого пространства*.

В подобном преобразовании для ряда профилей (с применением 1% краски в одном или в нескольких каналах вместо использования белизны бумаги), белая точка преобразуется в «точку тенения». Для устранения этого недостатка целесообразно выбрать другой модуль СММ.

Отличия в математическом аппарате для расчета интерполяции могут быть сами разными: от незначительных до весьма существенных. Во многих модулях СММ известные

недостатки модели LAB (в частности, заметный фиолетовый оттенок небесного фона) устраняются с помощью специальных приемов математического аппарата интерполяции.

Практика встраивания в профили специальных настроек является прямым нарушением назначения открытого взаимозаменяемого формата профилей. Так, если используется инструментальное средство профилирования, создающее специальные настройки для конкретных модулей СММ, то с помощью этих модулей можно добиться некоторого улучшения конечного результата, но, как показывает практика, это улучшение столь незначительно, что ценность подобной специализации оказывается весьма сомнительной.

Как правильно выбрать модуль СММ? Профили содержат специальный дескриптор, позволяющий запрашивать наиболее предпочтительные модули СММ, если таковые имеются.

Хотя все профили *должны* быть в состоянии использовать любой ICC-совместимый модуль СММ, если предпочтительный для данной ситуации модуль отсутствует.

Операционные системы Macintosh и Windows, а также большинство приложений с управлением цветом допускают замену модулей СММ, наиболее предпочтительных для профилей, а также выбор конкретного модуля для выполнения всех задач управления цветом.

Наша рекомендация такова: выбрать один модуль СММ и постоянно работать с ним, обращаясь к другим модулям лишь при возникновении особых затруднений или для того, чтобы воспользоваться преимуществами модуля, который рекламирует его производитель.

6.3. Цели цветопередачи

Любое из устройств, предназначенных для цветопередачи, способно воспроизводить лишь фиксированный цветовой диапазон, исходя из физических законов, положенных в основу его работы.

Так, монитор не способен воспроизвести более насыщенный красный цвет, чем тот, который позволяет передать красный люминофор его экрана.

Воспроизводимый устройством цветовой диапазон называется цветовым охватом (*о чем говорилось ранее*). Цвета исходного цветового пространства, не воспроизводимые в целевом цветовом пространстве, называются *цветами вне доступной цветовой гаммы*. А поскольку эти цвета нельзя воспроизвести в целевом цветовом пространстве, их приходится заменять другими цветами, применяя комплексный подход с помощью целей цветопередачи.

Описание профиля по стандарту ICC содержит четыре разных метода интерпретации цветов вне доступной цветовой гаммы – так называемые *цели цветопередачи* (рис. 6.4).

Для *воспринимаемой* и *насыщенной* цветопередачи применяется сокращение цветовой гаммы, своего рода разбавление всех цветов из исходного цветового пространства таким образом, чтобы они вошли в целевую цветовую гамму.

Для *относительной* и *абсолютной колориметрической* цветопередачи применяется усечение цветовой гаммы, при котором все цвета вне доступной цветовой гаммы просто обрезаются до ближайшего воспроизводимого оттенка.

● **Воспринимаемая цветопередача** означает попытку сохранить внешний вид всех цветов путем их изменения в исходном цветовом пространстве таким образом, чтобы они вошли в целевое цветовое пространство, а главное – сохранить общее соотношение цветов.

Поскольку человеческое зрение намного более восприимчиво к соотношению цветов, чем к их абсолютным значениям, такой метод вполне пригоден для воспроизведения изображений, содержащих значительное количество цветов вне доступной цветовой гаммы.

● **Насыщенная цветопередача** означает попытку воспроизвести яркие цвета без особой точности путем преобразования насыщенных цветов из исходного цветового пространства в насыщенные цвета целевого цветового пространства.

Данный метод вполне пригоден для воспроизведения круговых диаграмм и другой деловой графики или карт с отметками высоты, где отличающимися по насыщенности зелеными, коричневыми или синими цветами обозначаются разные высоты местности на суше либо глубины водных пространств (рек, морей, океанов), однако он непригоден для точного воспроизведения цвета.

●**Относительная колориметрическая цветопередача** означает стремление учесть тот факт, что человеческое зрение всегда приспосабливается к белому цвету наблюдаемого носителя. При этом белый цвет из исходного цветового пространства преобразуется в белый цвет целевого цветового пространства, в результате чего получается белый цвет бумаги, а не исходного цветового пространства.

Так как при этом все цвета, входящие в доступную цветовую гамму, передаются довольно точно, а цвета вне этой гаммы обрезаются до ближайшего воспроизводимого оттенка, метод лучше подходит для воспроизведения изображений, чем воспринимаемая цветопередача, и позволяет сохранить больше исходных цветов.

●**Абсолютная колориметрическая цветопередача** отличается от относительной тем, что в процессе ее белый цвет исходного цветового пространства не преобразуется в белый цвет целевого цветового пространства. Для имитации исходного белого цвета (преобразования голубовато-белого исходного цвета в желтовато-белый целевой цвет бумаги) к голубому красителю подмешивают белые оттенки.

Метод пригоден, в основном, для получения пробных отпечатков (цветопроб), назначение которых состоит в имитации результатов печати (включая белую точку) одного печатающего устройства на другом.

Каждому виду цветопередачи сопутствует графическое представление плоскости ***a*** ***B*** цветового пространства LAB, где зеленым обозначены исходные цвета, а красным – их преобразованные эквиваленты. Оттенки серого здесь не показаны, поскольку они изменяются только по оси светлоты (третьего измерения цветового пространства LAB,

отсутствующего на плоскости **а Б)** Следует обратить особое внимание (рис. 6.4) на отличия в насыщенных оттенках красного, полученных методами воспринимаемой и относительной колориметрической цветопередачи, а также на смещение оттенков красного при насыщенной цветопередаче.



Воспринимаемая цветопередача

При воспринимаемой цветопередаче исходная цветовая гамма сокращается до целевой таким образом, чтобы было сохранено общее соотношение цветов

(А) Цвета вне доступной цветовой гаммы



Насыщенная цветопередача

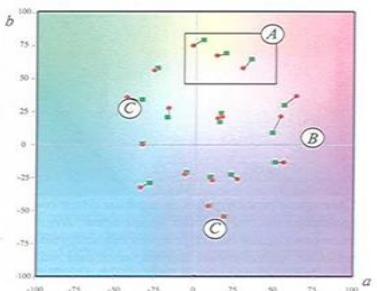
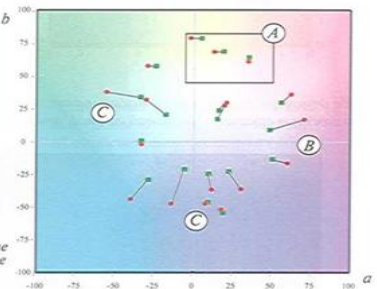
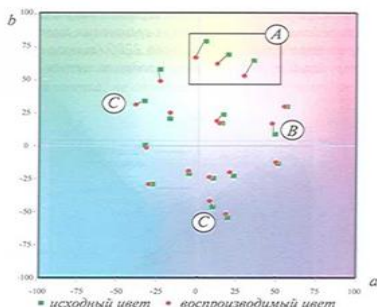
При насыщенной цветопередаче полностью насыщенные исходные цвета преобразуются в столь же насыщенные целевые цвета без особой точности их передачи



Абсолютная колориметрическая цветопередача

При абсолютной колориметрической цветопередаче предпринимается попытка как можно точнее воспроизвести все исходные цвета, включая и белый

(Б) Цвета, в основном, входящие в доступную цветовую гамму, но по-разному интерпретируемые каждой из целей цветопередачи



(С) Цвета, разбавляемые при воспринимаемой цветопередаче, но не при колориметрических видах цветопередачи

Рис. 6.4. Цели цветопередачи

Кстати говоря, шкала Mack Beth Color Picker (рис. 6.4), преобразованная с помощью всех четырех целей цветопередачи в целевой профиль СМΥК, была использована для создания иллюстраций к настоящей книге.

В большинстве случаев отличия между воспринимаемой, насыщенной и относительной колориметрической цветопередачей едва заметны. В то же время абсолютная колориметрическая цветопередача дает совершенно другие результаты, поскольку в данном методе не выполняется приведение к целевой белой точке, а, следовательно, этот метод интерпретации цвета применяется только для получения пробных отпечатков.

При использовании системы управления цветом для преобразования данных из одного цветового пространства в другое этой системе необходимо предоставить исходный и целевой профили, чтобы были известны источник и место назначения преобразуемых цветов. В большинстве случаев указывается также конкретная цель цветопередачи, т.е. метод интерпретации цвета.

Если в приложении отсутствует возможность указать метод интерпретации цвета, выбирается стандартная для этого профиля цель цветопередачи, которая задается приложением, формирующим данный профиль и, как правило, является целью воспринимаемой цветопередачи.

Управление цветом в действии. Как упоминалось выше, система управления цветом выполняет лишь две следующие функции:

1. Наделение числовых значений RGB или СМΥК конкретным значением цвета.
2. Изменение числовых значений RGB или СМΥК-цвета при переходе с одного устройства на другое для сохранения постоянства цвета.

Первая функция заключается в назначении или встраивании в документ исходного профиля, а вторая — в преобразовании присвоенного или встроенного исходного профиля в выбранный целевой профиль.



Назначение и встраивание профилей. Во многих приложениях с управлением цветом имеется возможность назначать для изображений или других цветных объектов конкретный профиль. Например, в Photoshop такой профиль назначается для изображения. Таким образом, числовые значения RGB или CMYK получают определенное значение цвета в конкретном изображении с помощью назначенного для него профиля, в котором описан источник этого изображения (в частности, сканер или цифровая камера). В сверстанном документе для каждого типа изображений, представленных в виде иллюстрации, может быть назначен отдельный профиль. В частности, одни изображения могут быть сканированы, а другие – сняты цифровой камерой. В этом случае профиль сканера назначается для сканированных изображений, а профиль цифровой камеры – для снятых с ее помощью изображений, чтобы системе управления цветом было известно, какие именно цвета обозначаются числовыми значениями RGB-сканера и цифровой камеры.

Рис. 6.5. Встраивание профиля

Кроме того, во многих приложениях с управлением цветом есть возможность встраивать профили в документы при их сохранении (например, в файлы изображений или сверстанных страниц документа).

Это позволяет переносить документы между приложениями или компьютерными системами без потери значения цвета, определенного для числовых значений RGB или CMYK, использующихся в документе.

Следует, однако, иметь в виду, что назначение (или встраивание) профиля в документ не приводит к изменению числовых значений RGB или CMYK, а лишь дает их конкретную интерпретацию. Так, в результате встраивания в документ RGB-профиль сканера Imacon система управления цветом получит указание на то, что числовые значения RGB в документе обозначают цвет, зафиксированный данным сканером при регистрации этих значений.

Некоторые считают не совсем естественным тот факт, что при назначении другого профиля, в частности, рабочего пространства Adobe RGB (1998) меняются не числовые значения RGB, а внешний вид изображения. Но ведь это происходит потому, что изменяется значение цветов, обозначенных числовыми значениями RGB.

Назначение или встраивание профиля является необходимым этапом перед преобразованием цвета для вывода результата на другое устройство. Это может быть сделано автоматически программным обеспечением сканера или камеры, явным образом пользователем или косвенно – приложением с управлением цветом.

Большинство таких приложений позволяют указывать стандартные профили RGB и CMYK, автоматически назначаемые для тех цветных элементов документа, у которых отсутствует встроенный профиль. Назначенный или встроенный таким образом профиль используется в качестве исходного при преобразовании, выполняющемся по указанию пользователя в системе управления цветом.

6.4. Преобразование изображения с помощью профилей

Для преобразования изображения из цветового пространства одного профиля в цветовое пространство другого профиля (что фактически означает изменение значений RGB

или CMYK) необходимо указать два профиля: исходный и целевой.

Исходный профиль указывает системе управления цветом источник числовых значений цветов, использующихся в документе, и на этом основании она может установить, какие именно цвета они обозначают.

Целевой профиль указывает системе управления цветом место назначения документа, чтобы она могла установить новый ряд числовых значений RGB или CMYK, необходимых для обозначения тех же самых цветов в целевом устройстве.

В процессе преобразования с помощью профилей (рис. 6.6) системе управления цветом следует всегда предоставлять исходный профиль (ввода) и целевой профиль (вывода). Если изображение получено с помощью цифровой камеры Nikon D1, требуется не просто профиль любого изображения RGB, а профиль изображения RGB, снятого данной камерой. Этот профиль должен быть указан системе управления цветом в качестве исходного, поскольку он описывает источник числовых значений, которые обозначают конкретные воспринимаемые цвета.

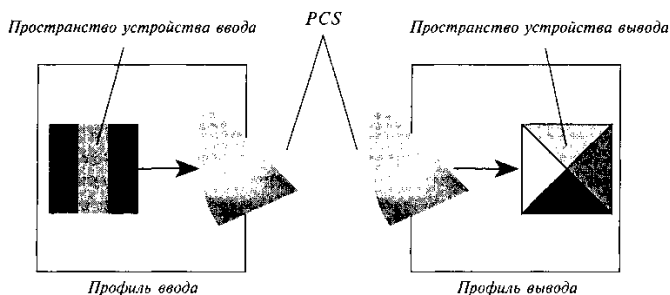


Рис. 6.6. Пространство устройства ввода и вывода

Если полученное изображение требуется преобразовать в цветное пространство CMYK для размещения в печатном документе, но не любом, а, например, в статье конкретного журнала, для правильного воспроизведения цветов системе управления цветом необходимо указать в качестве целевого

профиль печатной машины, на которой печатается это периодическое издание.

Таким образом, в распоряжении системы управления цветом оказывается вся необходимая информация об исходных числовых значениях RGB воспринимаемых цветов изображения и их целевых значениях СМΥΚ, которые следует передать на печатную машину для воспроизведения этих цветов. Преобразование цвета из цветового пространства одного профиля в цветовое пространство другого не изменяет внешний вид цвета. Именно сохранение внешнего вида – основная цель подобного преобразования.

Польза от преобразования цвета станет более очевидной, если рассмотреть причины, по которым применяются обычные методы цветовой коррекции.

Если после печати изображения на струйном принтере оказывается, что оно получается в целом слишком зеленым, баланс серого в четверть тонах смещен в сторону желтого, а на темных участках слишком много голубого и желтого, такое изображение обычно подвергается цветовой коррекции с помощью соответствующих кривых, изменения оттенка и насыщенности, замены цвета и любых других доступных средств до того момента, пока изображение приобретет желательный вид.

В результате изменения числовых значений цвета удастся получить требуемый его вид. Хотя при преобразовании с помощью профилей цвет автоматически подбирается для конкретных устройств.

Управление цветом состоит не в том, чтобы сделать из плохого изображения хорошее, а в том, чтобы правдоподобно отобразить все достоинства и недостатки цветного оригинала. Поэтому управление цветом отнюдь не исключает цветовую коррекцию. Напротив, оно обеспечивает верную передачу результатов цветовой коррекции изображения на устройство вывода.

Выполнение преобразования. Перед преобразованием необходимо выбрать четыре следующих его составляющих:

1. Исходный профиль – может быть уже встроен в документ, применен пользователем или предоставлен по

умолчанию в операционной системе или приложении.

2. Целевой профиль – может быть выбран по умолчанию в операционной системе или приложении либо указан пользователем во время преобразования (в частности, профиль принтера выбирается во время печати на нем).

3. Модуль СММ – может быть выбран автоматически в качестве наиболее предпочтительного модуля для целевого профиля, указан пользователем во время преобразования или предоставлен по умолчанию в операционной системе или приложении.

4. Цель цветопередачи – может быть указана пользователем во время преобразования либо предоставлена по умолчанию в операционной системе или приложении. Если не указано иное, в целевом профиле используется стандартная цель цветопередачи.

Затем система управления цветом в течение ряда этапов (рис. 6.7) выполняет преобразование. В процессе ее реализации система управления цветом выполняет несколько преобразований в течение одной операции. Например, в Photo shop есть возможность получить на струйном принтере пробный отпечаток, имитирующий печать изображения из пространства правки RGB. Но, если этот процесс разделяется на несколько операций, то преобразование из цветового пространства одного профиля в другое происходит поэтапно, причем с разными целями цветопередачи на каждом этапе.

Преобразования и потеря данных. Казалось бы, цвет достаточно преобразовать при необходимости из цветового пространства одного устройства в цветовое пространство другого. К сожалению, это не совсем так.

Если приходится иметь дело с типичными файлами по 8 битов на каждый канал цвета, содержащий 256 возможных уровней, то при очередном преобразовании файла некоторые уровни теряются вследствие **ошибки округления**. Такие ошибки возникают во время преобразования целых значений из разных шкал.

Так, например, 55 и 56° (по Фаренгейту) в результате округления до целого числа преобразуются в те же 13° Цельсия.

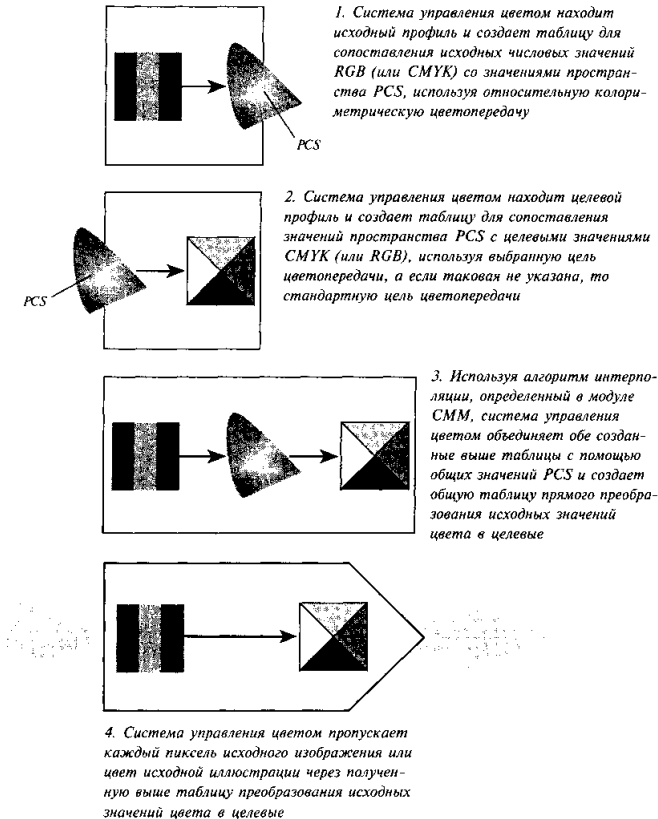


Рис. 6.7. Этапы преобразований в системе управления цветом

Аналогичные ошибки возникают и во время преобразования 8-разрядных каналов RGB или CMYK в значения PCS.

На практике это означает, что буквально любая правка файлов, состоящих из 8-разрядных каналов, приводит к потере некоторых уровней, и следует иметь в виду, что при организации процессов управления цветом преобразование цвета может выполняться неоднократно.

7. ПОНЯТИЕ О ПРОФИЛЕ УСТРОЙСТВ

Профиль – это файл, который связывает значения цвета, воспроизводимого устройством, с соответствующими аппаратно-независимыми значениями цвета, обозначающими цвет, воспринимаемый человеком. Значения цвета выражаются в виде управляющих сигналов (обычно – RGB или CMYK), посылаемых на устройства для воспроизведения на них того или иного цвета. Соответствующие аппаратно-независимые значения, обозначающие воспроизводимый цвет, выражаются в пространстве привязки профилей (PCS): CIEXYZ или CIELAB.

Профиль устройства содержит информацию о трех параметрах, описывающих режим работы устройства:

1. Цветовая гамма – цвет и яркость красителей (основных цветов).
2. Динамический диапазон – цвет и яркость белой и черной точек.
3. Характеристики тоновоспроизведения красителей.

7.1. Классы профилей устройств

Профили подразделяются на ряд разновидностей, или классов, а именно: 1) профили ввода; 2) описывающие сканеры; 3) цифровые камеры; 4) профили отображения; 5) описывающие мониторы на ЭЛТ и ЖКИ; 6) профили вывода; 7) описывающие принтеры; 8) печатные машины.

Все профили различаются по признаку одностороннего или двухстороннего действия, т.е. по той возможности, которую они предоставляют системе управления цветом для преобразования из цветового пространства одного устройства в пространство PCS, а из него – в цветовое пространство другого устройства.

Так, профили ввода должны определять лишь порядок преобразования из цветового пространства устройства ввода в пространство PCS, и поэтому носят односторонний характер. Ведь наблюдать или выводить цвет на сканер либо цифровую камеру не представляется возможным, поэтому нет никакой

необходимости и в преобразовании цвета в цветовое пространство сканера или цифровой камеры. Профили ввода просто указывают системе управления цветом, как человек воспринимает цвет, фиксируемый сканером или цифровой камерой.

Что касается профилей отображения. Данные профили, безусловно, должны быть двусторонними, поскольку устройство отображения выполняет функции как устройства ввода, так и устройства вывода (рис. 7.1). Если цвет создается или редактируется на основании его вида на мониторе, в этом случае монитор используется в качестве устройства ввода, а для системы управления цветом необходимы лишь четкие данные, какой именно цвет наблюдается на экране монитора, чтобы воспроизвести его на принтере, в печатной машине или другом устройстве вывода.

При этом система управления цветом находит числовые значения RGB-цвета, отображенного на мониторе, и использует профиль для расчета конкретного цвета, обозначенного ими.

Когда изображение выводится на экран монитора, последний служит в качестве устройства вывода. В то же время система управления цветом оценивает сначала встроенный профиль изображения для определения конкретных цветов, обозначенных числовыми значениями в файле изображения, а затем использует профиль монитора для расчета числовых значений RGB, которые требуются для точного отображения цветов на экране монитора.

Профили вывода всегда носят двусторонний характер. Они используются не только для преобразования из пространства PCS в цветовое пространство вывода на печать, но и для отображения файлов изображений, уже преобразованных в пространство вывода на монитор, а также для преобразования изображения CMYK, предназначенного для вывода на печатную машину, в цветовое пространство вывода на какое-либо другое устройство для цветопробы.

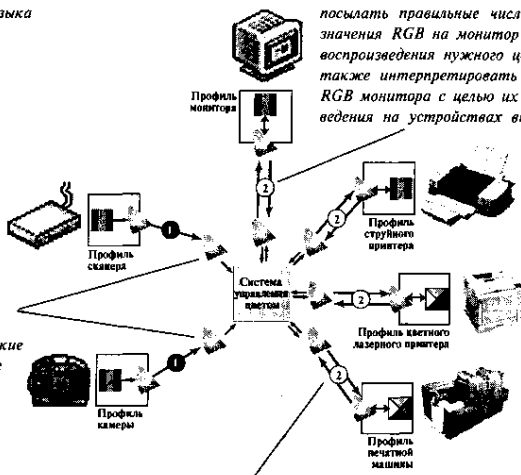
Для вывода изображения CMYK на RGB-монитор система управления цветом опирается на профиль вывода CMYK, в котором указано, каким образом следует выполнять обратное

преобразование числовых значений CMYK в значения PCS, а в конечном, итоге в числовые значения RGB-монитора.

Профили позволяют системе управления цветом переносить числовые значения RGB и CMYK с одних устройств на другие, используя пространство PCS в качестве универсального переводного языка

Связь между системой управления цветом и профилями отображения носит двухсторонний характер, чтобы данная система могла посылать правильные числовые значения RGB на монитор для воспроизведения нужного цвета, а также интерпретировать значения RGB монитора с целью их воспроизведения на устройствах вывода

Связь между системой управления цветом и профилями ввода носит односторонний характер, поскольку данной системе необходимо лишь знать, какие цвета обозначают входные числовые значения RGB



Связь между системой управления цветом и устройствами вывода также должна быть двухсторонней, чтобы данная система могла преобразовывать выходные числовые значения CMYK или RGB в значения RGB монитора для получения пробного изображения, а также одни выходные числовые значения в другие, например, для воспроизведения красок CMYK печатной машины на RGB струйном принтере

Рис. 7.1. Односторонние и двусторонние профили

Преобразование из цветового пространства устройства ввода в пространство PCS называется *обратным преобразованием*, а соответствующие таблицы – *таблицами преобразования* – АВ (рис. 7.2); преобразование из пространства PCS в цветовое пространство устройства вывода называется *прямым преобразованием*, а соответствующие таблицы – *таблицами преобразования* – ВА.

Измерения производятся прибором, фиксирующим значения PCS (XYZ или LAB). После этого формируется профиль, в котором значениям RGB ставятся в соответствие со значениями PCS. Итак, профиль может указать системе управления цветом, какой именно цвет дают заданные значения RGB. Кроме того, (рис. 7.3) профиль может указать модулю CMM, какие значения RGB требуются для отображения конкретного цвета.

Матричные и табличные профили ICC. Оба типа профилей содержат белую точку устройства, однако отличаются способом обозначения свойств тоновоспроизведения этого устройства. Именно поэтому одни профили могут быть размером более мегабайта, а другие – достаточно компактными, одни профили дают сходные результаты независимо от выбранной цели цветопередачи, а другие – совершенно разные результаты в зависимости от указанной цели цветопередачи.

Простейший способ хранения результатов преобразования из одного трехканального пространства в другое (в частности, из RGB в XYZ) состоит в применении математической (матричной) модели, носящей название «матрица 3×3 ». Такая матрица представляет собой массив из девяти чисел, позволяющий преобразовать одну тройку чисел (предположим, 20, 30, 40), в другую (например, 1,83, 2,0, 3,67).

В профилях ICC матрица 3×3 состоит из значений XYZ для каждого из трех красителей (основных цветов) устройства. Кроме того, профили содержат одно или несколько чисел, определяющих кривую тоновоспроизведения для каждого красителя.

Числовые значения цвета, воспроизводимого устройством, уточняются по кривой тоновоспроизведения перед преобразованием с помощью матрицы 3×3 . В матричных профилях в качестве пространства привязки профилей всегда используется пространство CIEXYZ.

Другой способ хранения результатов преобразования состоит в применении справочной таблицы чисел (табличных профилей), в которой любому входному значению соответствует некоторое выходное значение. Программа профилирования определяет количество элементов справочной

таблицы (точек выборки), причем производителям табличных профилей постоянно приходится делать выбор между количеством точек выборки с целью повышения точности преобразования и уменьшением размера профиля для увеличения скорости преобразования. Подчеркнем, что в табличных профилях в качестве пространства их привязки всегда используется пространство CIELAB.

Матрицы 3×3 — намного меньше справочных таблиц, поскольку они неизменно содержат всего девять чисел, составляющих матрицу, тогда как размер справочной таблицы зависит от количества хранящихся в ней точек выборки, которых может быть сотни или даже тысячи.

Матрицы обращаемы, т.е. допускают прямое и обратное преобразование чисел, однако пригодны лишь для устройств с достаточно простыми кривыми тоновоспроизведения, в том числе для сканеров и простых мониторов на ЭЛТ. А для таких сложных устройств, как принтеры, информации, содержащейся в матрицах, недостаточно.

Матричные профили содержат информацию только для одного способа цветопередачи (как правило, относительного колориметрического), даже если пользовательский интерфейс приложения, в котором выполняется преобразование, позволяет выбрать воспринимаемую или насыщенную цветопередачу. Тем не менее, матричные профили поддерживают помимо относительной колориметрической цветопередачи абсолютную, не требующую дополнительных таблиц, поскольку определяется по относительной колориметрической цветопередаче с помощью значения белой точки.

Справочные таблицы позволяют описывать довольно сложные устройства, для чего в них достаточно ввести больше точек выборки. Преимущество справочных таблиц состоит также в том, что их применение не ограничивается трехканальными устройствами. Они способны не менее точно описывать и четырехканальные устройства, такие как СМΥК-принтеры или даже принтеры с еще большим количеством красителей.

Однако при вводе дополнительных точек выборки справочные таблицы получаются довольно крупными,

а поскольку они обеспечивают преобразование лишь в одном направлении, для каждого преобразования требуется отдельная таблица.

Профили ввода и отображения могут быть, как уже говорилось, матричными или табличными. У разных производителей они существенно отличаются по размеру. Профили отображения всегда носят двусторонний характер. Этим свойством характеризуются и некоторые профили ввода, хотя преобразование цвета в цветовое пространство сканера или цифровой камеры кажется не вполне целесообразным.

Самыми крупными получаются профили вывода. Типичный профиль вывода содержит шесть справочных таблиц. Они должны быть табличными, причем для прямого и обратного преобразования, в соответствии с каждой из трех целей цветопередачи – воспринимаемая, относительная колориметрическая, насыщенная.

Что же касается таких устройств вывода, как принтер, то формирователь профиля сначала посылает на принтер известные значения RGB или CMYK, а затем измеряет напечатанный результат. И в этом случае формируется профиль, в котором возбуждающее воздействие сопоставляется с ответной реакцией, чтобы указать системе управления цветом, какой именно цвет дают конкретные значения RGB или CMYK и какие значения RGB или CMYK требуются для получения требуемого цвета (рис. 7.3).

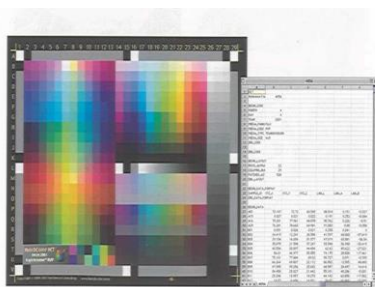
Для таких устройств ввода, как сканер, для него описанный выше процесс отличается лишь тем, что измерения обычно уже проведены заранее. В качестве возбуждающего воздействия в данном случае служит шкала сканирования, входящая в состав инструментального средства профилирования или предоставленная независимым производителем.

Шкале сканирования всегда сопутствует файл данных, в котором записаны значения LAB или XYZ цветовых полей данной шкалы.

Результаты сканирования шкалы обычно вводятся в программу профилирования сканера в виде файла наряду с файлом данных этой шкалы. Программа профилирования сравнивает сканированные значения RGB со значениями LAB или XYZ в файле данных шкалы (рис. 7.3) и формирует

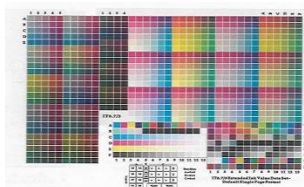
профиль, указывающий системе управления цветом, каким образом сканер воспринимает цвет.

а



Эта отличная шкала калибровки ИСТ Дато Личинсона производится в небольшом количестве, а затем используется в производных инструментах для получения соответствующего ей эталонного файла данных

б



Шкала IT8.7/3 представляет собой стандартную шкалу для профилирования СМУК устройств вывода. Она состоит из полей, содержащих 0%, 19%, 38%, 60%, 76% и 100% основной краски во всех возможных сочетаниях, плюс 13-ступенчатые линейно-экспоненцические выходы каждой краски. Кроме того, в столбцах K и L этой шкалы находится близкий к нейтрально-серому ряд с более мелким шагом изменения цвета. Данная шкала используется в инструментальных средствах профилирования для моделирования всех цветов, которые могут быть воспроизведены СМУК устройств вывода

Рис. 7.3. Шкалы профилирования:
а – шкала IT8.7/3; б – шкала сканирования НСТ

Ограничения на профилирование. Приведенному выше процессу формирования профилей присущи три ограничения, которые следует иметь в виду.

Первое: формирователь профиля не в состоянии охватить весь спектр сигналов для отправления профилируемое устройство. Например, формирователь профиля принтера не может послать все возможные комбинации значений СМУК с приращением в 1% для измерения полученных результатов, поскольку для этого потребовалась бы шкала со 100 млн полей! Даже при наличии оборудования (и терпения) для измерения всех этих полей, для хранения такого количества точек выборки в справочной таблице потребовались бы профили вывода размером в несколько гигабайт.

В связи с этим неизбежно возникает потребность в интерполяции, как во время формирования профиля, так и при его использовании в системе управления цветом. (Отсюда более понятны функции модуля СММ и причины, по которым преобразование одних цветов происходит медленнее, чем других). Многие полагают, что при наличии достаточно большой справочной таблицы модуль СММ оказался бы ненужным, поскольку не потребовалась бы интерполяция, или,

по крайней мере, все модули СММ позволяли бы формировать одинаковые профили. И хотя теоретически это возможно, на практике интерполяции не избежать. Именно поэтому некоторые производители пытаются найти более совершенные алгоритмы интерполяции для модулей СММ.

Второе: профили не могут заставить устройства делать то, на что они неспособны. Например, если принтер не в состоянии воспроизвести определенный оттенок красного, профиль здесь ничем не поможет, поскольку он описывает только цветовую гамму устройства, но не расширяет ее.

Третье: профиль представляет собой лишь моментальный снимок режима работы устройства во время измерений. Точность профиля определяется точностью измерений, на основании которых он формируется. Режим работы большинства цветных устройств со временем меняется, поэтому перед профилированием устройства необходимо принять меры к тому, чтобы оно работало в нужном режиме. В противном случае профиль не будет содержать точного описания режима работы устройства, а, значит, воспроизвести на нем нужный цвет не удастся.

Применение исходного и целевого профилей. Сам профиль, даже если он встроен в файл, вступает в действие лишь при преобразовании цвета одного устройства в цвет другого. В этот момент системе управления цветом, выполняющей подобное преобразование, необходимо знать источник цвета и место его назначения, а для этого требуются два профиля: исходный и целевой.

В процессе преобразования цвета профиль, из которого выбираются для этого исходные данные, называется исходным, а профиль, в котором сохраняются результаты преобразования, – целевым.

Исходные и целевые профили не делятся на типы или классы, поскольку они играют лишь временную роль, когда система управления цветом использует их для преобразования цветового пространства одного устройства в цветовое пространство другого.

В качестве исходных профилей практически всегда используются только профили ввода, поскольку больший смысл имеет преобразование цвета *из цветового пространства сканера или цифровой камеры, чем в их цветовое пространство*. А вот профили отображения и вывода вполне могут исполнять роль как исходных, так и целевых.

Например, если с помощью RGB-сканера получено изображение, которое требуется вывести на печатную машину, его цвет преобразуется с помощью профиля данного RGB-сканера в качестве исходного, а профиль CMYK печатной машины – в качестве целевого. Но, если бы потребовался пробный отпечаток преобразованного изображения CMYK на RGB-струйном принтере, пришлось бы выполнить другое преобразование, используя профиль CMYK печатной машины в качестве исходного, а профиль RGB струйного принтера – в качестве целевого.

Общие профили. Практически любое цветное устройство поставляется вместе с одним или более общими профилями ICC, сформированными производителем этого устройства и описывающими его модель, а не конкретный режим работы. Некоторые ярые сторонники управления цветом считают, что такие профили бесполезны. В самом деле, полностью полагаться на общие профили нецелесообразно, поскольку они получены не в результате измерения конкретных режимов работы отдельных устройств, а на основании абстрактных моделей этих устройств. Следовательно, общие профили способны лишь усложнить процесс управления цветом, тем не менее, некоторые из них приносят определенную пользу.

В частности, полезными оказываются профили стабильных устройств, отдельные изготовленные экземпляры или партии которых мало чем отличаются друг от друга. К этому классу относятся профили струйных принтеров. Специальный профиль такого устройства позволяет лишь незначительно улучшить результат по сравнению с общим профилем, и поэтому последний весьма полезен. Общие профили продуктивны также для обозначения таких стандартных условий, как SWOP (Specifications for Web Offset Publications – требования

к рулонной офсетной печати), определяющих режим работы печатной машины или типичных систем цветопробы.

Для нестабильных устройств, отдельно изготовленные экземпляры или партии которых существенно отличаются друг от друга, общие профили бесполезны. Так, характеристики тех или иных экземпляров трубок мониторов на ЭЛТ значительно отличаются не только после изготовления, но и в процессе эксплуатации, причем у них есть органы управления, позволяющие коренным образом изменить режим их работы, что превращает общие профили мониторов в элемент потенциальной вредоносной опасности для процесса работы.

Профили цветового пространства. До сих пор в этой главе речь шла о профилях устройств, т.е. о тех, которые описывают режимы работы конкретных физических устройств или их классов. Однако существуют также профили, описывающие аппаратно-независимые цветовые пространства (в частности, CIELAB или CIEXYZ). Вполне логично, что они называются профилями цветового пространства.

За последние годы получили также широкое распространение аппаратно-независимые профили RGB. Формально они не являются профилями цветового пространства в соответствии с описанием по стандарту ICC, поскольку формируются аналогично профилям устройств и таковыми их воспринимает система управления цветом. Но на практике аппаратно-независимые профили RGB скорее выполняют функции профилей цветового пространства, чем устройств. И вот что важно: поскольку такие профили не представляют конкретные устройства, они не подвержены непостоянству и всегда точны. Далее речь пойдет о приемлемой точности полученных профилей и методах, позволяющих убедиться в том, что эти профили дают наилучшие результаты, а устройства продолжают работать так, как описано в их профилях.

Способы профилирования монитора. В памяти многих современных LCD-мониторов уже записан их фабричный профиль. К нему можно получить доступ, если подключение выполнено по цифровому интерфейсу. Фактически на современном этапе настройка монитора для нужд допечатной

подготовки сравнительно проста. В операционной системе для этого есть специальное меню: в MacOS X – System Preferences/Displays; в Windows придется пользоваться специальным пультом Adobe Gamma.

Важно понимать, что в конкретном профиле монитора уже содержатся такие характеристики, как цветовая температура или гамма, и специально настраивать их не нужно.

Специалисты по допечатной подготовке, начавшие работать с компьютерами достаточно давно, помнят те времена, когда никаких профилей еще не было, и иногда после установки профиля (по привычке) регулируют два параметра.

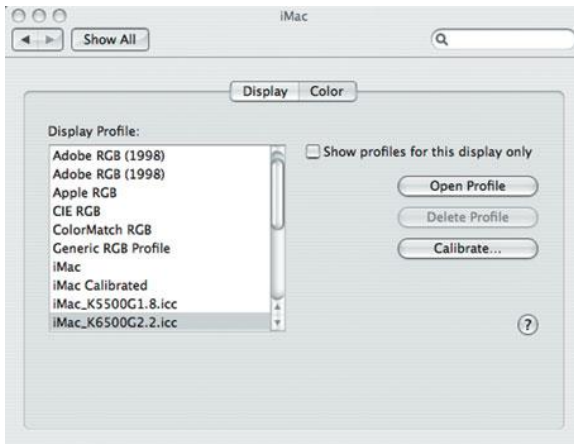


Рис.7.4. Окно операционной системы MacOS X, в котором устанавливается текущий системный ICC-профиль монитора

В окне программы ADOBE GAMMA для WINDOWS XP одновременно можно установить (рис. 7.5) профиль монитора и провести регулировку и настройку.

Зачастую наличие одновременно двух возможностей сбивает с толку. Даже установив правильный профиль монитора, пользователи продолжают регулировку других имеющихся в этом окне параметров, лишь ухудшая цветопередачу.

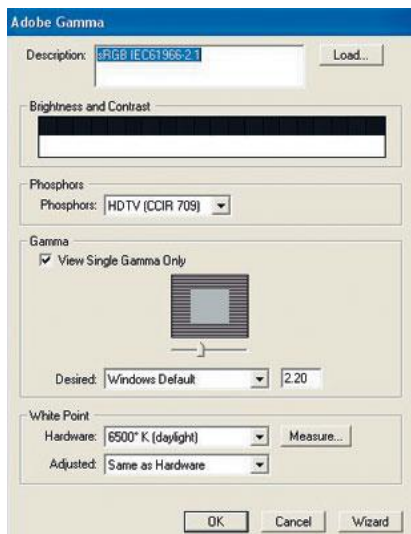


Рис 7.5. Окно программы ADOBE GAMMA для WINDOWS XP

В этом смысле программа настройки экрана в MacOS X практичнее, поскольку в ней регулировка и установка текущего профиля разнесены, и прежде чем разрешить регулировку, пользователя спросят, действительно ли он собирается что-то менять.

8. КАЛИБРОВКА И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА

Операция изменения режима работы устройства для достижения некоторого требуемого состояния называется калибровкой. Она выполняется по многим причинам, но что касается управления цветом, здесь главная причина калибровки заключается в том, чтобы добиться устойчивой работы устройства, а, значит, сохранить точность профиля этого устройства.

Профилирование (нередко называемое *снятием характеристик*) – процесс регистрации режима работы устройства в профиле – означает не изменение режима работы устройства, но лишь регистрацию способа воспроизведения цвета конкретным устройством, а также тех цветов, которые оно способно (или не способно) воспроизвести.

Калибровка подобна точной настройке телевизора. Она изменяет режим работы устройства (в данном случае настройку на определенные каналы, яркость, насыщенность и контрастность изображения)».

Профилирование аналогично составлению перечня технических характеристик телевизора, включая количество принимаемых каналов, чувствительность, систему кодирования цветовых сигналов и прочее. Таким же образом устройство профилируется для управления цветом (т.е. снимаются его характеристики) как с предварительной калибровкой, так и без таковой.

Если калибровка фактически изменяет режим работы устройства, то профилирование просто описывает этот режим на момент формирования профиля этого устройства.

В идеальном случае для контроля процесса достаточно одной лишь калибровки. Ведь намного проще откалибровать неустойчиво работающее устройство, чтобы обеспечить режим его работы в соответствии с профилем данного устройства.

Однако порой некоторую неустойчивость работы устройства приходится принимать как неизбежность. В подобных случаях контроль процесса требует более частого

профилирования этого устройства или формирования профиля на основании *усредненного* режима его работы.

Калибровка устройств. Как говорилось выше, калибровка означает настройку режима работы устройства таким образом, чтобы его ответная реакция на возбуждающие воздействия была вполне узнаваемой. Иными словами, устройство должно воспроизводить один и тот же цвет в ответ на посылаемые ему числовые значения этого цвета.

Однако устройства обычно не калибруются по старым состояниям. В действительности, калибровка может служить трем возможным целям, перечисленным ниже в порядке их важности для управления цветом.

Устойчивость. Профилирование может оказаться намного более успешным, если профилируемое устройство работает устойчиво, т.е. одни и те же возбуждающие воздействия всегда вызывают одинаковую ответную реакцию, в частности, одни и те же числовые значения RGB и CMYK постоянно приводят к воспроизведению устройством того же самого цвета.

Если со временем наблюдаются изменения в ответной реакции устройства, его профиль постепенно становится менее точным, а цвета все больше и больше отклоняются от нормы. Для сохранения верности воспроизведения цвета устройство необходимо калибровать достаточно часто, чтобы вернуть его в нужное состояние. В случае, когда устройство не предусматривает пользовательскую калибровку, придется постоянно контролировать изменения в режиме его работы, чтобы определить момент, когда именно потребуется перепрофилирование.

Оптимизация (линеаризация). Как только устройство начнет работать устойчиво, следующая цель состоит в достижении оптимального режима его работы. Под этим подразумевается максимальное использование динамического диапазона и цветовой гаммы устройства при сохранении плавности и предсказуемости градаций яркости.

Имитация. По достижении устойчивого и оптимального режима работы устройства следующий шаг направлен на имитацию другого устройства. Например, яркость белого цвета,

воспроизводимого монитором, можно откорректировать в соответствии с яркостью белой бумаги на просмотрном столе с подсветкой или настроить кривые передачи отдельных красок в устройстве цветопробы таким образом, чтобы симитировать конкретный тип печатной машины. Если нечто подобное окажется возможным без нарушения режима работы устройства, это позволит уменьшить нагрузку на систему управления цветом.

Приведенные выше цели иногда противоречат друг другу. В частности, увеличив плотность красок, можно настроить печатную машину на получение более насыщенных оттенков черного, но при этом данное устройство будет работать менее устойчиво. В таком случае лучше предпочесть устойчивость расширению динамического диапазона устройства.

Техника калибровки устройств отображения.

В процессе калибровки устройства отображения нужно несколько раз настраивать с помощью программы калибровки следующие параметры:

- уровень яркости белого цвета монитора, которая выражается в канделах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$);
- цветовую температуру белой точки монитора, которая выражается в кельвинах;
- кривую коррекции градаций яркости (гамма-коррекция) системы отображения; которая определяет значение коэффициента контрастности;
- уровень яркости черного цвета монитора, который выражается в канделах на метр квадратный ($\text{кд}/\text{м}^2$).

Параметры настройки. Порядок настройки этих параметров определяется возможностями конкретного монитора. Существуют два способа изменения режима работы устройства отображения: с помощью органов управления самого монитора или коррекции сигналов, посылаемых на монитор и формируемых из значений, настраиваемых по справочной таблице в видеоплате.

Более предпочтительной считается настройка самого монитора, поскольку коррекция цвета по справочной таблице видеоплаты аналогична настройке 8-разрядного канала

изображения, в результате которой из 256 начальных уровней в итоге остается меньшее их количество.

Тем не менее, коэффициент контрастности системы отображения корректируется только по справочной таблице видеоплаты. Поэтому такую неизбежную настройку целесообразно свести к минимуму, что, впрочем, зависит от возможностей органов управления конкретного типа монитора.

Главным элементом компьютерных мониторов по-прежнему остается электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). Электронный пучок представляет собой поток электронов, испускаемых из горловины закрытой стеклянной трубки в сторону ее дна (экрана).

Электроны формируются электронными пушками, испускающими электронные пучки на внутреннюю поверхность экрана трубки, покрытую люминофорами – химическими составами, излучающими при попадании на них электронов фотоны (свет) определенной длины волны.

В цветных мониторах применяются три люминофора, покрывающих внутреннюю поверхность экрана ЭЛТ: красный, зеленый и синий. Сигналы, посылаемые в виде напряжений из видеоплаты на монитор, управляют электронными пучками, которые испускают электронные пушки, а, следовательно, и количеством света, излучаемого люминофорами.

В последнее время большое распространение получили мониторы на ЖКИ (жидкокристаллических индикаторах). Жидкие кристаллы, давшие название этому типу мониторов, обладают особым свойством изменять свою форму в зависимости от величины приложенного к ним электрического напряжения.

Если такие кристаллы расположить между слоями поляризованного стекла или оргстекла, они будут выполнять функцию фильтров, модулирующих свет задней подсветки от флуоресцентной лампы, помещенной позади рассеивателя света. Она и дает весь свет, излучаемый монитором.

Органы управления мониторов на ЭЛТ. У каждого монитора на ЭЛТ имеются органы управления, регулирующие яркость и контрастность изображения (хотя на самом деле они

регулируют уровень яркости, соответственно, белого и черного цветов). Большинство мониторов допускают также установку цветовой температуры белой точки посредством выбора из ряда предварительно заданных значений.

Это происходит путем непрерывно изменяющегося регулирования или с помощью отдельных регуляторов усиления в каналах красного, зеленого и синего. Надо сказать, что лишь в некоторых высококачественных мониторах имеются дополнительные регуляторы смещения, устанавливающие уровень яркости черного отдельно для каналов красного, зеленого и синего.

Органы управления мониторов на ЖКИ. В силу принципа действия, положенного в основу работы мониторов на жидкокристаллических индикаторах, единственным органом их управления является регулятор яркости, фактически регулирующий яркость задней подсветки.

Некоторые мониторы на ЖКИ (особенно с аналоговыми, а не цифровыми интерфейсами) снабжаются элементами программного управления, имитирующими работу органов управления мониторов на ЭЛТ. Однако они осуществляют лишь коррекцию по справочной таблице видеоплаты, а не настройку режима работы самого монитора.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: мониторы на ЭЛТ допускают настройку уровня яркости белого, черного и цветовую температуру самого монитора, тогда как мониторы на ЖКИ – только настройку яркости белого. Это определяет выбор конкретных контрольных точек калибровки.

Инструментальные средства калибровки и профилирования делятся на четыре следующих типа: 1) средства, поставляемые вместе с мониторами; 2) автономные программно-аппаратные средства; 3) автономные программные средства; 4) средства, поддерживающие разные измерительные приборы.

Инструментальные средства калибровки, поставляемые вместе с мониторами. Калибраторы, как правило, поставляются вместе с мониторами на ЭЛТ. Эти инструментальные средства «интеллектуальны» в том смысле, что организуют двустороннюю связь между монитором и

компьютером, обеспечивая программную настройку внутренних органов управления монитора по результатам измерений соответствующим прибором.

В первоначальных моделях таких калибраторов обратная связь с компьютером осуществлялась по кабелю последовательного интерфейса, а теперь – по кабелю интерфейса USB. *(В последнем случае требуются два порта USB: один – для связи монитора с компьютером, а другой – для подключения измерительного прибора.)*

К подобным инструментальным средствам относятся, например, калибраторы серии Barco Reference Calibrator V, La Cie Electron /Blue Eye, Mitsubishi Spectra View и Sony Artisan Color Reference System. В менее дорогих калибраторах, как правило, используются серийные универсальные колориметры, которые могут работать с любым монитором на ЭЛТ.

В калибраторе Sony Artisan (рис. 8.1) используется колориметр со светофильтрами, специально предназначенными для люминофоров, которые применяются в мониторе Artisan. Поэтому данный калибратор вряд ли подойдет для калибровки других мониторов.

Что касается калибратора Barco Reference Calibrator V. То в нем фактически применяется монохромный измеритель яркости, а цветовая информация берется по результатам заводских измерений параметров люминофоров в каждом конкретном устройстве. Со временем изменяется не цвет люминофоров, а их способность излучать фотоны, поэтому такой метод дает весьма точные результаты калибровки и профилирования.

Основное преимущество приведенных выше систем калибровки, поставляемых вместе с мониторами, состоит в их удобстве. Они автоматически настраивают органы управления монитора, регулирующие яркость, контрастность, усиление и смещение для получения требуемой яркости и цветовой температуры, а также корректируют коэффициент контрастности по справочной таблице видеоплаты. Калибровка и профилирование с помощью этих инструментальных средств, как правило, осуществляются нажатием одной кнопки после присоединения измерительного прибора к экрану.

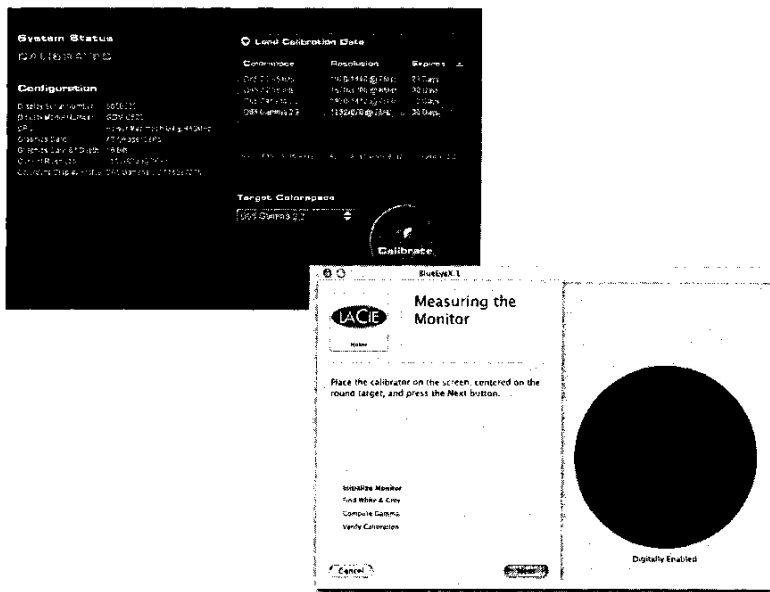


Рис. 8.1. Калибраторы Sony Artisan и LaCie Blue Eye

С появлением стандарта DDC2 (Display Data Channel – канал отображения данных), которому соответствует буквально каждый выпускаемый в настоящее время монитор на ЭЛТ, любой DDC2-совместимый монитор, снабженный соответствующим кабелем, может быть превращен в «интеллектуальный» монитор.

До сих пор единственным инструментальным средством калибровки, поддерживавшим стандарт DDC2, был калибратор Bas I CColor Display компании «Integrated Color Solution», хотя вскоре можно ожидать выпуска других аналогичных средств калибровки.

Автономные программно-аппаратные средства. По данным Брюс Фрэзер, Крис Мэрфи и Фред Бантинг – авторов книги «Управление цветом. Искусство допечатной подготовки» – разница между калибраторами Monitor Spyder компании «Color Vision» с программным пакетом Photo CAL (или пакетом

Opti CAL, обладающим более полным набором функций) и Eye One Monitor компании «Gretag Macbeth» заключается в следующем: во-первых, пакеты Photo CAL и OptiCAL работают с разными типами измерительных приборов, тогда как Eye One Monitor – только с прибором Eye One; и, во-вторых, в Monitor Spyder применяется колориметр, а в Eye One Monitor – эмиссионный спектрофотометр.

Привести здесь достаточно весомые аргументы в пользу применения колориметров или спектрофотометров для калибровки мониторов довольно трудно. На практике применение одного из этих типов измерительных приборов не дает никаких существенных преимуществ по сравнению с другим.

Единственное реальное преимущество автономных программно-аппаратных средств по сравнению с отдельно приобретаемыми измерительными приборами и программными пакетами заключается в комплексном характере их приобретения и послепродажного технического обслуживания.

Автономные программы и измерительные приборы.

Большинство программных пакетов калибровки мониторов не привязано к конкретному измерительному прибору и стремится поддерживать как можно более широкий спектр измерительных приборов.

Профилирование и калибровка монитора в данном случае выполняются достаточно просто. Основное отличие между автономными программными пакетами калибровки состоит в полноте списка поддерживаемых измерительных приборов, а также в условиях лицензирования этих пакетов.

Последнее обстоятельство не имеет особого значения, если калибруется лишь один монитор. Другое дело – калибровка всех имеющихся в организации мониторов. В этом случае плата за лицензию будет существенно отличаться.

Измерительные приборы. Если раньше такие приборы, применявшиеся для калибровки мониторов, крепились по центру экрана и напоминали хоккейную шайбу, то теперь они выпускаются самой разной формы (рис. 8.2).



Рис. 8.2. Измерительные приборы для калибровки мониторов

Подчеркнем, что для калибровки монитора на ЖКИ следует в обязательном порядке использовать измерительный прибор, специально предназначенный для данного типа мониторов. Присоски, с помощью которых прибор крепится к экрану монитора на ЭЛТ, могут испортить покрытие лицевой поверхности экрана, что приведет последний в полную негодность.

Одни измерительные приборы более чувствительны к внешнему свету, чем другие. Экран монитора может быть защищен от внешнего света специальным тубусом, чтобы этот свет не оказывал влияния на результаты измерений.

Калибровку мониторов на ЭЛТ, для получения надежных результатов измерений, рекомендуется в любом случае выполнять при очень слабом внешнем освещении, уделив особое внимание внешним условиям просмотра.

Выбор параметров калибровки. Всем калибраторам, как правило, требуются два целевых параметра: *белая точка и коэффициент контрастности*. Монитор следует калибровать по белой точке с цветовой температурой 6500 К и коэффициенту контрастности 2,2.

Обеспечение правильного воспроизведения цвета возложено на систему управления цветом, и в частности, на профиль принтера. Поэтому калибровать монитор именно по значению 2,2 коэффициента контрастности рекомендуется по одной простой причине: такой коэффициент контрастности, как показывает опыт, обеспечивает наиболее плавный переход

градаций яркости с едва заметной или вообще невидимой полосатостью либо огрублением изображения.

Целевая белая точка монитора играет важную роль в человеческом зрении, обладающем замечательной способностью приспосабливаться к разным внешним условиям просмотра белой точки. Глаз воспринимает все цвета относительно некоего эталона, каковым служит белый цвет. Монитор рекомендуется калибровать по цветовой температуре 6500 К.

Отсюда вопрос об оптимальных для зрения внешних условиях просмотра белой точки сразу сводится к рассмотрению двух позиций наиболее распространенных стандартных условий освещения источниками дневного света, а именно: D50 (с коррелированной цветовой температурой 5000 К) и D65 (с коррелированной цветовой температурой 6500 К).

Если внешние условия просмотра соответствуют стандарту D50, это может служить указанием для калибровки монитора по цветовой температуре 5000 К, чтобы обеспечить сходство внешних условий просмотра белой точки при выводе на монитор и печать. Но, как показывает опыт, практика не всегда соответствует теории.

Кроме того, большинство некалиброванных мониторов на ЭЛТ (особенно старые модели) при цветовой температуре близкой к 9300 К имеют заметный голубой оттенок. У современных, более качественных, мониторов цветковая температура белой точки ближе к 6500 К.

Так или иначе, но для установки цветовой температуры 5000 К белой точки приходится ограничивать действие канала синего, уменьшая общую яркость и динамический диапазон. Именно поэтому многие нередко называют изображение на экране монитора с цветовой температурой 5000 К тусклым, неярким и слишком желтым. Эти мониторы следует калибровать каждую неделю и, как минимум, один раз в месяц.

Такие системы калибровки, как Barco Calibrator V и Sony Artisan, даже настаивают на калибровке каждые 30 дней. Некоторые пользователи калибруют свои мониторы буквально

каждый день, но, на наш взгляд, это не только бесполезно, а даже наносит определенный вред механизму его работы.

Подготовка к калибровке. Прежде чем приступать к калибровке, необходимо убедиться в ее необходимости. В мониторе на ЭЛТ для этого следует установить максимальную контрастность, а в мониторе на ЖКИ – максимальную яркость. Если в итоге изображение не станет хотя бы немного ярче, чем требуется, монитор, скорее всего, придется заменить, а не калибровать. Ведь калибраторы действуют в сторону уменьшения параметров отображения, и если изображение недостаточно яркое, после калибровки оно получится еще менее ярким.

Время прогрева монитора. Перед калибровкой монитора на ЭЛТ следует непременно дать ему прогреться как минимум 30 минут, а еще лучше – час, чтобы в нем установилась устойчивая рабочая температура.

При наличии какого-либо энергосберегающего программного обеспечения, выключающего монитор, когда он не используется, это программное обеспечение не следует запускать на период прогрева монитора. В данном случае вполне подойдут обычные экранные заставки (с плавающими рыбками или трехмерными фигурами). Главное – чтобы из-за них не отключился монитор.

Мониторам на ЖКИ прогрев практически не требуется, поскольку источник задней подсветки достигнет своей рабочей температуры к моменту, когда компьютер будет загружен.

Разрешение, регенерацию и другие параметры монитора следует обязательно установить до калибровки. В частности, изменение разрешения с 1280 x 1024 на 1152 x 864 или частоты обновления изображения с 85 на 75 Гц может оказать влияние на общую яркость изображения, выводимого на экран монитора. Это же относится и к изменению размера изображения. Так, при уменьшении его размера электроны бомбардируют меньшую площадь экрана, покрытого люминофорами, а это приводит к некоторому увеличению яркости изображения.

Чистка экрана. Перед калибровкой очень важно очистить экран монитора от пыли, грязи и отпечатков пальцев, поскольку

с нечистого экрана показания могут быть считаны неточно. Что касается мониторов на ЭЛТ, то вследствие недостаточной чистоты экрана измерительный датчик, прикрепленный к экрану, может упасть в процессе калибровки, повредив не только корпус монитор, его содержимое, но и клавиатуру.

Для чистки экрана монитора нужно использовать слабый раствор моющего средства или специально рекомендуемые для этой цели вещества.

Не следует применять растворы, содержащие аммиак или другие сильные растворители, поскольку на экраны большинства высококачественных мониторов нанесено специальное антибликовое покрытие, которое легко смывается бытовыми чистящими средствами. Еще более уязвимо в этом отношении покрытие экранов мониторов на ЖКИ.

Установка уровня яркости белого. В одних программных пакетах калибровки допускается указание конкретного значения уровня яркости белого, т.е. величины яркости экрана монитора, а в других настройка осуществляется по внутреннему (иногда недокументированному) предварительно заданному значению. Что касается мониторов на ЭЛТ, то указываемый уровень яркости обычно составляет от 85 до 95 кд/м².

Большинство современных мониторов на ЭЛТ способны воспроизводить более (а иногда и намного более) высокие уровни яркости белого. Существует большой соблазн увеличить уровень яркости белого для достижения максимально возможной контрастности, но при этом сокращается срок службы монитора.

Если установить этот уровень в рекомендованных выше пределах, хорошим монитором на ЭЛТ он будет поддерживаться, по крайней мере, в течение трех лет, а то и больше. Что касается мониторов на ЖКИ, то здесь просто устанавливается максимально допустимый калибратором уровень яркости.

Если калибратор, выполняющий автоматическую настройку монитора, не используется, то, поскольку большинство калибраторов все равно предложат это сделать,

вначале необходимо установить максимальную контрастность и минимальную яркость.

Калибраторы без автоматической настройки монитора обычно выводят на экран некоторое изображение с указанием целевого и текущего измеренного уровней яркости белого. После этого следует выполнить настройку регулятором контрастности (в мониторе на ЭЛТ) или регулятором яркости (в мониторе на ЖКИ) до совпадения обоих указанных уровней яркости белого.

Установка уровня яркости черного осуществляется несколько сложнее. В мониторах на ЭЛТ (и некоторых мониторах на ЖКИ) уровень яркости черного настраивается с помощью регулятора яркости (смещения уровня). У большинства мониторов на ЖКИ отсутствует регулятор уровня яркости черного, поэтому приходится принимать значение, которое дают калибраторы.

Иногда индикатор калибратора колеблется, неустойчиво показывая измеренный уровень яркости черного, что затрудняет точное определение оптимального значения. В этом случае необходимо постепенно выполнять регулировку уровня яркости черного в небольших пределах – до достижения оптимальной настройки.

Некоторые калибраторы позволяют устанавливать уровень яркости черного визуально, отображая темно-серое поле на фоне черного. В таком случае можно довольно легко установить слишком низкий уровень яркости черного, а, значит, и обрезать ряд полезных уровней яркости в области теней.

Главное при этом – установить уровень яркости черного чуть больше уровня полного отсутствия сигнала, посылаемого на монитор. На рис. 8.3. показаны различные подходы к установке уровня яркости черного.

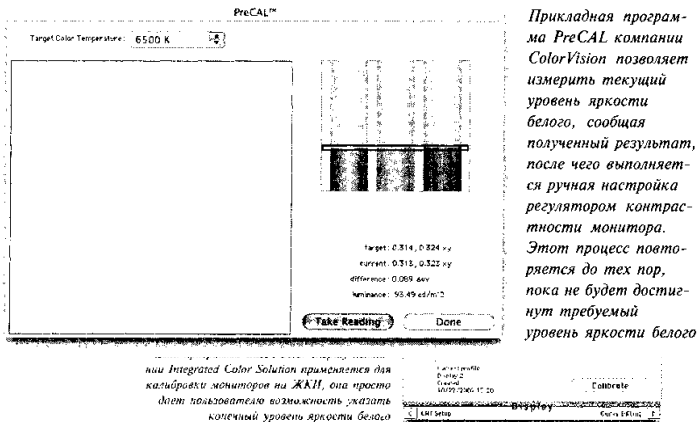


Рис. 8.3. Установка уровня яркости черного

Установка цветовой температуры. В мониторах на ЭЛТ для настройки цветовой температуры используются регуляторы усиления отдельных электронных пушек красного, зеленого и синего. А в мониторах на ЖКИ этого можно добиться лишь путем фильтрации света задней подсветки. Поэтому в таких мониторах цветовую температуру белой точки приходится оставлять на исходно установленном уровне около 6500 К.

Тем не менее, пределы регулирования цветовой температуры существенно зависят от конкретной модели монитора на ЭЛТ. В таких мониторах обычно имеются варианты установки цветовой температуры. Это несколько предварительно заданных значений цветовой температуры, как правило, 5000 К, 6500 К и 9300 К (хотя в некоторых моделях имеется больший выбор таких значений).

Итак, калибровки и профилирование, требующие вмешательства пользователя, успешно завершены. Далее программа калибровки выводит цветные поля на экран, выбирает результаты измерений, вносит необходимые коррективы в справочную таблицу видеоплаты, а затем отображает ряд дополнительных цветовых полей, проверяет

результаты измерений и в конечном итоге формирует профиль. Тем не менее, этот процесс не всегда проходит гладко.

Необходимо убедиться в том, что в процесс калибровки не вмешивались программы экранной заставки. Хорошая программа калибровки должна уметь определять этот момент, и на самом деле, большинство таких программ содержат код, предупреждающий подобное вмешательство.

Тем не менее, если во время калибровки на экране появляются плавающие рыбки или другая экранная заставка, придется, соответственно, настроить параметры программы заставки или вообще отменить ее запуск. Разумеется, после этого весь процесс калибровки придется начать с самого начала.

Заметим, что процессу калибровки может помешать также перемещение указателя мыши в той области, где выполняются измерения. Большинство современных программ калибровки скрывают указатель мыши, когда он появляется в области измерений. Но для этого они, крайней мере, должны обнаружить указатель мыши в данной области, о чем сообщить звуковым сигналом, впрочем, из этого правила имеются исключения. Поэтому до завершения калибровки указатель мыши для надежности рекомендуется установить на краю экрана и вообще не касаться мыши.

Если калибровку предполагается выполнять во время перерыва в работе, следует в обязательном порядке проверить надежность крепления калибратора на экране монитора. Конструкция современных крепящихся измерительных приборов значительно улучшилась, тем не менее, если измерительный прибор упадет до завершения калибровки, весь процесс придется начинать сначала.

Чтобы сохранить профиль монитора, независимо от используемого типа калибратора, нужно сохранить результаты калибровки монитора в виде профиля, присвоив ему подходящее новое имя.

Шкалы профилирования устройств ввода. Обычно такие шкалы состоят из двух компонентов: физической шкалы: сканируемой или снимаемой (фиксируемой) камерой и файла описания шкалы (TDF), содержащего результаты измерений цветовых полей шкалы.

Основное различие между дорогими и недорогими шкалами профилирования устройств ввода заключается в точности результатов измерений, представленных в файле описания шкалы. Недорогие шкалы выпускаются довольно крупными партиями, а их измерения производятся по небольшой выборке из общей партии. В итоге файлы TDF одних шкал из данной партии содержат более точные результаты измерений, чем другие. Дорогие шкалы выпускаются небольшими партиями и измеряются по отдельности, поэтому их файлы TDF содержат намного более точные результаты измерений.

Шкалы сканеров. До настоящего времени чаще всего применялись шкалы сканеров IT8.7/1 (прозрачные) и IT8.7/2 (отражающие). Эти шкалы выпускаются несколькими производителями на самых разных типах пленки. Шкала Q-60 компании «Kodak» (рис. 8.4) соответствует стандарту IT8.

Красители, формирующие изображение на разных типах пленки, мало отличаются друг от друга. В то время как красители, фиксирующие изображение, могут быть в значительной степени различными, а профиль ввода лишь регистрирует, каким образом это устройство воспринимает цвет.

Заметим, что цвета шкал Kodak и IT8 могут существенно отличаться, но, поскольку результаты измерений в файле TDF довольно точны, на их основании получаются очень похожие профили.

Эти шкалы дают практически одинаковые профили, пригодные для описания изображений, сканированных с любого из указанных типов пленки. Лучше приобрести одну измеренную вручную шкалу, чем измеряемые партиями шкалы на разных типах пленки.



Рис. 8.4. Шкала Q-60 компании «Kodak»

Предпочтение следует отдать шкале НСТ (по сравнению со шкалой ПТ8) не только из-за точности результатов измерений в сопутствующем ей файле TDF, но и потому, что она содержит лучше подобранные образцы цветов, особенно темных, насыщенных, а, значит, такая шкала позволяет сформировать более точный профиль.

Параметры работы устройств ввода. Очень важно контролировать все параметры, которые могут оказывать влияние на режим функционирования устройств ввода. В действительности на работу таких устройств ввода, как сканеры и цифровые камеры, оказывают влияние лишь три фактора: источник света, цветные фильтры, значения настройки программного обеспечения.

Источники света большинства сканеров, кроме недорогих моделей, работают достаточно устойчиво, а некоторую их нестабильность можно практически всегда компенсировать путем внутренней калибровки перед каждым сканированием. Что касается режимов работы источников света, применяющихся вместе с цифровыми камерами, то они сильно отличаются.

Именно поэтому профилировать сканеры намного проще, чем цифровые камеры, порядок компенсации различий в режимах работы источников света которых определяется возможностями конкретной модели камеры.

Характеристики цветных фильтров цифровых камер и сканеров изменяются в течение срока службы устройства. Вместе с тем это происходит настолько медленно, что их перепрофилирование потребуется лишь через пять лет.

Наиболее нестабильными как для сканеров, так и для цифровых камер являются *параметры настройки программного обеспечения*. Такие параметры имеют большое значение для обоих видов устройств ввода, но в совершенно разном отношении, поэтому далее будут рассматриваться раздельно. И начать следует со сканеров, как с более простых устройств.

Создание профилей цифровых камер. Этот процесс мало чем отличается от формирования профилей сканеров. Достаточно предоставить формирователю профиля файл описания шкалы (формата TDF) и файл зафиксированного изображения шкалы (формата TIFF), обрезать шкалу и нажать соответствующую кнопку, чтобы начать формирование профиля. И он, выполнив необходимые расчеты, создаст профиль. В то же время, есть определенные трудности формирования профилей цифровых камер по сравнению с профилями сканеров, которые обусловлены различиями в назначении этих устройств.

Если сканеры содержат постоянный и относительно стабильный источник света, то в цифровых камерах ничего подобного нет. Более того, сканеры фиксируют, в основном, оригиналы, уже сведенные до трех или четырех основных цветов красителей, тогда как цифровые камеры фиксируют настоящие объекты во всем многообразии их окраски. Поэтому метамерия (т. е. разное восприятие цвета устройством, фиксирующим изображение, и человеческим зрением) в большей степени присуща цифровым камерам, чем сканерам.

Контроль ответной реакции цифровой камеры. Методика стабилизации ответной реакции устройства, применяющаяся к сканерам, совершенно непригодна для цифровых камер. Камера должна по-разному реагировать на разные фиксируемые сцены, чтобы приспособиться к условиям освещения, изменяющимся как по динамическому диапазону, так и по цветовой температуре.

Контроль цветовой температуры зависит, главным образом, от возможностей цифровой камеры. А контроль ответной реакции цифровой камеры по динамическому диапазону (освещению и

экспозиции) — это основа фотографии. Поэтому для профилирования камеры необходимо непременно обеспечить равномерное освещение шкалы и правильную фиксацию света и тени.

Большинство цифровых камер допускают до некоторой степени автоматическую установку баланса белого, хотя этот режим не особенно надежен, а поэтому рекомендуется устанавливать баланс серого, используя серую карточку. Порядок выполнения этой операции зависит от конкретной модели цифровой камеры.

Создание профилей вывода. Для получения точных профилей вывода требуется специальный измерительный прибор. Теоретически с этой целью можно использовать колориметр или спектрофотометр.

На практике большее применение находят именно спектрофотометры, выполняющие измерения в отраженном свете. Они выгоднее, поскольку, хотя и стоят несколько дороже колориметров, но в то же время более точны и универсальны.

Рекомендуется выбирать такой измерительный прибор, который непосредственно поддерживается используемой программой профилирования.

9. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

Мы уже обсудили несколько шкал, с помощью которых можно обмениваться информацией о цветах и описывать их. Это либо количество первичных составляющих, присутствующих в цвете, либо его перцептуальные атрибуты, либо фактические спектральные данные.

В каждой из этих моделей применяются свои единицы измерения, подобные метрам или килограммам. Таким образом, нужен лишь набор правил, с помощью которых можно было бы измерять цвета и описывать их числовыми выражениями, как это делается в модели CIE $L^*a^*b^*$. На сегодняшний день наиболее распространенными инструментами измерения цветов являются *денситометры*, *колориметры* и *спектрофотометры*.

Для измерения цвета в полиграфии применяются денситометрические и во все большей степени – колориметрические методы и приборы. В то время как колориметрические измерения базируются на учете зрительного восприятия, денситометрические измерения основаны на оценке толщины красочного слоя, а обработка измеренных значений согласуется со зрительным восприятием/чувствительностью по светлоте/насыщенности.

Измерение оптической плотности широко распространено. Для этой цели существуют надежные измерительные приборы. Так, денситометром определяются не только оптические плотности, но также и параметры растровой печати, такие, как растискивание и относительный контраст печати. Тот факт, что посредством измерений возможно определить красковосприятие (захват) краски материалом, имеет исключительное значение в технологии многокрасочной печати.

9.1. Денситометрия

В многокрасочных машинах краскоподача в каждой печатной секции должна контролироваться и регулироваться отдельно. Так как в растровом изображении имеет место наложение нескольких

красок, то визуальная и инструментальная оценки отдельных красок на самой репродукции относительно сложны.

На сигнал, измеряемый от одной краски, влияют другие краски, что ограничивает точность измерений. Поэтому, наряду с основным изображением, на обрезном поле печатного листа принято печатать цветные шкалы, измерительные поля которых соответствуют определенным краскам (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Контрольная шкала печатного процесса с полями для измерения цвета

Такие контрольные шкалы получили широкое применение на практике и наносятся по всей ширине печатного листа, при этом отдельные поля располагаются так, что соответствуют зонам подачи краски. Это обеспечивает возможность целенаправленного управления ее подачей. Плотности полей шкал на оттиске контролируют посредством денситометра. По значениям плотностей легко могут быть определены изменения в подаче краски.

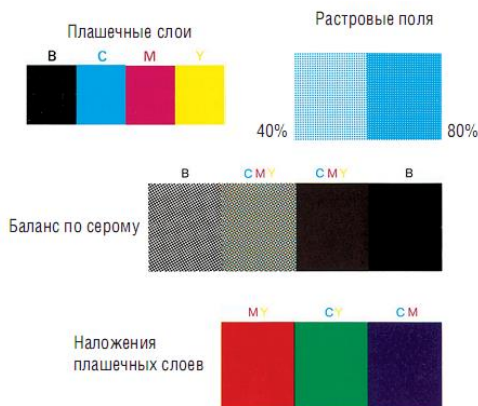


Рис. 9.2. Примеры полей для измерения цвета (размер поля – 5×6 мм)

Как показано на рис. 9.2, тест-объект содержит элементы со сплошными и растровыми полями, шкалу контроля баланса по серому цвету и цвету двух-, трехкрасочных наложений красочных плашек.

Оптическая плотность D определяется соотношением :

$$D = \log 1/\beta = \log L_0 / L \quad (9.1)$$

Коэффициент отражения (β) равен отношению интенсивности света (L), отраженного от красочного слоя, к отражению (L_0) от участка незапечатанной бумаги. С увеличением толщины красочного слоя коэффициент отражения β уменьшается.

Для того чтобы получить данные измерений пропорциональные изменению толщины красочного слоя, при расчете оптической плотности сначала находят обратную величину ($1/\beta$), а затем вычисляют ее логарифм. При этом известно, что отрицательный логарифм отражения (пропускания) моделирует нелинейность зрительного восприятия.

Перед началом работы измерительный прибор калибруется обычно по подложке (белая бумага) для установки нулевого значения плотности («0»). Для «абсолютной» калибровки используют специальный стандартизированный эталон, например, сульфат бария. Он применяется, чтобы можно было производить сравнения измерений, выполненных на различных устройствах, независимо от запечатываемых материалов.

Для измерений на оттисках, выполненных различными цветными печатными красками, на пути хода лучей от данного источника света в денситометре размещают светофильтры. Цветные фильтры согласованы со спектральными характеристиками триадных красок (СМΥК). Максимум пропускания цветных светофильтров должен находиться в зоне, соответствующей минимуму отражения измеряемой краски. Таким образом, светофильтры пропускают свет, дополнительный к цвету выделяемой краски (например, синий светофильтр – для желтой краски, зеленый – для пурпурной, красный – для голубой

краски). Это приводит к высоким значениям измеряемых величин и к оптимальной чувствительности приемника к изменениям толщины красочного слоя.

Светофильтры, установленные в различных измерительных приборах, стандартизированы. Денситометрические измерения цвета привели к появлению термина «цветоделенная плотность» в противоположность известному «оптическая» плотность, которая оценивается без использования светофильтров (преимущественно измеряются черные краски). Но и здесь очень часто работает так называемый «фильтр видности», или зеленый светофильтр, применяемый для пурпурного цвета.

Для специальных (внутриадных) красок в денситометре не предусмотрено никаких подходящих светофильтров. Остается проводить измерения за светофильтром, дающим наибольшее значение плотности.

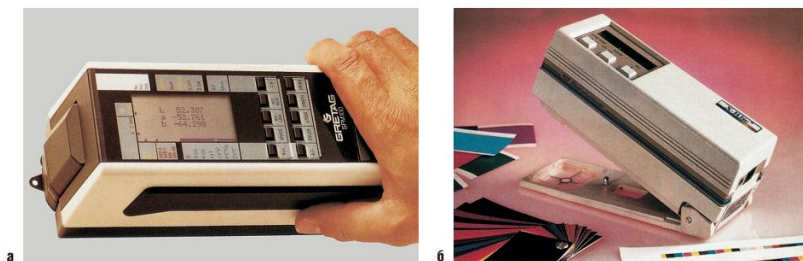


Рис. 9.3. Ручные приборы для измерения цвета:

а – спектрофотометр SPM 100 (Gretag);

б – спектроденситометр 938 (X-Rite)

Денситометры пригодны также для измерения спектральной плотности. С этой целью они снабжаются специальными узкозональными светофильтрами (например, с шириной полосы 30 нм), что улучшает сопоставимость показаний различных приборов именно по спектральной плотности.

Обычно при денситометрическом считывании используют измерительную апертуру (отверстие) диаметром порядка 3 мм.

9.1.1. Действие поляризационных фильтров

С помощью денситометров можно измерять как сухие, так и еще сырые красочные слои. Для последних характерна относительно гладкая, глянцевая поверхность. При высыхании красочный слой в какой-то мере принимает неравномерную шероховатую структуру поверхности бумаги и теряет первоначальный глянец.

Если провести измерения сначала по сырому, а затем по сухому слою, то результаты измерений будут различными (величина измеренной плотности по сырому слою будет выше, чем по сухому слою).

Чтобы компенсировать такое рассогласование, на оптическом пути устанавливаются два линейных поляризационных фильтра со скрещенными плоскостями. Из распространяющихся во всех направлениях световых волн поляризационные фильтры пропускают волны только одного направления, таким образом, действие глянца нивелируется.

Относительная запечатываемая площадь (растровые величины)

Достоверная цветопередача растрового изображения очень критична к изменению размера растровых точек, поскольку эти отклонения приводят к сдвигам в тоно- и цветопередаче. Имеется множество факторов, которые оказывают влияние на градационную передачу при растрировании, и поэтому, в целях стандартизации, они должны контролироваться.

В репродукционном процессе самой простой контролируемой величиной градационной передачи является относительная площадь растровых точек на полях цветных контрольных шкал.

Относительная площадь растровых точек на оттиске (т.е. площадь, занятая покрытыми печатной краской растровыми

точками на поле контрольной шкалы) может быть измерена денситометром.

При денситометрической оценке оптической плотности растровых полей измеряемые значения соответствуют не геометрической относительной площади растровых точек, а «оптически эффективной запечатанной площади».

Различие между геометрической и оптически эффективной запечатанной площадью возникает из-за того, что как при рассматривании, так и при денситометрических измерениях часть света, падающего на пробелы, рассеивается в толще бумаги и, попадая под растровую точку, поглощается ее красочным слоем.

Этот эффект «поглощения света» приводит к тому, что растровые точки оказываются оптически несколько большими, чем в действительности. Таким образом, оптически эффективная относительная запечатываемая площадь складывается из геометрической площади, определяемой из **оптического растискивания**. При оценке репродукционного процесса с учетом свойств используемых материалов относительная площадь растровых элементов оттиска становится *важнейшей измеряемой величиной и основной количественной характеристикой*.

При растискивании увеличение растровых точек (Z , %) рассчитывают из относительной площади растровых точек на фотоформе (FF , %) как оригинала для изготовления печатных форм и их конечной относительной площади на оттиске (FD , %):

$$Z = FD - FF \quad (9.2)$$

На цветных контрольных шкалах относительная площадь точки, например, по голубой краске (равной 55%) получается посредством измерения плотностей плашки и поля тоновой шкалы с относительной площадью растровой точки фотоформы 40%.

Таким образом, прирост относительной площади точки к известному ее размеру (40%) на фотоформе составляет 15%. Приращение обычно положительно, так как резиновое полотно увеличивает точку при ее передаче на бумагу.

Предполагается, что относительная площадь при переходе от фотоформы к печатной форме изменяется незначительно. В общем

случае это зависит от того, изготавливается печатная форма на пластине позитивным или негативным копированием.

Изменение градации, происходящее в печатном процессе, должно быть учтено при цветоделении и изготовлении фотоформ. Исходя из практических соображений, в стандартизированном позитивном копировальном процессе изготовления печатных форм растровые точки с фотоформы копируются на печатную форму с несколько уменьшенными размерами. При стандартных условиях ведения печатного процесса площади растровых точек снова увеличатся.

Растискивание в значительной степени зависит от свойств поверхности бумаги и ее впитывающей способности, реологических свойств красок, характеристик резино-тканевого полотна (декеля), давления при печати и т.д.

При разработке стандартов офсетной печати были нормированы значения растискивания от фотоформы до оттиска. Эти данные по растискиванию служат печатнику нормами для соответствующего выбора материалов и необходимых регулировок печатного оборудования.

Дополнительные показатели качества. Другие параметры качества печати могут быть получены посредством денситометрических измерений. Особенно это относится к краскопереносу для растровых и плашечных красочных полей (относительный контраст печати или просто контраст), а также наложению одна на другую красок плашечных полей (красковосприятие/захват краски).

9.1.2. Денситометрическая система измерений

Ручные денситометры хорошо подходят для контроля качества до тех пор, пока на одном печатном листе производят лишь несколько измерений. Типичным примером использования ручных денситометров является выборочный контроль значений плотностей с целью стандартизации офсетной печати.

Для постоянного контроля тиража в печати или непрерывного регулирования подачи краски в печатной машине необходимо

большее количество измерений. Для этой цели были созданы автоматизированные системы измерений.

Сканирующие денситометры первоначально разрабатывались для офсетной печати, чтобы считывать контрольные шкалы, печатаемые по краю, например, всего печатного листа.

Регулировку красочных зон в печатных секциях многокрасочной печатной машины желательно производить по значениям оптической плотности. Так как для каждой красочной зоны необходимо получить свои данные, денситометр должен перемещаться вдоль контрольной шкалы, сканируя лист под прямым углом к направлению его движения. Данная задача может решаться в режиме off-line (вне печатной машины) посредством денситометра, который сканирует лист, снятый с печатной машины.

Обычно контрольную полосу располагают на обрезном поле листа. Объекты, которые необходимо измерить (плашки, растровые поля и другие контрольные элементы), располагаются на контрольной шкале в определенной последовательности (см. ранее, рис. 9.1). Поскольку невозможно достаточно надежное автоматическое распознавание элементов шкалы, для получения правильных оценок в измерительную систему предварительно вводят данные о типе контрольной шкалы (и, значит, последовательности элементов).

Далее геометрия расположения тест-объекта относительно проводки печатного листа в машине (например, посередине листа) оговаривается таким образом, чтобы каждое отдельное измерение на печатном листе относилось к соответствующей регулируемой зоне подачи краски.

Особенно часто при печати упаковочной продукции цветные участки запечатываются специальными (внутриадными, оформительскими) красками, применение которых связано с очень малыми допусками. Часто на печатном листе не хватает места для размещения полного набора элементов контрольного тест-объекта. Но отдельные элементы можно разместить, например, между повторяющимися фрагментами печатного листа.

Специальные сканирующие денситометры с двухкоординатной системой измерений позволяют автоматически перемещать

измерительную головку в любую точку листа, где необходимо произвести измерения. Перед началом сканирования все координаты измерений должны быть запрограммированы.

Многочисленные новейшие устройства для измерения цвета (ручные или автоматические системы), пригодные для сканирования печатного листа, построены уже на методах спектральных измерений. Наряду с определением колориметрических величин такие приборы, на основе измерений спектрального отражения (путем, например, цифровой фильтрации), могут также показывать величину оптической плотности. Внешне эти приборы мало чем отличаются от денситометров (рис. 9.3).

Существуют системы измерения цветовых характеристик, встроенные в рулонные печатные машины. Они позволяют осуществлять непрерывный контроль и даже управлять печатным процессом, однако для листовых печатных машин данный тип систем экономически неоправдан.

9.2. Спектральное измерение цвета

Корректное сравнение цвета плашек на различных оттисках измерением оптических плотностей возможно лишь при наличии стандартных опорных значений для типовой бумаги и краски. Поэтому денситометрические измерения весьма подходят для контроля качества при печати тиража. Однако при сравнении цветопробных и тиражных оттисков эти методы менее приемлемы, поскольку для получения этих изображений используются различные материалы.

Эти проблемы в денситометрии решаются измерением цвета, учитывающим особенности зрительного восприятия. Это делает возможным вести настройку печатной машины по колориметрическим значениям цветопробы и отрегулировать печатную машину под заданный цвет в пределах весьма малых допусков.

Как уже говорилось, измерение цвета основано на методах колориметрии. Принципиальная схема цветоизмерительного прибора приведена на рис. 9.4.

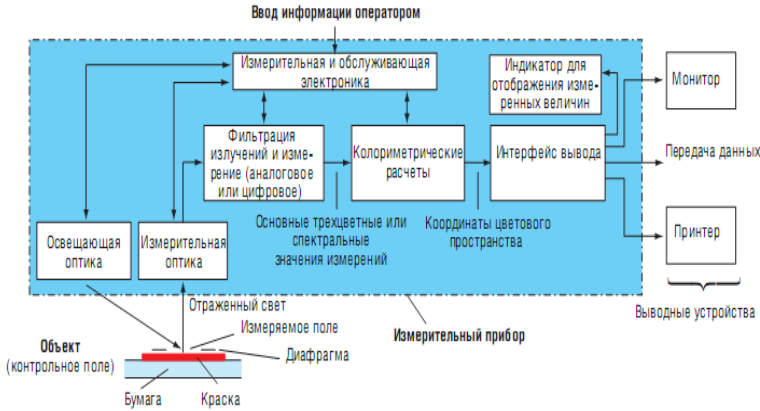


Рис. 9.4. Блок-схема построения прибора для измерения цвета

Спектральные измерения цвета проводятся либо с помощью трех специальных светофильтров, моделирующих восприятие цвета глазом человека, либо (рис. 9.5) непосредственным измерением спектральных распределений коэффициентов отражения и последующей цифровой фильтрацией (спектрофотометр). Сканирующий спектрофотометр, использующий дифракционную решетку, (рис. 9.5 в) применяют в оборудовании контроля и управления цветом.

Для сканирования печатного листа используется оптическое многоканальное развертывающее устройство. Спектральные измерения в конкретной точке основаны на работе дифракционной решетки. Такая система наряду с измерениями полей контрольной шкалы и внутриадных красок может также выполнять измерения на самом изображении.

Последние всегда желательны для печатника, потому что, в конце концов, качество изображения — это решающий фактор оценки тиража заказчиком. Измерения по всей площади листа облегчают оценку при наличии изображений разного типа, оцениваемых по различным критериям и опорным значениям.

Становятся возможными оценки контрольных шкал, многокрасочных наложений, плашечных слоев внутриадных красок и т.п.

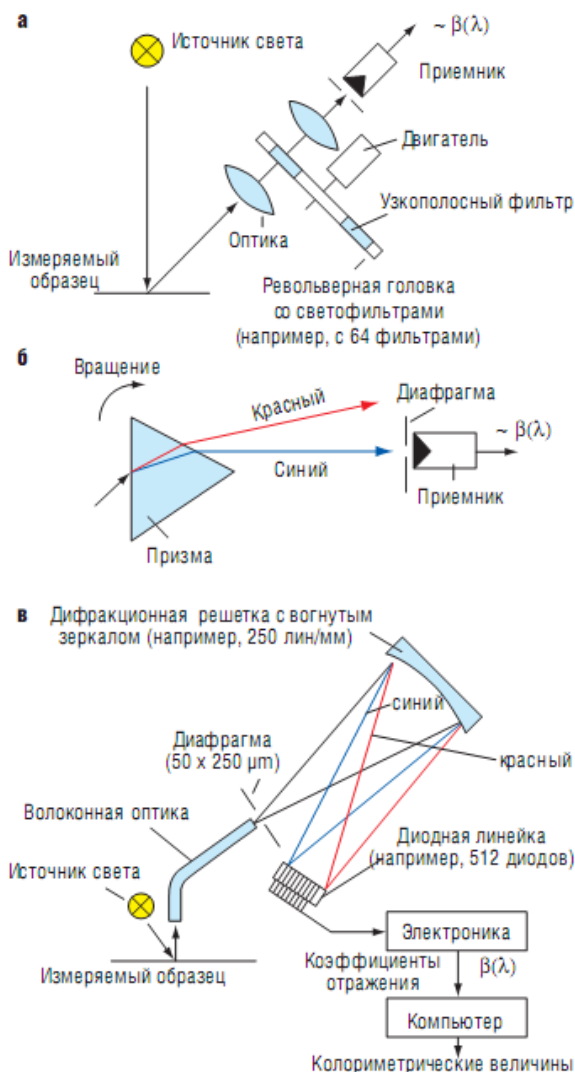


Рис. 9.5. Спектрофотометрические принципы измерения спектрального отражения:

а – принцип револьверной головки; б – 0150 принцип монохроматора; в – 0150 принцип дифракционной решетки

С помощью специальных программных алгоритмов на печатном листе автоматически распознаются элементы, подходящие для измерений. Это существенно облегчает приладку, особенно при печати упаковки.

Более того, контроль, выполняемый путем сканирования площади всего печатного листа, например, контроль наличия искажений и дефектов репродукции, осуществляется посредством использования монитора или других средств.

На основе спектральных измерений рассчитываются значения любых оптических плотностей и их производные величины, такие как относительная площадь растровых точек, красковосприятие и т.д. Таким образом, колориметрические измерения метрологически поддерживают традиционные методы контроля. С другой стороны, колориметрические измерения в процессе печати являются также предпосылкой эффективного использования методов управления цветом.

Измерение оптической плотности напрямую связано с толщиной красочного слоя, что позволяет использовать измерения отклонений плотностей для регулирования подачи краски в отдельных печатных секциях машины. Сравнение измеренных и заданных значений путем колориметрии позволяет оценить локальные отклонения цвета для регулировки красочного аппарата по толщине красочного слоя триадных красок на оттиске.

9.3. Контроль изображения

Бумажное полотно в глубокой, флексографской и рулонной трафаретной печати обычно запечатывается в непрерывном режиме. Пройдя секцию сушки, оно снова сматывается в рулон. В этих случаях для контроля качества печатную машину необходимо останавливать, так как на движущемся полотне контроль затруднен. Поскольку в процессе печати тиража могут появляться дефекты, на движущемся полотне для контроля разработаны встроенные (in-line) системы.

В зависимости от постановки задачи конфигурация *систем контроля на рулонном полотне* существенно различается. Чаще всего они используются для визуального контроля заметных дефектов и больших искажений по цвету или приводке. Достоверный контроль цвета в течение печати всего тиража может быть обеспечен только посредством денситометрических или колориметрических измерений, производящихся по движущемуся полотну. Самым простым средством визуального контроля движущегося полотна является **стробоскоп**. Используемые здесь периодические вспышки света, синхронизированы со скоростью движущегося полотна так, что оно кажется наблюдателю неподвижным.

Высококачественный контроль изображения обеспечивается оптической системой с вращающимся зеркалом. Статическое изображение также предоставляет возможность оператору печатной машины обнаруживать отклонения в цветопередаче.

Система, показанная на рис. 9.6, осуществляет анализ запечатываемого листа в одном направлении при размере считывающей апертуры 2×3 мм.



Рис. 9.6. Измерительная и регулировочная система для измерения цвета и проверки изображения на печатном листе:
а - измерительное устройство; б - показания на дисплее (Heidelberg)

9.3.1. Приводка красок

Точное размещение изображений без геометрических сдвигов на лице и обороте запечатываемого листа традиционно называется приводкой. Допустимые отклонения составляют примерно 0,1мм. Существенным фактором получения высококачественной многокрасочной репродукции является высокая точность наложения отдельных цветоделенных изображений для СМΥК. Возможность обеспечения приводки красок на печатной машине по образующей цилиндра и направлению движения бумажного листа достигается регулированием совмещения красок относительно друг друга с шагом 1/100 мм.

Регулировка незначительных отклонений в приводке может выполняться с пульта управления. Посредством поворота и перемещения отдельного формного цилиндра можно выполнять коррекцию приводки по его окружности и в осевом направлении. В некоторых моделях машин возможна диагональная регулировка приводки (вращение изображения).

Она достигается перемещением формного цилиндра (идеальным вариантом был бы поворот самой печатной формы на формном цилиндре). Для того, чтобы ускорить и упростить процесс приводки в печатной машине, разработаны системы оценки и контроля приводки, большинство из которых базируется на анализе специальных меток, нанесенных на запечатываемый материал.

Самым простым способом проверки совмещения красок является рассматривание определенного участка изображения в лупу (рис. 9.7,а). Если лупа оснащена измерительной шкалой, то печатник может оценить величину несовмещения и, насколько требуется, отрегулировать неприводку по окружности и в осевом направлении.

С целью упрощения процесса контроля вдоль изображения на оттиске печатают специальные приводочные метки, которые копируются на печатные формы таким образом, что при точном совмещении всех линий/меток для отдельных печатных красок/цветоделенных изображений эти мини-метки ложатся одна на другую или формируют определенные структуры –

приводочные метки, кресты (рис. 9.7,б). Отклонения определяются визуально посредством лупы и далее учитываются при настройке печатной машины.

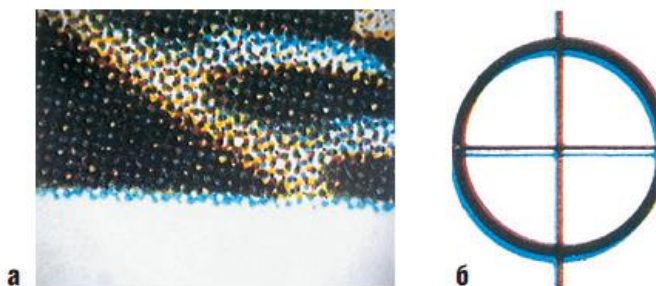


Рис. 9.7. Отклонения совмещения цветов:
а - растровое изображение; б - приводочная метка

Возрастает использование видеоконтрольных систем, отличающихся расширенными возможностями обнаружения, как дефектов структуры, так и довольно заметных искажений цветопередачи. Преимущество видеонаблюдения заключается в цифровом анализе изображения с автоматическим распознаванием искажений. Точность определения цвета ограничена технологическими характеристиками видеокамеры. Подобные системы подходят для общего анализа изображения с использованием компьютерной поддержки, но не для метрологических измерений цвета и осуществления контроля при малых допусках на отклонения параметров печати.



Рис. 9.8. Видеолупа для оценки совмещения при многокрасочной печати

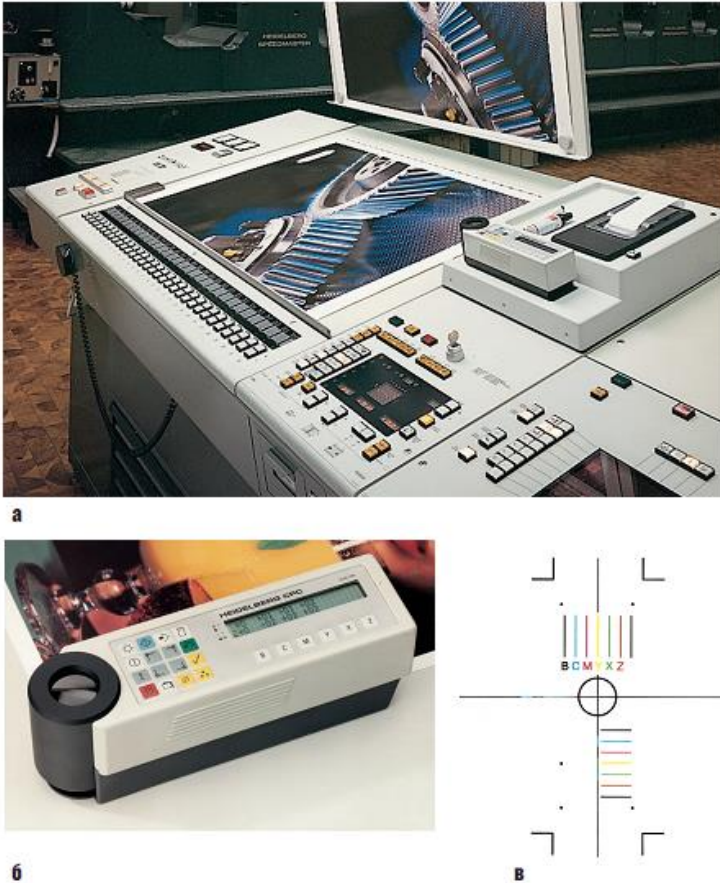


Рис. 9.9. Ручное устройство для измерения отклонений совмещения красок и автоматической регулировки машины:
а - устройство для считывания приводочных крестов на пульте управления печатной машины; б - ручное устройство; в - приводочная метка для 6 красок на печатном листе (Heidelberg).

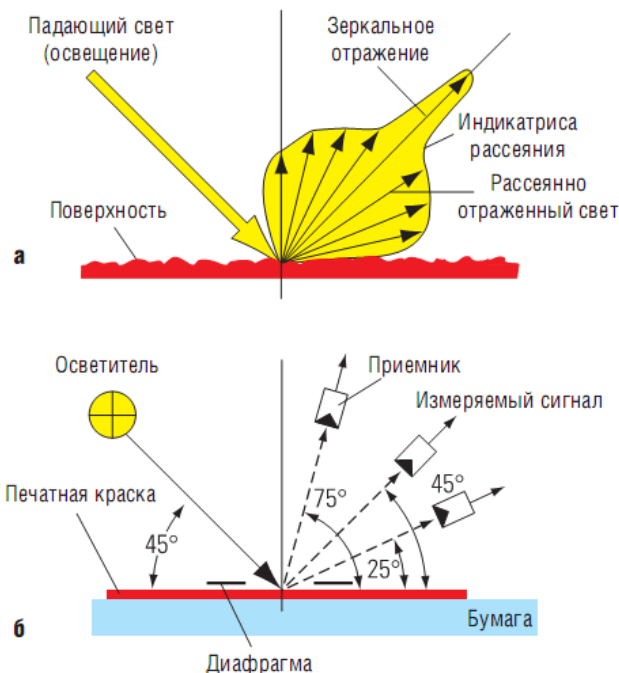


Рис. 9.10. Принцип измерения глянца:
а - рассеяние света шероховатой поверхностью;
б - измерение глянца при заданных углах измерения

Автоматизированные устройства измерения приво́дки красок могут распознавать отклонения, количественно их оценивать и отображать для печатника на мониторе. Кроме этого, такие устройства могут передавать данные для коррекции приво́дки в систему настройки печатной машины. Для измерения совмещения красок непосредственно в процессе печати (in-line) используют измерительные системы, которые устанавливают как на листовых, так и на рулонных печатных машинах. Измерение ведется преимущественно по приводочным меткам, отпечатанным по периметру основного изображения.

ГЛОССАРИЙ

Адаптация цветовая – процесс приспособления или конечное состояние приспособления глаза к цветному свету.

Векторный формат – это формат, в котором штриховые изображения (графика, текст) записываются в память не в виде отдельных точек изображения (пикселей), а в форме отрезков, описанных математически. Преимущества по сравнению с пиксельным форматом заключаются, как правило, в значительно меньшем объеме необходимой памяти и возможности масштабирования без влияния на качество изображения.

Глубина цвета (разрядность квантования) – количество разрядов квантования, т.е. степень, в которую нужно возвести число 2 для определения количества дискретных уровней разделения аналогового сигнала при квантовании в аналого-цифровом преобразователе сканера, цифровом фотоаппарате и других устройствах, осуществляющих преобразование аналогового сигнала в цифровой. Так, например, 8 бит глубины цвета позволяют отобразить 256 ступеней градации.

Градация изображения – последовательный ряд величин, построенный по возрастанию или убыванию оптических плотностей растровых величин оригинала, фотоформы, печатной формы и оттиска.

Градационная кривая печатного процесса – графическое представление зависимости между растровыми величинами продукции допечатных процессов, например, растровыми данными на фотоформе или на печатной форме (преимущественно относятся к растровым величинам на фотоформе), и соответствующими растровыми величинами в печати (из нее выводится информация о так называемой «передаче тонов и градиентов»).

Глянec – визуальное восприятие, относящееся к физическим свойствам поверхности, определяющим ее способность отражать направленный свет.

Денситометр – прибор для измерения оптических плотностей. Измерительный принцип основан на ослаблении

интенсивности света при прохождении его через слои продукции.

Дерастрирование – устранение растровой структуры автотипного растра при считывании растрового изображения путем применения апертурной фильтрации с использованием соответствующим образом подобранного размера апертуры, а также программным методом, посредством использования соответствующих цифровых фильтров.

Иррадиация – кажущееся изменение площади цветового пятна, окруженного фоном, отличающимся от пятна по светлоте.

Контраст цветов одновременный – ощущение цвета, возникающее при наблюдении цветового пятна на фоне.

Контраст цветов последовательный – ощущение цвета, возникающее при предварительном воздействии на глаз излучений другого цвета.

Линиатура – количество печатающих элементов (растровых точек, линий) на единице длины в направлении, которое соответствует их наибольшему количеству. Выражается в метрических единицах (см^{-1}), используют также лин/см или линий на дюйм.

Локальный цвет – характерный для данного предмета (его окраска) и не претерпевший никаких изменений (существует только в идеальной теории, в реальности зависит от окружающей среды).

Муар – видимый, периодически повторяющийся рисунок, возникающий при наложении двух и более растровых изображений. Нежелательные помехи (эффект интерференции) на растриванных, в основном, многокрасочных изображениях, которые вызываются неправильными углами поворота растровых структур, несовмещением красок или особой структурой сюжета оригинала, взаимодействующей с растровой.

Насыщенность цветовая – качество цвета, характеризующее степень, уровень, силу выражения цветового тона и связанное с количеством (концентрацией) пигмента, краски, красителя; оценивается количеством порогов цветоразличения.

Оптическая плотность – мера пропускания света (для прозрачных объектов) и отражения света (для непрозрачных), количественно определяемая как десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания (отражения).

Относительная площадь растровой точки – единица измерения оптического восприятия растрованного изображения в процентах. На незапечатанной поверхности эта величина равна 0%, а плашка имеет относительную площадь, равную 100%. На растровом изображении относительная площадь растровой точки (или в процентном выражении) определяется отношением площади растровой точки к площади элементарной площадки (квадрата, сторона которого соответствует линиатуре).

Отношения цветовые – количественные различия между цветами во всех их характеристиках и свойствах (по яркости, тону, насыщенности, плотности и др.).

Пиксельный формат – формат записи изобразительных данных, в котором каждый пиксель описан соответствующими параметрами. В большинстве случаев используется TaggedImageFileFormat (TIFF). Пиксельный формат предназначен, прежде всего, для изобразительной информации.

Поверхностный цвет – воспринимаемый в единстве с фактурой предмета; как правило, это почти всегда цвет переднего плана.

Полутоновое изображение – в котором параметры изображения (оптическая плотность, яркость и т.п.) внутри динамического диапазона изображения могут принимать любые значения и обычно непрерывно переходят от одного значения к другому.

Порог цветоразличения – наименьшее цветовое различие, впервые замеченное человеком в определенных условиях наблюдения.

Пробный оттиск – печать небольшим тиражом на пробопечатном станке с целью определения видимого результата проведенного репродукционного процесса; технология печатного процесса станка должна соответствовать тиражной.

Пространственный цвет – бесфактурный цвет, характеризующий предметно-пространственные ситуации, например, цвет удаленных объектов и сред (небо, вода).

Приводка/совмещение – это: 1) точность положения отпечатанных изображений, находящихся на лицевой и обратной сторонах печатного листа, относительно друг друга; то же касается и печати с оборотом; 2) в многокрасочной печати – положение цветоделенных изображений относительно друг друга (приводка красок); 3) обозначение точности положения цветоделенного изображения, получаемого в процессе печати, относительно внешних краев листа или полотна. Совмещение в продольном направлении осуществляется по ходу движения машины, а совмещение поперек этого движения характеризуется как боковое (осевое).

Разрешение – количество точек (пикселей) на единице длины, которое может быть воспроизведено на мониторе, фотопленке, носителе изображения (например, на печатной форме или бумаге). Dots per inch (dpi) – мера разрешения изображения – обычно выражается количеством линий (точек) на см или дюйм. Высокое разрешение означает хорошую передачу мелких деталей.

Растр – поверхность, разделенная на запечатанные и незапечатанные элементы изображения (растровые точки или линии). Площадь и количество элементов на единицу поверхности изменяется соответственно градациям оригинала. Различают амплитудно-модулированное (АМ-) и частотно-модулированное (ЧМ-) растрирование. Полутоновые оригиналы для изготовления растрового изображения в настоящее время обрабатывают преимущественно электронными методами.

Растрирование (англ. to dither – размывать, сглаживать, смещать) – псевдосмещение (размывание) цветов точечных растров для получения плавных переходов на цветном изображении: 1) в сформированном цифровым способом печатном изображении цветовые тоновые переходы формируются из ступеней серого каждого цветоделенного изображения. Величины соседних пикселей выбираются таким образом, чтобы среднее значение по серой шкале было, по

возможности, ближе к соответствующим точкам оригинала, благодаря чему возможно достижение нужного результата; 2) постепенное изменение тоновых значений серого в изображении с черными и белыми микроточками (например, при частотно-модулированном растривании), чтобы имитировать, наиболее плавные переходы серых тонов.

Растровая точка – элемент растровой структуры при автотипном растривании (воспроизведении цветных полутоновых оригиналов способами офсетной и высокой печати), обладающий круглой, эллиптической, ромбообразной или квадратной формой.

Растискивание – разница между относительной площадью растровой точки (в процентах) фрагмента оттиска и относящейся к нему площади точки (в процентах) на фотоформе.

Резкость изображения – характеристика, определяемая шириной зоны перехода (размытия) на границах мелких деталей изображения. Мерой резкости служит разрешающая способность репродукционного или печатного устройства.

Света (высокие света) – светлые тона позитивного изображения и соответствующие им участки негатива.

Смещение цветов (смещение красок): 1) **аддитивное**, при котором излучения различных цветов накладываются одно на другое и формируют впечатление цвета. Красный, зеленый и синий (как на экране телевизора) – цвета аддитивного синтеза: Когда друг на друга накладываются основные цвета равной интенсивности, образуется белый цвет; 2) **субтрактивное**, при котором из белого цвета вычитаются различные цветовые составляющие (например, посредством фильтров проходящего света). Основные краски субтрактивного синтеза – голубая, пурпурная и желтая – используются в полиграфии. Если все эти краски наложить одна на другую (на белой бумаге), возникает черный цвет.

Спектрофотометр – прибор, предназначенный для измерения спектральных характеристик цветных образцов.

Треппинг – это: 1) характеристика восприятия краски при многокрасочной печати с наложением; 2) небольшое

перекрытие одной краски другой или создание ловушек для подводки одной краски под другую в репродукционных процессах на стыке равномерных разнокрасочных площадей изображения.

Холодные цвета – голубозеленые, голубые, голубосиние, синие и синефиолетовые.

Хроматические цвета – все спектральные и многие природные цвета, обладающие цветовым тоном (кроме черного, белого и серого, которые относятся к ахроматическим цветам).

Цвет (*англ.* color) – характеристика зрительного ощущения, позволяющая наблюдателю распознавать качественные различия излучений, обусловленные спектральным составом отраженного или пропущенного света. Цвет описывается тремя величинами: цветовой тон, насыщенность и светлота.

Цветность – качественная характеристика цвета, определяемая его координатами либо совокупностью цветового тона и чистоты цвета.

Цветоведение – комплексная наука о цвете, включающая:
а) систематизированную совокупность данных физики, физиологии, психологии и смежных с ними разделов науки, изучающих природный феномен цвета; б) данные философии, эстетики, теории и истории искусства, этнографии, филологии, теории и истории литературы, изучающих цвет как явление культуры.

Цветопроба (пробный оттиск) – способ контроля качества допечатных и печатных процессов по критерию цветовоспроизведения, размещения информации или образец при печати тиража. Различают аналоговую и цифровую пробы. Аналоговая изготавливается с цветоделенных фотоформ, например, полученных фотомеханическим путем. Цифровая – из цифрового массива данных на цветном печатающем устройстве (в большинстве случаев струйным или термосублимационным способом). Ожидаемый результат тиражной печати может быть максимально близким к пробе, что достигается использованием системы управления цветом.

Цветовая гармония – закономерное сочетание цветов на плоскости, вызывающих положительную психологическую оценку с учетом всех их основных характеристик.

Цветовое зрение – способность человеческого глаза различать цвета.

Цветовое пространство CIE – независимое от аппаратного средства цветовое пространство XYZ, в котором каждый представленный цвет описывается своими нормированными цветовыми величинами.

Цветовое пространство CIELAB – независимое от аппаратного обеспечения цветовое пространство, в котором нормированные цветовые величины Y, x, y пересчитываются в равноконтрастные – L^* , a^* , b^* ; L^* . Означает светлоту; a^* – красно-зеленую область цвета, b^* – желто-голубую.

Цветовой ряд – последовательность цветов, у которой хотя бы одна характеристика общая, а остальные изменяются.

Цветовой тон – качество цвета, позволяющее дать ему название (красный, синий и т.д.). Измеряется длиной волны преобладающего в спектре данного цвета излучения. Ахроматические цвета не имеют цветового тона.

Цветоделенная фотоформа (негатив или диапозитив) – это разложение цветного оригинала соответственно краскам полиграфического синтеза – голубой, пурпурной, желтой, черной. Ранее это выполнялось с помощью цветоделительных светофильтров, а сейчас в основном с использованием соответствующих программных средств на основе цифрового описания оригинала.

Эффект Пуркинье – уменьшение субъективной яркости красного света по сравнению с яркостью синего, происходящее без изменения спектрального распределения. Это явление объясняется тем, что при переходе от дневного зрения к ночному и изменении кривой относительной видности максимум смещается в сторону более коротких волн.

СМУК – стандартизированная система представления цвета в пространстве автотипного синтеза (воспроизведения цветных полутоновых оригиналов способами офсетной и высокой печати). Основными красками печатного

четыре красочного синтеза CMYK являются Cyan (голубая), Magenta (пурпурная), Yellow (желтая) и Key (черная). Координаты CMYK применяются для управления цветопередачей и выражаются в величинах относительных площадей растровых точек.

Color Management – управление цветом. Способ и система согласования работы отдельных устройств и машин на основе цифровых данных с целью получения печатного продукта. Служит для обеспечения эффективности и качества производства, включая ввод (например, посредством сканера) и вывод информации на различные носители и с применением разных технологий печати.

RIP (Raster Image Processor) – растровый процессор, который преобразует описание полосы в цифровом виде, включая растровые изображения, текст, графические элементы и команды позиционирования, в битовый массив. Важными составляющими работы RIP являются растривание и управление выводным устройством.

Spot Color – краска, используемая в печати дополнительно или вместо стандартных красок для четырехкрасочной печати CMYK. Применяемая для печати цвета, выходящего за цветовой охват стандартной триады Spot Color обеспечивает также большую стабильность воспроизведения цвета (например, логотипов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шашлов А.Б., Уарова Р.М., А.В. Чуркин.* Основы светотехники. Учебник для вузов. МГУП: 2002 -280 с.
2. *Фрэзер Б., Мэрфи К., Бантинг Ф.* Управление цветом искусство допечатной подготовки. К: ООО «ТИД «ДС», 2003 – 464 с.
3. *Домасев М.В., Гнатюк С.П.* Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб: Питер. 2000 – 224 с.
4. *Фомин С.В.* Теория цвета. Теория системы управления цветом. Р1. // [www. specialist.ru](http://www.specialist.ru).
5. *Волкова Л.А., Решетникова Е.Р.* Технология обработки текстовой информации. Часть 1. Основы технологии издательских и наборных процессов. Учебное пособие. – М.: МГУП, 2002.
6. *Гарри Г. Филд.* Пер с англ. Веневцева М.В. Цветопередача в полиграфии. М.: Принт-Медиа Центр, 2005 – 188с.
7. *Гасов В.М., Цыганенко А.М.* Информационные технологии в издательском деле и полиграфии. Книги 1,2. – М.: Изд-во МГУП, 1998.
8. *Гельмут Киппхан.* Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства. Пер. с нем. – М.: МГУП, 2003.
9. *Джон Пикок.* Издательское дело. Книга от замысла до упаковки. – М.: ЭКОМ, 2002.
10. *Донни О. Квин.* Допечатная подготовка. М. – СПб. – Киев: 2002.
11. *Ефимов М.В.* Теоретические основы переработки информации в полиграфии: Учебник для вузов: В 2-х кн. – М.: МГУП, 2001.
12. *Миронова Л.Н.* Цветоведение. – Минск: Высшая школа, 1984.
13. *Петров К.Е.* Справочник по полиграфии. – М.: КРОУ, 1998.
14. *Полянский Н.Н.* Технология полиграфического производства. – М.: Книга, 1991.
15. *Раскин А.И., Ромейков И.В. и др.* Технология печатных процессов. – М.: Книга, 1989.

16. Самарин Ю.Н., Шапошников Н.П., Сияк М.А. Печатные системы фирмы Heidelberg. Допечатное оборудование. – М.: Изд-во МГУП, 2000.
17. Холопов Ю.Н. Гармония: Теоретический курс. – СПб.: Лань, 2003.
18. Цойгнер Герхард. Учение о цвете. М. Стройиздат. 1971.
19. Шашлов Б.А. Цвет и цветовоспроизведение. – М.: МГУП, 2003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.	ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТА.....	5
1.1.	О восприятии цвета.....	5
1.1.1.	<i>Обоснование различий цветов.....</i>	5
1.2.	Устройство глаза как оптической системы	10
1.2.1.	<i>Характеристика цвета в зависимости от его воздействия на организм человека.....</i>	10
1.2.2.	<i>Индивидуальность восприятия цвета</i>	11
1.2.3.	<i>Ассоциативный ряд</i>	12
1.2.3.	<i>Иллюзорность цвета</i>	13
1.2.4.	<i>Некоторые секреты достижения гармонии.....</i>	14
2.	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА.....	16
2.1.	Природа и свойства излучений.....	18
2.2.	Энергетическая система единиц.....	21
2.3.	Световая система единиц.....	26
2.4.	Источники излучения и их классификация	35
2.4.1.	<i>Люминесценция. Люминесцентные источники излучения.....</i>	44
2.4.2.	<i>Лазеры.....</i>	47
3.	ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ГЛАЗ КАК ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ.....	56
3.1.	Адаптация. Механизм адаптации.....	68
3.2.	Спектральная чувствительность глаза	69
3.3.	Основы теории цветового зрения.....	72
4.	ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦВЕТА.....	75
4.1.	Субъективные и объективные характеристики цвета.....	78
4.2.	Метамеризм цвета. Виды метамеризма.....	83
4.3.	Синтез цвета.....	84
4.4.	Основные цвета аддитивной смеси.....	86
4.5.	Основы субтрактивного синтеза.....	93
5.	ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТА.....	104
5.1.	Цветовое пространство.....	104

5.1.1.	Законы цветового пространства.....	104
5.2.	Принципы построения колориметрических систем.....	106
5.2.1.	Основы колориметрической системы CIERGB.....	111
5.2.2.	Основы стандартной колориметрической системы CIEXYZ.....	112
5.3.	Особенности равноконтрастной системы CIE.....	113
5.4.	Системы спецификации цветов. Цветовые атласы	115
5.4.1.	Стандартные источники света CIE.....	116
6.	УПРАВЛЕНИЕ ЦВЕТОМ.....	118
6.1.	Пространство привязки профилей.....	122
6.2.	Модуль управления цветом.....	124
6.3.	Цели цветопередачи.....	127
6.4.	Преобразование изображения с помощью профилей.....	133
7.	ПОНЯТИЕ О ПРОФИЛЕ УСТРОЙСТВ.....	138
7.1.	Классы профилей устройств.....	138
8.	КАЛИБРОВКА И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА.....	151
9.	ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА.....	170
9.1.	Денситометрия.....	170
9.1.1.	Действие поляризационных фильтров.....	174
9.1.2.	Денситометрическая система измерений	176
9.2.	Спектральное измерение цвета.....	178
9.3.	Контроль изображения.....	181
9.3.1.	Приводка красок.....	183
	ГЛОССАРИЙ	187
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	195

Учебное издание

Шолпан Кабыжановна Сакабекова

ТЕОРИЯ ЦВЕТА И ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Учебное пособие

Нач. ОПП ИУ

Л. Т. Касжанова

Редактор

С.Е. Симицына

Компьютерная верстка

Л. Т. Касжанова

Подписано в печать 27.09.2017 г.

Тираж 300 экз. Формат 60×84 1/16.

Бумага типографская №1.

Уч.-изд. л. 12,3. Усл. п.л. 11,4. Заказ № 804.

Цена договорная.

Издание Казахского национального исследовательского
технического университета имени К.И. Сатпаева

Департамент маркетинга и коммуникаций КазННТУ,

Издательское управление

г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-323-088-7



9

7 8 6 0 1 3 2 3 0 8 8 7