

Н. НЮБЕРГ

ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА И ЦВЕТОВЫЕ СТАНДАРТЫ

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1933**

47-44
**СТАНДАРТИЗАЦИЯ И
РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ**

Н. НЮБЕРГ

Э43

ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА И ЦВЕТОВЫЕ СТАНДАРТЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СТАНДАРТИЗАЦИЯ и РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ
МОСКВА 1933

1
8068

129817
63

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции	3
Библиография	4
Значение цветковых измерений для промышленности	5
Цветовая терминология	8
Элементы теории цвета и цветковых измерений	13
Пространственная интерпретация цвета	23
Краткие сведения по физиологии зрения	31
Цветовые номограммы	39
Цветовые измерительные приборы	43
Точность цветковых измерений и вопрос о допусках по цвету	58
Стандартные условия ведения цветковых измерений	64
Существующие стандарты	68
Цветовые шкалы и атласы	88
Приложения	97

ОТ РЕДАКЦИИ

Необходимость стандартизации в области колориметрии — введения стандартов на цвета—представляется в настоящее время настолько очевидной, что за рубежом уже имеется ряд попыток ввести в действие международные стандарты в этой области. Аналогичная работа ведется и у нас, в СССР.

Насколько велика необходимость в точном измерении и обозначении цвета, показывает следующий пример. Предполагая созвать Всесоюзную конференцию по цветоведению, Наркомтяжпром запросил ряд промышленных технических и научных учреждений о желательности созыва такой конференции и вообще о размерах потребности в точном измерении и обозначении цветов. Из полученных более чем 60 ответов явствует, что созыв конференции представляется совершенно своевременным и необходимым. Потребность в точных колориметрических методах существует и в объединении «Сталь», и у Электрозавода, и в целом ряде текстильных, анилинокрасочных, лакокрасочных, геологических, минералогических, транспортных, полиграфических, сельскохозяйственных и других организациях.

Все эти организации, объединения и заводы найдут в книге Н. Нюберга ряд полезных указаний в деле цветовых измерений, пропаганда которых в советской промышленности сейчас является одной из очередных задач. Кроме того настоящее издание знакомит читателя с основными проблемами, стоящими в области стандартизации цвета. Наконец эта книга может служить введением к чтению более подробных и более сложных трудов по колориметрии, дающих весь математический и цифровой материал, необходимый для цветовых измерений и расчетов.

БИБЛИОГРАФИЯ

На русском языке имеются следующие книги, посвященные вопросам цвета.

Н. Т. Федоров, Современное состояние колориметрии.

Н. Д. Ньюберг, Курс цветоведения.

Л. Рихтер, Основа учения о цвете (популярная).

См. также Справочник Технической энциклопедии, т. IX, где приведено большое количество числовых данных.

Важнейшие теоретические труды:

Jsaak Newton, Optiks (имеется русский перевод). Исаак Ньютон, Оптика. «Классики естествознания», книга 17. Госиздат, 1927 г.

J. S. Maxwell, Sc. Papers, Cambridge. 1898 г.

H. Grassmann, Pogg. Ann. 89, 1853 г.

Его же, Phyl. Mag. (4) 7, 1854 г.

H. Helmholtz, Handbuch der Physiol. Optik.

E. Schrödinger, Ann. d. Physik (4) 63 1920 г.

R. Luther, Z. S. f. Techn. Physik 8, 1927 г.

N. Nyberg, Z. S. f. Physik 52, 5—6 1928 г.

A. König, Physiologische Optik (является первой частью XX тома Сборника монографий: «Handbuch der Experimentalphysik»). Монография, излагающая наиболее важные цветовые работы, опубликованные в журнальной литературе. Содержит описания большого количества различных измерительных приборов и обширную библиографию. Недостаточно критическое изложение. Имеются ошибки.

E. Schrödinger Gesichtsempfindungen I Hand. der Physik Müller Pacillet 1929 г.

Много библиографических указаний имеется также в статье: Guild. Survey of Modern developments in Colorimetry proceedings of the optikal Conventions, 1926 г., а также в обзоре литературы по цвету H. Parsons «An Introduction to the study of colour vision, 1924. B. Judd — Bur. of stand. Journ. of Research № 4 1930 г., где имеется также много библиографических указаний и недурно изложен вопрос о преобразованиях кривых сложения, — в частности приведено большое количество таких кривых для различных исходных цветов.

ЗНАЧЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Почти всегда и во всех отраслях промышленности опытный работник может многое сказать о качестве, о ходе технического процесса, об имеющихся неправильностях и т. п. с одного лишь взгляда на доставляемое сырье, на находящийся в процессе обработки материал или готовую продукцию. Но такое суждение «на глазок» считается, и совершенно правильно, неприемлемым для крупного производства; там, где это возможно, определение «на глазок» стремятся заменить измерительным контролем во время самого технологического процесса и вне этого процесса в специальных заводских лабораториях. И все же в ряде случаев, в той или иной мере, такой контроль все же ведется именно «на глазок», так как не везде и не всегда возможно найти достаточно удобные в производстве методы измерения.

Суждение по внешнему виду, всегда являясь в той или иной мере суждением по цвету, не может считаться чем-то принципиально неправильным, частичным доказательством чему служит хотя бы широкое распространение суждений по цвету; беда только в том, что здесь отсутствует объективная гарантия правильности суждения. Отсутствие гарантии и препятствует введению в нормы, в стандарты и в технические условия цветовых требований как косвенного показателя качества, хотя в случаях, когда цветовые особенности выражены особенно ярко, их можно встретить в большом числе стандартов.

Дело в том, что цвет не есть что-либо чисто субъективное. Цвет определяется составом света, который, отражаясь от данного объекта, попадает в наш глаз. Иными словами, цвет определяется объективными оптическими свойствами вещества; оптические же свойства часто являются очень показательными для состава и структуры вещества, которыми и определяются его технологические свойства.

За последние годы оптические методы исследования (спектроскопические, поляризационные, рентгеновские и др.) начинают получать широкое распространение в науке и технике в качестве косвенных методов исследования. Это тесно связано с возросшим интересом к структуре вещества. В самом деле, хотя оптические методы во многих случаях дают прекрасное оружие качествен-

ного и даже количественного анализа (особенно для определения весьма малых примесей), но на этом поприще им приходится конкурировать с прямым химическим анализом. В вопросе же исследования структуры оптические методы часто являются единственными, так как большинство других методов не позволяет исследовать структуру, не разрушая ее, а это в случаях сложной структуры препятствует уже самому исследованию.

Когда встает вопрос о сравнительно грубой структуре, ее еще можно рассмотреть в микроскоп, но более мелкая структура и для микроскопа недоступна. Недоступная непосредственному наблюдению структура начинается примерно с размеров 1μ . Эта величина имеет порядок длины волны видимого света (от $0,72$ до $0,38\mu$), а потому структура такого порядка не может не сказываться на цвете вещества. Едва ли нужно останавливаться на вопросе, насколько большое значение имеет микроструктура для практических выводов, так как в этой структуре, несомненно, кроются причины, обуславливающие многие крайне важные технологические свойства. Недаром именно по внешнему виду, «на глазок», чаще всего и оценивается материал с технологической стороны.

Особый интерес и важность представляет чрезвычайная чувствительность оптических методов, которые в области элементарного анализа конкурируют с химией, особенно там, где идет речь о чрезвычайно малых примесях. Например в Ленинградском оптическом институте разработан метод количественного определения примеси хрома к оптическому стеклу по цвету стекла, причем таким способом можно установить размеры примеси и в тех случаях, когда химическим путем не удастся обнаружить даже следов хрома. Точно так же под влиянием того или иного воздействия (например температуры) во многих случаях изменение цвета вещества начинается до наступления заметного изменения технологических свойств. Здесь высокая чувствительность оптических свойств к происходящим структурным изменениям может быть использована (а «на-глазок» используется иногда и сейчас) для своевременной сигнализации о ходе технологического процесса или его неправильностях.

Оптические свойства вещества в отношении видимого света наиболее полно исследуются с помощью спектрального анализа. Но спектрофотометрия обладает рядом свойств, делающих ее во многих случаях неприемлемой. Во-первых, спектрофотометры громоздки и дороги, вследствие чего ими можно пользоваться преимущественно в лабораторных условиях. Затем самые измерения длительны, а для исследования отраженного света подчас и очень затруднительны из-за малой светосилы спектрофотометров (свет, прошедший через узкую щель, разворачивается в целый спектр). Наконец, как это ни парадоксально, самая полнота спектральных измерений является нередко недостатком, так как установить эмпирическую связь между формой кривой и инте-

реующим свойством — дело далеко не легкое, вследствие чрезвычайного разнообразия кривых по форме.

За последнее время все чаще приходится встречаться со случаями применения измерений с помощью фотоэлементов и светодиффракционных фильтров.

Связь между результатами цветовых измерений и спектральным составом света совершенно такова же, как между составом света и показаниями фотоэлементов. Цветовые измерения дают сразу три числа, характеризующие свет, и в этом отношении наш глаз заменяет работу трех фотоэлементов с чувствительностями в разных частях спектра (см. стр. 33 и стр. 57). Вследствие этого едва ли могут быть основания отвергать наблюдения человеческого глаза.

Цветовые измерения обладают рядом других крупных преимуществ. Главнейшее из них заключается в том, что цветовые измерительные приборы чрезвычайно просты по конструкции, дешевы и портативны и в то же время дают возможность получать довольно значительную измерительную точность.

Против цветовых трехцветных измерений иногда возражают, как против метода субъективного по существу, но ведь и спектрофотометрические измерения, не являясь субъективными по существу, в большинстве случаев ведутся тоже субъективными методами. При спектрофотографии, кроме субъективной оценки степени почернения, имеется еще своего рода «субъективность» в виде спектральной чувствительности пластинок, которая во всяком случае значительно изменчивее спектральной чувствительности глаза.

Наконец, ряд цветовых измерений получил уже признание на практике, особенно так называемые гетерохромные измерения яркости цвета, с которыми мы имеем дело в оптических пирометрах или в колориметре Дюбоска для определения концентрации растворов. Интересно заметить, что эти гетерохромные измерения значительно более субъективны, чем трехцветные, получили же они распространение главным образом благодаря большой их простоте.

После всего сказанного возникает вопрос, почему же трехцветные измерения до сего времени распространялись сравнительно мало? Трехцветные измерения возникли довольно давно и первоначально были разработаны физиками (Ньютон, Максвелл), а прекрасное математическое обоснование им дал математик Грассман, творец векторного анализа. Но впоследствии трехцветные измерения были окончательно вытеснены из области физики более подробными спектральными, и с тех пор вопросами науки о цветах занимались почти исключительно психологи. Но их сравнительно мало интересовала количественная сторона явлений, а потому цветовые измерения были забыты настолько основательно, что до сих пор приходится встречаться с «открыванием» давно известных фактов или с употреблением давно разоб-

леченных, неверных представлений. Все лица, сколько-нибудь близкие к технике, а в том числе и представители точных наук, по большей части даже не знают о существовании трехцветных цветовых измерений.

Толчком к развитию науки о цвете в послевоенные годы послужила теория известного химика Оствальда, который, осознав чрезвычайную практическую ценность цветовых измерений, обратился к работам по трехцветным измерениям, но, не поняв их (и в особенности математических работ Грассмана), создал теорию, полную крупных ошибок.

Несмотря на это, вопрос оказался настолько назревшим, что теория Оствальда и его методы измерения начали чрезвычайно быстро распространяться. Правда, к настоящему времени оствальдовские измерительные приборы и его теория вполне доказали свою практическую и теоретическую непригодность, но возгоревшиеся вокруг этой теории споры пробудили интерес к старому трехцветному способу измерения, который и стал таким путем известен в более широких кругах, в том числе среди работников, близких к промышленности.

За последние годы трехцветные измерения стали вводиться в производственную практику (особенно в Америке) и показали свою большую практическую ценность.

К сожалению, в настоящее время почти нет еще руководств (если не считать отдельных научных статей) по цветовым измерениям, свободных от довольно грубых иногда ошибок, и в особенности таких руководств, которые делали бы упор на объективной стороне этих измерений.

Настоящая книга предназначена для восполнения этого пробела и входит в систему мероприятий по пропаганде трехцветных измерений, которые были признаны необходимыми совещанием по цветоведению, состоявшимся в апреле 1932 г. в Наркомтяжпроме.

ЦВЕТОВАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Ни один из наших органов чувств не способен к такому разнообразию ощущений, как орган зрения. Человеческий глаз в состоянии различать до нескольких десятков тысяч различных оттенков цвета, не говоря уже о различии форм цветного пятна, т. е. комбинаций цветов (в простейшем случае: пятно и фон), о которых мы здесь говорить не будем. Задача обозначения цветов при таком их обилии, естественно, является в достаточной мере сложной.

Но вопрос осложняется, кроме того, необычайной запутанностью и противоречивостью способов словесного обозначения цвета, которыми мы пользуемся в жизни. Поэтому, прежде чем излагать факты из области цвета и развивать теорию цвета, приходится условиться относительно точной цветовой терминологии.

Точное определение словами любого цветового оттенка, очевидно, является невозможным вследствие большого их количества, а потому точная ссылка на цвет возможна лишь посредством указания способа осуществления данного цвета. И действительно, в текстильной, меховой, лакокрасочной и других отраслях промышленности, где точное указание цвета является абсолютно необходимым, постоянно пользуются цветовыми накрасками — образцами.

Но ссылка на образец, при всех ее преимуществах, обладает и крупными недостатками.

Во-первых, образцы нередко довольно значительно меняют свой цвет с течением времени (в частности, выгорают), изготовление же новых образцов сопряжено со значительными трудностями. В самом деле, для воспроизведения образца необходимо в первую очередь указание рецептуры, но цвет нередко обладает значительно большей чувствительностью, чем химические методы исследования, так что примесь, не обнаруживаемая химическим путем, может заметно изменить цвет.

Кроме химического состава красителя, большое влияние на цвет имеют многие другие факторы, часто трудно поддающиеся достаточно точной проверке, как например: толщина слоя краски, связующее вещество, которым разведен пигмент, и т. д. Все это убеждает в том, что контроль цвета с нужной степенью точности может осуществляться лишь путем оптических методов.

Осуществление цвета светом является способом наиболее универсальным и прямым, так как ощущение цвета вызывается действием на глаз света, и если мы видим цвета тех или иных предметов, то только потому, что от них исходит собственный или отраженный свет.

При соблюдении известных условий наблюдения цвет вполне определяется составом света, попадающего в глаз. Кроме того измерения света (спектральные) легко могут быть доведены до пределов зрительной точности, а с применением объективных методов измерения могут быть сделаны и еще более точно. Поэтому осуществление цвета через свет и кладется в основу точной научной терминологии цвета.

Спектр, состоящий из ряда чисто монохроматических лучей света, представляет собою набор неизменных стандартных эталонов цвета, которые можно характеризовать со всей необходимой точностью длиной их волны и амплитудой, т. е. количеством света, выраженным в энергетических единицах. Однако спектр не исчерпывает всех цветовых возможностей, так как в нем отсутствует целый ряд цветов.

В первую очередь сюда относятся цвета ахроматические, т. е. всевозможные серые цвета, начиная от самых темных до белого, а также пурпуровые цвета, образующие непрерывный переход цветных оттенков между крайним фиолетовым и крайним красным цветом спектра, и, наконец, всякие сероватые и белесоватые

цветные оттенки. Все цвета, которые отсутствуют в спектре, мы можем видеть только тогда, когда на глаз действует сложный свет, состоящий из колебаний различных периодов.

Белый цвет — это тот цвет, который имеет поверхность, рассеянно отражающую весь падающий на нее свет в условиях дневного освещения (точное определение понятия белого цвета см. ниже, стр. 69 и сл.). Иначе говоря, белый является цветом, возникающим при одновременном действии на глаз всех лучей видимого света, взятых в тех количествах, в каких они имеются в спектре дневного освещения.

Однако тот же самый белый цвет можно получить не только этим путем, но и бесконечным числом различных способов. В частности, мы его видим всякий раз, когда на глаз действует свет только двух волн различной длины, если только эти волны выбраны надлежащим образом и входят в состав данного света в определенных количествах (т. е. с определенным отношением лучистой энергии). Как известно, такие пары спектральных носят название дополнительных пар. Понятие дополнительности можно расширить и считать дополнительными по цвету два любых световых потока (может быть, и не монохроматических), которые при смешении их в известных количествах в один поток могут дать поток белого цвета.

Во многих вопросах цветоведения и почти во всей фотометрии белый и серый цвета друг от друга не отличают, так как оценка цвета как белого, так и серого всегда является только сравнительной оценкой. Один и тот же предмет может оцениваться нами как белый или серый в зависимости от того, имеется ли перед глазами другой цвет, более светлый, чем данный, или его не имеется. Так, например, мы считаем бумагу белой, но если провести по ней черту мелом, то бумага будет уже оцениваться, как сероватая, а мел, как белый. Если в свою очередь сравнить мел с пластинкой, покрытой магниезией, то самый мел покажется серым. Поэтому можно сказать, что серый цвет есть ослабленный (в смысле количества лучистой энергии) белый, оцениваемый по сравнению с этим белым.

Пурпуровые цвета так же, как сказано, возникают под действием лишь составного света. Пурпуровые цвета, которые получаются под действием света, состоящего только из самого крайнего красного и самого крайнего фиолетового, называются чистыми пурпуровыми. В зависимости от относительного количества красного и фиолетового в составе цвета, пурпуровые различаются по оттенкам, образуя непрерывный переход от фиолетового к красному. Они как бы замыкают спектр в круг.

В цветоведении чистые пурпуровые цвета, которые с точки зрения физики являются составными, играют почти ту же роль, что и чистые спектральные. Поэтому нередко говорят о спектральном «круге» цветов, как бы включая пурпуровые в число спектральных, что с точки зрения физики было бы неправильным

Однако, ввиду удобств присоединения чистых пурпуровых к чистым спектральным, мы будем в дальнейшем нередко объединять эти цвета.

Как установлено опытом, всякому чистому спектральному (а с включением пурпуровых—и пурпуровому) цвету соответствует один и только один чистый спектральный (или пурпуровый) цвет, являющийся для него дополнительным. В частности, дополнительными к пурпуровым цветам являются зеленые спектральные, длиной волны примерно между 495 и 570 м μ . Длина волн цветов, дополнительных к пурпуровым, служит для обозначения пурпуровых цветов, оттенков которых определяется этим путем для чистых пурпуровых со всей необходимой точностью.

Таким образом мы видим, что уже среди чистых спектральных цвет может различаться в различных отношениях: во-первых, вдоль по кругу (т. е. для чистых спектральных в зависимости от длины волны), а, во-вторых, по количеству света, т. е. по лучистой энергии колебаний. Поэтому говорят о различных свойствах цвета: о «цветовом тоне» — свойство, зависящее от длины волн, и о «яркости» — свойство, зависящее от количества лучистой энергии данной длины волны.

Вводя термин «яркость», научная терминология вступает в конфликт с противоречивостью терминологии, употребляемой в обыденной жизни. Если речь идет о цвете источника света, то общеупотребительное выражение «яркость» имеет то же самое значение, как и научный термин, т. е. характеризует количество лучистой энергии. Так мы говорим «яркая лампа», «яркое освещение» в смысле силы света, причем ярким может быть и белый свет.

В отношении же окрашенных предметов слово «яркий» в обыденной речи имеет совершенно другое значение. Так, выражение «яркая окраска» подразумевает, главным образом, чрезвычайно сильную выраженность цветового тона и не применимо, например, к серому. Для белой окраски, впрочем, иногда, хотя и не часто, говорят «яркий» в том же смысле, как и для источников света.

Наоборот, сравнивая два окрашенных предмета, из которых один отражает больше света, чем другой, т. е. фактически дает световой поток большей яркости, мы говорим, что первый окрашен «светлее».

При сколько-нибудь строгой трактовке вопросов невозможно строить терминологию при наличии таких противоречий, поэтому в качестве основного научного термина слово «яркость» принято в том его значении, в каком оно понимается в фотометрии, т. е. для источников света. В тех же случаях, когда речь заведомо идет о цвете окрашенного предмета, нередко употребляют в качестве вспомогательного термина выражение «светлота». Необходимо, однако, твердо помнить, что в науке о цвете свет-

лота и яркость определяют одно и то же свойство цветового ощущения¹.

Поскольку яркость с точки зрения физики характеризует количество света данного состава, яркость нередко называют также «количеством» цвета, а цвета, различающиеся только по яркости, называют цветами качественно одинаковыми, или еще цветами «одинакового типа раздражения» («Farben gleicher Reizart»). Выделение яркости, как количества цвета, оказывается особенно удобным в измерительной практике.

Цветовой тон и яркость являются исчерпывающими характеристиками только для чистых спектральных цветов. Цвета же, возникающие под действием смешанного света, могут отличаться от чистых спектральных, а также и между собой еще в одном отношении, а именно: быть более белесоватыми (сероватыми) или более близкими к чистым спектральным. Это третье свойство цвета носит название *насыщенности* и считается достигающим максимального значения для чистых спектральных (или пурпуровых) и равным нулю для цветов ахроматических, т. е. белого и серых.

Основные свойства цвета (цветовой тон, яркость-светлота и насыщенность) для всех цветных оттенков определяются следующими условиями, позволяющими в каждом отдельном случае экспериментально проверить одинаковость или различность данных двух цветов в отношении любого из этих свойств.

Если одним только равномерным для всех длин волн усилением или ослаблением силы света (количества лучистой энергии) можно довести один световой поток по цвету до неотличимости от другого, то оба потока считаются различающимися только в отношении яркости. Вызываемое ими ощущение цвета обладает одинаковым цветовым тоном и насыщенностью. Такие цветовые ощущения называются цветами одинакового типа или качественно одинаковыми.

Световые потоки считаются одинаковыми по цветовому тону, но различными по насыщенности, если посредством прибавления к одному из них известного количества белого цвета можно получить поток, по цвету неотличимый от другого. Тот из цветов, к которому требуется прибавить белого света, чтобы получить другой, считается более насыщенным². Сравнение по насыщенности цветов различного цветового тона чрезвычайно затруднительно и обычно его не делается.

Таким образом всякие два цвета можно сравнивать в отношении одинаковости или различия их по цветовому тону.

¹ Термином „светлота“ принято также обозначать определенные единицы измерения яркости, определяемые по отношению к яркости некоторого света, принимаемого за белый. Такой способ измерения яркости применяется именно к цвету окрашенных предметов.

² Наиболее распространенный в настоящее время способ измерения насыщенности дает числа, которые принято называть „чистотой“ цвета (см. ниже стр. 27).

Если цветовой тон одинаков, цвета можно сравнить по их насыщенности, а если цветовой тон и насыщенность одинакова, цвета можно сравнить по яркости (светлоте). Поэтому-то для сравнения цветов между собой и нет необходимости сравнивать по насыщенности цвета, различные по цветовому тону, или сравнивать по яркости цвета, различающиеся по тону или насыщенности.

Впрочем, иногда приходится встречаться с непосредственным сравнением по яркости (светлоте) цветов, качественно различных (так называемая гетерохромная фотометрия), но это уже совершенно особый метод цветовых измерений (см. стр. 25).

Указанные три свойства цвета: цветовой тон, насыщенность и яркость, являются, с одной стороны, независимыми, так как каждое из этих свойств, как видно из определения, может изменяться независимо от прочих, а с другой стороны, *исчерпывающими* характеристиками цвета, так как два цвета, равные друг другу одновременно по цветовому тону, насыщенности и яркости (светлоте), не отличимы друг от друга. Последнее является следствием того экспериментального факта, что любой цвет можно подобрать с полной точностью, смешивая между собой белый и какой-либо один чистый спектральный (для пурпуровых два крайние спектральные) в определенном количестве.

Длина волны спектрального цвета (или длина волны дополнительного для пурпуровых) и количество (т. е. яркость) этого спектрального и белого являются также одной из систем измерения цвета. Зная эти величины, мы будем в состоянии в любое время осуществить данный цвет со всей необходимой точностью, а также произвести проверку, соответствует ли тот или другой цвет предъявленным требованиям. При наличии такого экспериментального метода проверки всякие иные описания цвета становятся излишними.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ЦВЕТА И ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Как сказано, получение цвета из спектральных и белого может служить основой для измерения цвета. Однако этот способ не может быть признан наиболее удобным в экспериментальном отношении (в частности потому, что требует разложения света в спектр) или наиболее целесообразным с теоретической точки зрения. Для того чтобы разобраться в существующих способах измерения цвета и узнать способы пересчета показаний одного прибора на показания другого, необходимо остановиться на вопросе о теории цветовых измерений.

Вводя цветовые измерения, мы тем самым рассматриваем цвет как величину, и нам необходимо установить характер этой величины. Цвет, рассматриваемый как величина, есть величина *векторная трех измерений*, причем во всех принятых системах измерения цвета абсолютная величина цветового вектора характери-

зует собою яркость или «количество» цвета, а направление этого вектора в пространстве характеризует «качество» цвета, т. е. его цветовой тон и насыщенность. Самое же важное свойство векторного изображения цвета состоит в том, что цвет светового потока, составленного из двух или нескольких световых потоков всегда изобразится суммой (равнодействующей) векторов, изображающих цвет складываемых световых потоков.

Полное обоснование законности приложения векторного анализа к цвету завело бы нас слишком далеко, и поэтому оно здесь не излагается¹.

Однако следует особенно подчеркнуть строгую доказанность возможности векторного измерения цвета, а в особенности доказанность нашего права рассматривать сложение световых потоков как векторное сложение цветов. Наличие такого доказательства дает возможность использовать некоторые формулы и термины векторного анализа, причем вектор изображает цвет, а знак $+$ означает сложение световых потоков соответствующего цвета.

Наиболее важным для цветоведения является установление путем опыта связи между всеми оттенками цвета, которые мы можем видеть, и небольшим количеством твердо фиксированных (основных или стандартных) цветов. Если эксперимент, дающий возможность установить такую связь, известен, то задача экспериментального измерения цвета тем самым будет решена; достаточно лишь фиксировать основные цвета.

Таким экспериментом является так называемое «оптическое смешение цветов», называемое также «сложением цветов». Определением оптического смешения может служить следующий пример. Предположим, что два потока света (слагаемые) действуют на глаз одновременно (например, оба потока сливаются в один, как это происходит с отдельными монохроматическими лучами в сложном свете), образуя в пределах оптической системы глаза единый поток, состоящий из суммы всех спектральных, входящих в состав каждого из слагаемых. Оптическое смешение устанавливает связь между цветами слагаемых потоков света в условиях их раздельного действия и цветом смешанного света. Полученный цветовой результат называют суммой цветов смешиваемых потоков света.

Поскольку тот или иной новый цветовой оттенок чаще всего приходится получать, смешивая не световые потоки, а краски различных цветов, постоянно приходится встречаться со стремлением установить связь между цветом смешиваемых красок и цветом получаемого результата. Однако в этом случае никакой

¹ Интересующиеся подробным обоснованием возможности векторного изображения цвета найдут его в написанной мною дополнительной главе в книге проф. Н. Т. Федорова «Современное состояние колориметрии». В дальнейшем я буду неоднократно ссылаться на это дополнение, где изложена математическая теория цвета.

однозначной связи между цветами вообще не существует. Чрезвычайно многочисленные опыты показывают, что один только цвет смешиваемых красок вообще не дает возможности сказать с какой бы то ни было точностью, каков будет цвет смеси. Иначе говоря, смешиваемые краски в двух различных случаях могут быть совершенно неотличимыми по цвету, а цвет смеси — различным. Цвет смеси красок зависит не только от цвета смешиваемых красок, но и от целого ряда оптических свойств этих красок, которые могут быть совершенно различными даже для красок, не отличимых друг от друга по цвету.

Правда, нередко указывают на существование известной, казалось бы, закономерной связи между цветами и при смешении красок, хотя бы, например, на то, что смесь желтой и синей краски дает зеленый цвет, но, во-первых, зеленые цвета получаются в отдельных случаях очень различными, так как под словом «зеленый» мы подразумеваем самые различные цвета, а, во-вторых, имеются красители, которые дают при смешивании совершенно неожиданные результаты. Так, например, яркожелтый краситель тартрацин и голубовато-синий (Blau G), если их взять в небольших количествах, дают, как обычно, яркозеленый цвет, при большей же концентрации — красно-коричневый (а при рассматривании на просвет даже яркокрасный). Если полученную от смешения этих красителей в небольшом количестве яркозеленую краску наложить на слой голубовато-синей краски, то она даст опять-таки красно-коричневый цвет.

Таким образом мы можем сказать, что смешение красок между собой (его называют субтрактивным или механическим смешением) не устанавливает никакой определенной связи между цветами, но существенно зависит от целого ряда оптических свойств смешиваемых красителей¹.

Наоборот, оптическое смешение удовлетворяет следующему закону, проверенному на огромном количестве опытов: цвет, получаемый в результате оптического смешения, единственным образом и с полной точностью определяется только цветом слугаемых потоков света².

Только благодаря справедливости этого закона мы можем говорить, что оптическое смешение устанавливает однозначную связь между цветами. Далее оказывается, что связь между цветами, устанавливаемая оптическим смешением, удовлетворяет всем так называемым основным аксиомам сложения.

На этом основании мы имеем право поставить условием для векторного изображения цвета, чтобы равнодействующей двух

¹ Подробное рассмотрение вопросов смешения красок между собой интересующиеся найдут во II главе «Курса цветоведения» Н. Нюберга, Гизлегпром, 1932 г.

² Этот закон часто называют первым законом Грассмана, различая затем еще второй и третий законы. Все они, однако, поглощаются одной общей формулировкой, приведенной ниже, которую я и буду называть просто законом Грассмана (см. стр. 17)

векторов, изображающих любые два цвета, всегда был вектор, изображающий цвет, получаемый из этих цветов в результате их оптического смешения. Самое оптическое смешение называется поэтому сложением цветов, а его цветовой результат — суммой слагаемых цветов.

Более того, исходя из понятия суммы цветов, мы можем однозначно определить понятие разности двух цветов. Эта разность является тем цветом, который, будучи прибавлен к вычитаемому цвету, даст уменьшаемый цвет. Цвет-разность изобразится при векторном изображении цвета вектором-разностью.

Следует заметить, что хотя до сего времени неизвестно такого эксперимента, который давал бы непосредственно разность двух цветов, но тем не менее разность двух цветов всегда является вполне определенным цветом. С помощью оптического сложения мы можем проверить, является ли тот или иной цвет разностью двух других или нет.

Несмотря на отсутствие экспериментальной параллели вычитанию цветов, введение понятия разности цветов чрезвычайно полезно и даже необходимо при цветовых измерениях и расчетах.

Наконец, пользуясь понятием суммы цветов, можно определить и понятие произведения отвлеченного числа (скаляра) на цвет. Определение этого понятия исходит из того, что произведение вектора на целое число мы получаем многократным сложением равных по величине, и направлению векторов. Затем определение распространяется путем обобщения вообще на любые численные множители.

При сложении одинаковых по цвету световых потоков (например, путем сложения потоков, тождественных по спектральному составу) мы имеем изменение одной только яркости цвета (см. стр. 11). Поэтому легко видеть, что произведением цвета на число будет цвет, который мы получим из данного, если лучистую энергию всех входящих в его состав чистых спектральных умножим на соответствующее число. Так, например, если какая-либо цветная поверхность освещена каким-либо источником света, то приближение или удаление источника будет производить изменение цвета поверхности, характеризуемое умножением этого цвета на величину, обратную квадрату расстояния от поверхности до источника. Понимая под яркостью количество цвета, при умножении какого-либо цвета на число (например, цвета A на число a), очень часто говорят, что цвет A взят в «количестве» a . Всякий цвет, взятый в количестве единицы, равен самому себе.

Пользуясь этими определениями, можно записывать результаты опытов оптического сложения в виде формул, применяемых для векторов. Так, например, формула

$$2A + \frac{1}{3}B = 4C, \dots \dots \dots (1).$$

где большими буквами обозначены какие-то определенные цвета, имеет следующее реальное значение: световой поток, полученный смешением потока цвета A , сила света которого удвоена, со световым потоком цвета B , взятым в количестве $\frac{1}{3}$ (ослабленный в три раза), не отличим по цвету от светового потока C , взятого в четверном количестве. Такого рода формулы, которые можно находить непосредственно из опыта, носят название «цветовых уравнений».

Так как сложение цветов удовлетворяет всем основным аксиомам алгебраического сложения, то цветовые уравнения обладают всеми свойствами обычных алгебраических уравнений. Мы можем, не нарушая равенства, переставлять порядок слагаемых, умножать обе части уравнения на любое число, делить на любое число, отличное от нуля, собирать подобные члены, складывать и вычитать уравнения, делать подстановку из одного уравнения в другое, переносить члены из одной части равенства в другую с обратным знаком.

Пользуясь этими преобразованиями, можно, найдя из опыта несколько цветовых уравнений, получить из них, как следствие, целый ряд новых цветовых уравнений, которые при опытной проверке всегда оказываются справедливыми. В частности, все перечисленные нами преобразования дают возможность решать как отдельные цветовые уравнения, так и системы уравнений относительно любого из входящих в них цветов, т. е. позволяют с помощью линейной формулы выразить один цвет через другие. Например, решая уравнение (1) последовательно относительно трех входящих в него цветов, мы можем выразить каждый из них через два других:

$$A = 2C - \frac{1}{6}B$$

$$B = 12C - 6A$$

$$C = \frac{1}{2}A + \frac{1}{12}B$$

Все эти три уравнения эквивалентны цветовому уравнению (1).

Понятие цветового уравнения, как устанавливаемого из опыта линейного соотношения между цветами, позволяет очень просто сформулировать экспериментально найденный закон Грассмана, на котором основаны все измерения цвета: Для любых четырех цветов всегда существует связывающее их линейное соотношение, причем это соотношение будет единственным, если только какие-либо три цвета из этих четырех не связаны линейными соотношениями, причем, с другой стороны, можно найти бесчисленное множество троек цветов, которые никаким линейным соотношением не связаны.

Пользуясь законом Грассмана, мы можем легко указать способ измерения цвета, на основе которого строится большинство цветовых измерительных приборов.

Для установления определенной системы (в частности и единицы) измерения выберем какие-либо три линейно независимых цвета, которые согласно второй половине закона Грассмана существуют. Будем называть эти цвета единичными или основными цветами и обозначать буквами E_1 , E_2 и E_3 .

Пусть мы имеем любой четвертый цвет X , тогда, согласно закону Грассмана, для четырех цветов E_1 , E_2 , E_3 и X существует одно и только одно линейное соотношение, которое всегда можно найти из опыта. Записав это соотношение в форме, разрешенной относительно X , мы получим формулу вида:

$$X = x_1 E_1 + x_2 E_2 + x_3 E_3 \dots \dots \dots (2).$$

где x_1 , x_2 , x_3 — какие-то три вполне определенные числа, определяемые из опыта. Эти три числа и являются численными характеристиками цвета в трехцветной системе измерения E_1 , E_2 , E_3 . В дальнейшем мы будем употреблять для этих чисел термин «координаты цвета».

Из закона Грассмана непосредственно следует, что всякому цвету соответствуют в данной измерительной системе три вполне определенных числа, находимых из опыта, и никаких других чисел из опыта получиться не может, а, с другой стороны, очевидно, что не может существовать двух различных цветов, для которых все три числа были бы одинаковыми. Иначе говоря, в указанной системе измерения любой цвет описывается исчерпывающе и непротиворечиво.

Трехцветный метод измерения цвета получает особую наглядность, если воспользоваться векторным изображением цветов.

Три единичных цвета должны изобразиться с помощью трех векторов, причем, вследствие линейной независимости этих цветов, соответствующие три вектора не должны лежать в одной плоскости¹.

Выберем эти три вектора в остальном совершенно произвольного направления (в частности, можно их взять взаимно перпендикулярными), но по длине, равными единице, и будем считать, что эти векторы изображают три выбранных единичных цвета. После этого нетрудно изобразить вектором в пространстве любой цвет вообще. В самом деле, из цветового уравнения, связывающего данный цвет X с тремя единичными (2), легко видеть, что соответствующий цвету X вектор является суммой трех векторов, по направлению совпадающих с единичными, а по абсолютной величине (если, как условлено, длина единичных векторов принята равной единице) равным коэффициентам цветового уравнения. Отсюда мы получаем геометрическое значение чисел, которыми измеряется цвет по трехцветному методу.

Численные характеристики цвета выражают собою абсолютную величину компонент цветового вектора по направлению век-

¹ Соответствующее доказательство может быть целиком взято из векторного анализа.

торов единичных цветов, причем длина компонент выражена по отношению к длине соответствующих единичных векторов.

Иначе говоря, трехцветное измерение цвета сводится к разложению цветового вектора по трем заданным направлениям, т. е. к тому способу, который более всего принят в теоретической механике для численной характеристики векторов в пространстве.

Указанный способ измерения цвета позволяет в максимально простой форме установить связь между физическим (спектральным) составом света и его цветом. Эта связь между объективным физическим явлением и нашим цветовым ощущением имеет в науке о цвете чрезвычайно большое значение. В частности, эта связь является решающей в вопросе о цвете предметов в условиях того или иного освещения, в вопросе о цвете смеси красок и т. п.

Чтобы установить эту связь, найдем из опыта цветовые уравнения, связывающие цвет монохроматических (чистых спектральных) световых потоков различных длин волн и три выбранные нами единичные цвета. Так как для полного определения цвета чистого спектрального необходимо знать не только длину его волны, но и яркость, то положим, что яркость эта будет той, которую имеет каждый из спектральных в свете какого-либо источника света. На практике обычно берут либо средний солнечный спектр, либо спектр «дневного света» (см. ниже «стандарт белого света»), либо спектр с равномерным распределением энергии (см. резолюции Международной светотехнической комиссии, стр. 97).

Три коэффициента этих цветовых уравнений будут, очевидно, функциями длины волны. Функциональную зависимость этих коэффициентов от длины волны можно графически изобразить в виде трех кривых. Такие кривые носят обычно название «кривых сложения», а сами функции соответственно называются «функциями сложения». Зная эти функции и спектральный состав какого-либо светового потока, не трудно найти координаты цвета этого потока, т. е. определить его цвет.

Функции сложения будем обозначать $A_1(\lambda)$, $A_2(\lambda)$ и $A_3(\lambda)$, причем они должны для любого λ удовлетворять условию:

$$F_\lambda = A_1(\lambda)E_1 + A_2(\lambda)E_2 + A_3(\lambda)E_3 \dots \dots \dots (3),$$

которое является цветовым уравнением, связывающим цвет F_λ спектрального света длины волны λ и три единичных цвета.

Предположим теперь, что имеем какой-либо поток света, состоящий из ряда различных спектральных, причем отношение их яркости к яркости спектральных той же длины волны в стандартном источнике света (для которого определены функции сложения) выражаются функцией длины волны $\psi(\lambda)$ ¹.

¹ Конечно, на практике это почти всегда эмпирическая функция, как впрочем и функция сложения, т. е. функция, заданная не в виде математического выражения, а таблицей значений для различных λ .

Цвет потока составлен из цвета отдельных спектральных по принципу оптического сложения, а так как каждый из спектральных цветов $F\lambda$ имеется в данном источнике в количестве $\psi(\lambda)$, то цвет потока X выразится цветовым уравнением:

$$X = F_{\lambda_1}\psi(\lambda_1) + F_{\lambda_2}\psi(\lambda_2) + \dots + F_{\lambda_n}\psi(\lambda_n) = \sum F_{\lambda}\psi(\lambda); (\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), (4)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — те длины волн, которые входят в состав данного источника.

Так как с цветовыми уравнениями мы имеем право обращаться, как с обычными алгебраическими, то, подставляя значения $F\lambda$ из уравнения (3) в уравнение (4) и собирая подобные члены, получим:

$$X = E_1 \sum A_1(\lambda) \psi(\lambda) + E_2 \sum A_2(\lambda) \psi(\lambda) + E_3 \sum A_3(\lambda) \psi(\lambda);$$

$$(\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \dots \dots \dots (5)$$

Если спектр светового потока непрерывный, то суммы заменяются определенными интегралами, распространенными на весь видимый спектр, и мы будем иметь:

$$X = E_1 \int_{380}^{760} A_1(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda + E_2 \int_{380}^{720} A_2(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda +$$

$$+ E_3 \int_{380}^{720} A_3(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (7)$$

Координатами же цвета X будут следовательно (см. формулу [2]) выражения

$$x_1 = \int_{380}^{720} A_1 \psi d\lambda; \quad x_2 = \int_{380}^{720} A_2 \psi d\lambda; \quad x_3 = \int_{380}^{720} A_3 \psi d\lambda \dots \dots \dots (6)$$

Формулы (6) являются основными формулами цветоведения, устанавливающими связь между цветом и светом. Из этих формул можно сделать ряд чрезвычайно важных выводов. Например, для того, чтобы два световых потока были неотличимы по цвету, необходимо и достаточно, чтобы все три координаты соответствующих цветов были бы равны, откуда для функций распределения энергии $\psi_1(\lambda)$ и $\psi_2(\lambda)$ получаем необходимое и достаточное условие неотличимости по цвету:

$$\int A_1 [\psi_1(\lambda) - \psi_2(\lambda)] d\lambda = \int A_2 [\psi_1(\lambda) - \psi_2(\lambda)] d\lambda =$$

$$= \int A_3 [\psi_1(\lambda) - \psi_2(\lambda)] d\lambda = 0 \dots \dots \dots (7)$$

¹Пределы интеграции выражены в *м.м.* В дальнейшем мы для краткости не будем писать этих пределов, памятуя, однако, что интегралы определены.

Из математики известно, что определенный интеграл может обращаться в нуль даже и тогда, когда подинтегральная функция не равна тождественно нулю. Из этого следует уже отмеченный выше факт, что два различные по составу световые потока могут быть, тем не менее, одинаковы по цвету, иначе говоря—цвет не определяет вполне состава света, но оценивает его состав интегрально (суммарно).

При производстве цветовых измерений нередко бывает целесообразно пользоваться различными системами единичных цветов, а поэтому важным вопросом цветоведения является пересчет одних измерений в другие.

Так как числа, характеризующие цвета, представляют собою координаты векторов в пространстве относительно той или иной системы прямолинейных осей (даваемых направлением единичных векторов), то формулы пересчета будут обычными формулами перехода от одной прямолинейной системы координат к другой. Для осуществления самого пересчета необходимо знать координаты одной системы единичных цветов в отношении другой системы (т. е. связывающие их цветовые уравнения). Предположим, что координаты цвета X в отношении системы единичных цветов A, B и C равны числам α, β, γ , а координаты цветов A, B и C в отношении новой системы единичных векторов E_1, E_2, E_3 даны в следующей таблице:

	A	B	C
E_1	a_1	b_1	c_1
E_2	a_2	b_2	c_2
E_3	a_3	b_3	c_3

Тогда координаты цвета X (x_1, x_2, x_3) в отношении системы E_1, E_2, E_3 согласно формулам векторного анализа будут:

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha a_1 + \beta b_1 + \gamma c_1 \\ x_2 &= \alpha a_2 + \beta b_2 + \gamma c_2 \dots \dots \dots (8) \\ x_3 &= \alpha a_3 + \beta b_3 + \gamma c_3 \end{aligned}$$

Формулы (8) нетрудно вывести и непосредственно из цветовых уравнений, подставляя в уравнение, выражающее X , через A, B и C выражения этих последних через E_1, E_2, E_3 и собирая подобные члены¹.

Следует между прочим заметить, что иногда одна или даже две слагающие цветового вектора (т. е. коэффициенты цветового уравнения вида [2]) в отношении выбранных трех единичных

¹ Вообще следует указать, что для цвета будут справедливы все формулы векторного анализа, в которых имеются только действия сложения и вычитания векторов и умножения вектора на скаляр (число).

оказываются отрицательными. Опыт показывает, однако, что как бы ни были выбраны единичные цвета, никогда не бывает, чтобы все три координата были отрицательны. Так как экспериментальным путем мы не умеем непосредственно находить разность двух цветов, то в случае отрицательных координат, располагая только оптическим сложением, оказывается невозможным подобрать в точности данный цвет X из трех основных (единичных). Однако, каковы бы ни были координаты цвета X , можно составить уравнение, эквивалентное уравнению (2), перенося все отрицательные члены в другую формулу, например если x_1 отрицательно, можно написать:

$$X + (-x_1) E_1 = x_2 E_2 + x_3 E_3 \dots \dots \dots (2')$$

Эта формула эквивалентна формуле (2), но в нее уже не входит действие вычитания, т. к. если x_1 отрицательно, то $(-x_1)$ положительно, и она может быть проверена опытным путем.

Формула (2') означает, что в данном случае, чтобы измерить цвет X , приходится его смешивать с цветом E_1 , а два другие единичных цвета смешивать между собой, подобрав их количества $(-x_1, x_2, x_3)$ так, чтобы результат смешения в обоих случаях был бы один и тот же. Таким образом мы получаем из опыта соотношение, связывающее измеряемый цвет X с тремя единичными, но в неявном виде относительно X . Для нахождения координат цвета X надо, написав результат опыта в виде (2'), затем решить его относительно X чисто математически. Очевидно, что слагающие относительно тех единичных цветов, которые смешивают с измеряемым цветом, получатся отрицательными.

Опыты показывают, что, как бы мы ни выбирали основные единичные три цвета, всегда найдутся такие цвета, для которых хотя бы одна из координат будет отрицательной. Поэтому при измерении тремя цветовыми эталонами, как бы мы ни выбирали эти эталоны, иногда приходится смешивать эталонные цвета с измеряемым. Этого можно избежать, имея в своем распоряжении не три, а большее количество эталонных цветов, координаты которых относительно определенных трех единичных цветов известны.

При производстве измерения из имеющихся эталонов выбирают три таких, относительно которых измеряемый цвет имел бы положительные координаты, т. е. для измерения разных цветов пользуются различными цветами в качестве единичных, а затем с помощью формулы (8) приводят результаты измерений к какой-либо одной системе.

То обстоятельство, что в процессе измерения иногда приходится смешивать измеряемый цвет с эталонными, конечно, несколько не опорочивает самых измерений, и если этого иногда избегают, то главным образом из конструктивных соображений (подробнее см. в главе «Цветовые измерительные приборы», стр. 43 и сл.).

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЦВЕТА

Основой графического изображения цвета является представление о цвете как векторе трех измерений. Выше мы уже изложили принцип подобного построения, и теперь остается только детальнее рассмотреть взаимное расположение цветов в пространстве.

Во многих случаях наряду с векторным изображением цвета бывает выгодно пользоваться также точечным, причем переход от одного к другому делается точно так же, как это делается обычно в аналогичных случаях в математике, т. е. вместо вектора берется его конечная точка в предположении, что вектор проведен из начала координат. Таким образом мы будем считать, что цвет, изображаемый каким-либо вектором, расположен в его конечной точке и в этом смысле будем говорить о взаимном пространственном *«расположении цветов»*.

Как мы уже указывали (см. стр. 11 и 16), цвета, различающиеся только яркостью (качественно одинаковые), изображаются одинаково направленными векторами, длина которых пропорциональна количеству лучистой энергии, если относительный спектральный состав потоков света одинаков. Из этого мы, во-первых, заключаем, что качественно одинаковые цвета расположены всегда на одной и той же прямой, выходящей из начала координат, причем тем дальше от начала, чем больше их яркость (светлота). Ряд таких цветов мы будем называть *«теневыми рядами»*, так как ослабление силы света, освещающего какой-либо предмет, изменяет только светлоту его окраски, оставляя цветовой тон и насыщенность неизменными. К числу теневых рядов принадлежит и бело-серый ряд, называемый *«ахроматическим»* рядом. Соответствующая ему прямая цветового пространства называется *«ахроматической»* осью.

Каждой длине волны чистых спектральных тоже соответствует некоторая прямая, так как при фиксированной длине волны может изменяться одна только яркость их цвета.

Направление прямых, соответствующих спектральным, непрерывно изменяется с длиной волны, а так как эти прямые проходят через начало координат, то все они вместе описывают некоторую коническую поверхность, которая, как показывает опыт, обладает несколько неправильной формой (см. рис. 1).

Поверхность эта разомкнута, так как крайние концы спектра—красный и фиолетовый—не совпадают по цвету, и замыкается она чистыми пурпуровыми, которые образуют плоскость (равнодействующая двух векторов всегда лежит в плоскости этих векторов, а все чистые пурпуровые являются суммой двух краиних спектральных, см. стр. 10).

Полученная поверхность выделяет некоторую область пространства, которую называют *«цветовым конусом»*. Эту область называют также *«цветовой дугдой»* (Farbendüte), чтобы

подчеркнуть, что ограничивающая поверхность не является круглым конусом.

Все цвета, которые мы можем видеть, располагаются внутри цветового конуса, а точкам вне его никаких цветов (по крайней мере, видимых в нормальных условиях наблюдения) не соответствует. Что это так, следует из следующих фактов:

1) всякий цвет является суммой спектральных, 2) поверхность цветового конуса, как показывают опыты, выпукла (см. рис. 1). 3) равнодействующая двух векторов всегда лежит между этими векторами.

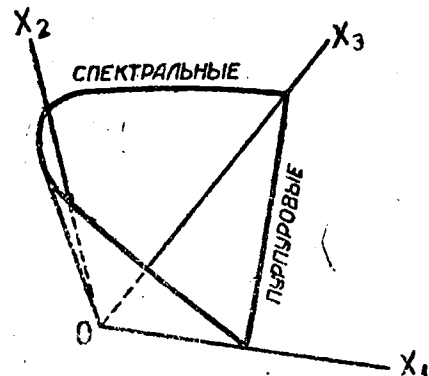


Рис. 1. Расположение цветов в пространстве OX_1, OX_2, OX_3 — направления единичных векторов E_1, E_2, E_3 .

В середине цветового конуса лежит ахроматическая ось, причем не трудно видеть, что все цвета одинакового цветового тона всегда будут лежать в одной половине плоскости, проходящей через эту ось (см. определение цветового тона, стр. 12). Прямая, по которой эта плоскость пересечет поверхность конуса, определит соответствующую данному тону длину волны. Вторая половина той же плоскости будет очевидно соответствовать цветам дополнительным к данному (равнодействующая всегда лежит в той же плоскости, что и складываемые векторы, и притом между ними, а белый есть сумма дополнительных).

Как мы заметили, при уменьшении силы света уменьшается длина соответствующего цветового вектора, а соответствующая точка приближается к началу координат. В пределе, когда сила света равна нулю, глаз видит абсолютно черный цвет, который лежит таким образом в начале координат (вершина конуса), а соответствующий вектор есть так называемый «нуль-вектор», длина которого равна нулю, а направление произвольно.

Характерной особенностью нуль-вектора является то, что от его прибавления сумма не меняется. Соответственно этому, при смешивании к световому потоку «черного света» (свет, состоящий только из невидимых лучей) очевидно не меняет цвета потока.

Насыщенность цвета максимальна для спектральных и чистых пурпуровых и равна нулю для ахроматических, а так как для цветов качественно одинаковых (одинаково направленные векторы) насыщенность тоже по определению одинакова, то насыщенность цвета возрастает с увеличением угла между ахроматической осью и вектором данного цвета. Мало насыщенные цвета лежат вблизи ахроматической оси, а наиболее насыщенными являются чистые спектральные.

В конечном результате расположение цветов в пространстве схематически может быть представлено так, как показано на рис. 2.

Из этой схемы ясно, какими способами можно измерять основные свойства цвета: яркость, тон и насыщенность. Два последних свойства определяют направление цветового вектора, а потому должны быть функциями углов: т. е., иначе говоря, мы имеем в данном случае сферическую систему полярных координат в пространстве, причем тон характеризуется долготой (угол поворота вокруг оси), насыщенность — широтой (угол с осью). Яркость (зависящая от длины вектора) будет характеризоваться радиусом-вектором.

Практически эти свойства цвета измеряют однако не самым углом и длиной вектора, а некоторыми их функциями. Для измерения цветового тона угол поворота вокруг оси отсчитывают по спектральному конусу в длинах волн соответствующих спектральных. Для измерения же яркости и насыщенности привлекают помимо опытов сложения цветов еще так называемые опыты гетерохромной фотометрии.

В основу гетерохромной фотометрии положена та особенность нашего цветного зрения, что человек обычно довольно хорошо может оценивать, какой цвет темнее или светлее даже в таких случаях, когда эти цвета различны по цветовому тону и насыщенности.

Опыты гетерохромной фотометрии состоят в сравнении двух полей, качественно различных по цвету.

Силу света одного из полей (т. е. яркость одного цвета) можно произвольно изменять. Так как цвета полей остаются все время качественно различными, то полного тождества (слияния полей) изменением одной только яркости достигнуть нельзя. Поэтому требуется делать установку таким образом, чтобы ни одно из полей не казалось темнее другого, или, как некоторые предпочитают говорить, чтобы различие по цвету между обоими полями казалось возможно меньшим.

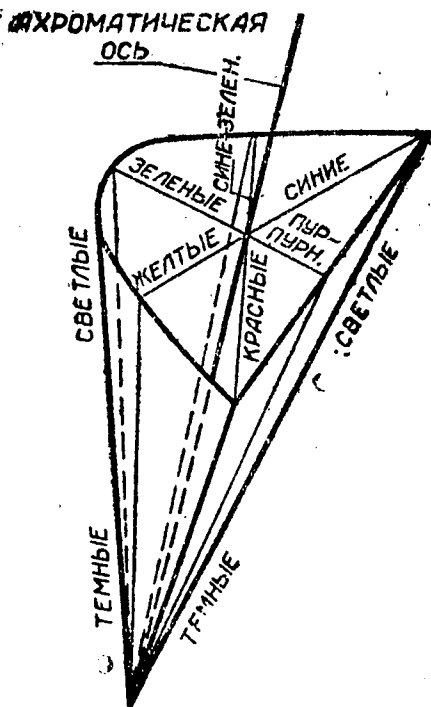


Рис. 2. Взаимное расположение цветов внутри спектрального конуса.

Опыты гетерохромной фотометрии значительно менее точны и в гораздо большей степени зависят от индивидуальности наблюдателя, чем опыты с установкой на слияние полей в одно. Кроме того, результаты гетерохромных измерений сильно зависят от так называемой «адаптации глаза» (см. ниже, стр. 38), от которой можно считать совершенно независимыми обычные измерения, особенно при соблюдении известных предосторожностей. Несмотря на это, гетерохромные измерения все же находят применение в очень многих случаях: напр. в оптических пирометрах, в колориметре Дюбоска для измерения концентрации растворов и мн. др. Надо, впрочем, сказать, что гетерохромные измерения находят применение почти исключительно в тех случаях, когда качественные различия между цветами не велики. Особенное же значение гетерохромная фотометрия имеет в светотехнике, где важно оценить (с субъективной точки зрения) силу света источника, отвлекаясь от присущей ему обычно незначительной окраски.

Как бы ни были ненадежны гетерохромные измерения, между ними и трехцветными измерениями удалось установить известную связь. Так как трехцветные измерения не позволяют сравнивать по яркости цвета качественно различные, то с точки зрения трехцветной системы единицы измерения яркости для качественно различных цветов могут выбираться совершенно независимо друг от друга. Поэтому с помощью опытов гетерохромной фотометрии налагают на способ измерения яркости качественно различных цветов то ограничение, чтобы для цветов равно-ярких (равно-светлых) с гетерохромной точки зрения измеряющие яркость числа были одинаковы.

Это требование, как показывают опыты, удовлетворяется, если положить:

$$H = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \dots \dots \dots (9),$$

где x_1, x_2, x_3 — трехцветные координаты цвета, H — гетерохромная яркость, а a_1, a_2, a_3 — некоторые коэффициенты, называемые «светлотными» и зависящие только от выбора единичных цветов, но независящие от измеряемого цвета.

Легко видеть, что гетерохромная яркость суммы цветов равна сумме гетерохромных яркостей слагаемых. Далее замечаем, что при постоянном H формула (9) есть уравнение плоскости, а это означает, что цвета равно-яркие все лежат в одной плоскости. Различные плоскости (для разных, но постоянных значений H) будут очевидно параллельны. Мерой яркости может служить таким образом расстояние соответствующей плоскости от начала.

Иногда для измерения яркости пользуются, вместо указанной системы, просто суммой координат цвета. Получаемую этим путем величину называют обычно «количеством цвета». Такой способ измерения яркости особенно удобен в номографических расчетах, о которых ниже.

Насыщенность определяют, разлагая цветовой вектор на чистый спектральный и ахроматический («белый»), и берут отношение яркости чистой спектральной компоненты к яркости самого цвета:

$$S = \frac{H_s}{H} \dots \dots \dots (10),$$

где H_s означает гетерохромную яркость спектральной компоненты, а H — яркость данного цвета. Насыщенность, измеренная в этих единицах, носит название «чистоты» цвета и обычно вычисляется из трехцветных координат цвета не по формуле, а пользуясь номограммой (см. рис. 6, стр. 41).

Чистота всех чистых спектральных, как видно из формулы (10), всегда равна 1, т. е. для всех спектральных предполагается равной. Это мало соответствует непосредственному ощущению, для которого спектральный желтый обычно кажется менее насыщенным, чем, например, спектральные красный и зеленый. Таким образом формула чистоты мало пригодна для сравнения по насыщенности цветов различного цветового тона. Впрочем, такая «гетерохромная» насыщенность несомненно является вообще понятием в высшей степени условным.

С помощью понятия гетерохромной яркости выводится важная для светотехники так называемая «кривая видимости», которая представляет собою гетерохромную яркость чистых спектральных в функции длины волны. С помощью этой кривой [соответствующую функцию обозначим $H(\lambda)$] легко непосредственно определить гетерохромную яркость светового потока, если для него известно распределение энергии в спектре. Гетерохромная яркость очевидно выразится определенным интегралом, распространенным на весь спектр.

$$H = \int H(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (11).$$

Формулой (11) пользуются в светотехнике для вычисления яркости по спектральному составу света, не производя самих гетерохромных измерений.

До сих пор мы рассматривали цвет световых потоков вне различия происхождения этих потоков. В целом вопрос о цвете иначе решаться и не может, так как глаз реагирует только на тот свет, который в него попал. Но, поскольку происхождение светового потока сказывается на его составе, происхождение света обуславливает и видимый цвет.

С точки зрения происхождения, наиболее важное разделение — это разделение света на свет, самостоятельно испускаемый объектом наблюдения, называющийся в этом случае источником света, и свет, который только видоизменяется объектом наблюдения (окрашенным предметом) через посредство поглощения (или рассеяния) тех или иных спектральных, но происходящий по существу от стороннего — освещающего источника.

Испускаемый источником свет зависит только от свойств и состояния (напр. температуры) этого источника, свет же, исходящий от окрашенного предмета (отраженный или пропущенный прозрачным телом), зависит не только от поглощения в этом теле, но и от спектрального состава освещения. Свойства самого окрашенного предмета мы будем называть его «окраской», причем цвет такого предмета, как сказано, зависит не только от его окраски, но и от освещения. Что касается источников света, то, принципиально, испускаемый ими свет может обладать любым составом, а потому источник света может быть любого цвета, который только способен воспринимать наш глаз. Поэтому многообразие всех видимых нами цветов, иллюстрируемое в цветовом пространстве конической областью («цветовой дудкой»), представляет собою многообразие цветов источников света.

В жизни нам гораздо чаще приходится, однако, иметь дело не с цветом источников, а с цветом окрашенных предметов в условиях известного более или менее постоянного освещения. Не трудно доказать, что при постоянном освещении окрашенные цвета могут обладать не любым цветом вообще, а лишь цветами, составляющими некоторую часть полного многообразия цветов. В этом смысле мы и будем говорить о «многообразии цветов, возможных при данном освещении».

Это многообразие в цветовом пространстве будет интерпретироваться в виде некоторого тела, лежащего внутри цветового конуса, т. е. составляющего некоторую его часть. Форма этого тела (т. е. соответствующее многообразие возможных цветов) зависит от спектрального состава освещения настолько, что всякое изменение в спектральном составе освещения непременно вызовет известные изменения и в форме тела (т. е. изменит многообразие возможных цветов) даже и в том случае, если по цвету освещение остается неизменным. Из этого следует, что, фиксируя источник освещения, мы должны непременно указывать его спектральный состав, а не только его цвет¹.

Окраска предмета характеризуется с физической стороны происходящим в нем поглощением света, которое для света различных длин волн, вообще говоря, может и не быть одинаковым. Однако, как известно из физики, для одной и той же длины волны поглощение одним и тем же предметом составляет всегда одну и ту же долю по отношению к количеству падающего света той же волны, независимо от силы света и наличия в его составе других волн.

Отношение поглощенного света к падающему в функции длины волны выражается с помощью функции или «кривой поглощения», которые, очевидно, нигде не отрицательны и ни для какой длины волны не превосходят единицы.

¹ Как было замечено (см. стр. 20), два источника света различного спектрального состава могут быть одинаковы по цвету.

В остальном мы будем считать эти функции могущими быть произвольного вида, так как до сих пор никаких ограничений в этом отношении неизвестно.

Вычитая значения поглощения из единицы, мы получим функции (или кривые), называемые функциями (кривыми) «отражения» или «пропускания», в зависимости от того, рассматриваем ли мы объект в отраженном или в проходящем свете. Эти функции мы будем обозначать символом $\varphi(\lambda)$ причем очевидно:

$$0 \leq \varphi(\lambda) \leq 1 \text{ для любого } \lambda. \quad (12).$$

Свет, исходящий от окрашенного предмета и попадающий в глаз, обуславливает видимый цвет предмета. Этот свет, очевидно, обладает в качестве функции распределения энергии функцией, равной произведению функции распределения энергии в спектре источника освещения $\psi(\lambda)$ на функцию отражения $\varphi(\lambda)$, а потому координаты цвета предмета с функцией отражения выразятся согласно формуле (6),—см. стр. 41.

$$\begin{aligned} x_1 &= \int A_1 \psi(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) d\lambda; & x_2 &= \int A_2 \psi(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda; \\ x_3 &= \int A_3 \psi(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda \quad \dots \dots \dots (13). \end{aligned}$$

Если освещение постоянно, то многообразие цветов, возможных при данном освещении (для простоты мы будем это освещение считать белым), ограничивается теми значениями x_1, x_2, x_3 , которые они могут принимать при произвольном виде функции $\varphi(\lambda)$, ограниченной условием (12).

Из формулы (13) можно чисто математическим путем вывести ту особенность многообразия цветов, возможных при данном освещении, что чем больше светлота цвета окрашенного предмета, тем меньшей может он достигнуть насыщенности и, наоборот, сильно насыщенные по цвету предметы непременно должны быть довольно темными¹.

Наглядно это можно себе представить следующим образом: если предмет светлый, то это означает, что он отражает много света, но так как в отраженном свете количество каждого из спектральных не может превышать его количества в падающем свете, то всякий светлый по окраске предмет необходимо должен отражать большое количество разных спектральных. Такой свет не может обладать большой насыщенностью, так как насыщенным по цвету поток бывает лишь тогда, когда он в главной своей массе состоит из спектральных, близких по длине волны. Обратное, отраженный свет, состоящий лишь из близких по длине волны спектральных, не может обладать большой яркостью, так как уже в свете освещения на долю этих немногих близких друг к

¹ Соответствующее доказательство можно найти в статье N. Nyberg. Z. S. f. Phys., 52, 5—6, 1928 г., а также «Вестник теорет. и эксперим. электрот.», №№ 3 и 7 1928 г. Там же и о форме тела.

другу спектральных придется только очень небольшая доля общего количества света. Поэтому предметы, окрашенные в насыщенные цвета, будут всегда относительно темными. Но в определенных пределах, зависящих от насыщенности, светлота цвета при той же насыщенности может быть большей или меньшей.

Если проводить векторы, соответствующие наиболее светлым из возможных при данном освещении цветов при заданной насыщенности, то легко видеть, что при постоянном цветовом тоне,

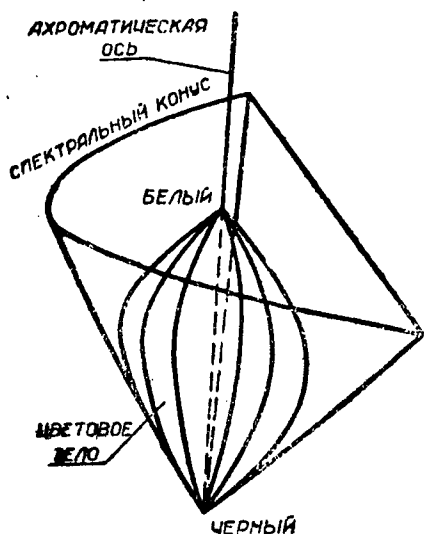


Рис. 3. Тело цветов дневного освещения внутри спектрального конуса.

чем больше будет угол между этим вектором и ахроматической осью (чем больше насыщенность), тем меньше будет длина вектора. Эти векторы, проведенные для всех цветовых тонов и насыщенностей, опишут своими концами поверхность некоторого веретенообразного тела (см. рис. 3).

Тело это имеет две точки заострения, одну в начале координат (в черной точке), где это тело касается образующих спектрального конуса, а другую в противоположном конце. Эта вторая точка будет соответствовать цвету так называемой «абсолютно белой поверхности» при данном освещении. Абсолютно белая поверхность характеризуется тем, что она совершенно не поглощает падающего на нее света, но целиком рассеянно отражает свет всех длин волн. Если освещение белое, то и цвет этой поверхности будет белым.

Тело цветов, возможных при данном освещении, охватывает все те цвета, которые в условиях этого освещения принципиально могут иметь предметы, не излучающие собственного света. Конечно, на практике далеко не все эти цвета мы фактически встречаем, что в особенности касается цветов, лежащих на самой поверхности тела (т. е. на границе возможного; эти цвета называются «оптимальными»). В частности, к их числу принадлежит цвет абсолютно белой поверхности, так как всякая реальная поверхность, хотя бы и в небольшой степени, но поглощает свет. Точно также абсолютно черный цвет, который имела бы поверхность, совершенно не отражающая света, в виде окраски является неосуществимым.

Понятие цветового тела (тела «пигментных цветов») помогает уяснить различие между цветом предметов, не излучающих собственного света, и цветом источников (напр. накаливаемых тел) и

дать объяснение вытекающим отсюда явлениям, которые в свое время породили немало недоумений.

Особенно это важно отметить потому, что глаз оценивает светлоту цвета обычно только сравнительно со светлотой окружающих предметов. Но различие по светлоте может при этом очень сильно изменить характер цвета: Так, например, серый цвет есть только сравнительно более темный (ослабленный) белый, коричневый — ослабленный (затененный) оранжевый, бурый — темный оранжево-желтый и т. д. Так как источник света всегда значительно ярче (светлее), чем окружающие освещенные тела, то мы никогда не встречаем ни серого, ни коричневого, ни бурого источника света, а если искусственно осуществить такой слабо светящийся источник, то мы его будем считать не светящимся, его цвет будет казаться только следствием окраски.

Я остановился на этом вопросе, так как различия в цвете света (т. е. источников света) и цвета предметов неоднократно толкали многих, особенно практиков к рассматриванию цвета оторванно от его физической основы — света, отчего произошло бесчисленное множество ложных представлений, к сожалению, распространенных и до сих пор.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ФИЗИОЛОГИИ ЗРЕНИЯ

Как было видно из предыдущего, измерение цвета тремя эталонами основано на непосредственных экспериментальных данных (закон Грассмана) и совершенно не зависит от тех или иных физиологических гипотез, которые являются только более или менее достоверными *истолкованиями* опытных фактов. Возможность измерять цвет с помощью трех эталонов на основе оптического сложения есть один из таких экспериментальных фактов, которые должны быть объяснены гипотезой.

В настоящей главе мы вкратце рассмотрим устройство глаза и особенности его работы.

Глаз человека (см. рис. 4) представляет собою подобие фотографической камеры. Он имеет примерно шарообразную форму и снаружи в большей своей части окутан рядом непрозрачных для света оболочек. Первая, считая снаружи («склеротика», «склера»), в передней части глаза прозрачна (роговая оболочка) и позволяет свету проникать внутрь. Следующая (сосудистая) оболочка переходит в передней части в радужную оболочку, имеющую в центре отверстие — зрачок. Радужная оболочка обладает способностью сокращаться или растягиваться, увеличивая или уменьшая зрачковое отверстие, т. е. играет роль диафрагмы, повышающей или понижающей светосилу глаза.

Непосредственно позади зрачкового отверстия лежит прозрачное хрящевидное тельце с высоким показателем преломления — «хрусталик». Хрусталик имеет форму чечевицы и выполняет функции объектива. Подость глаза заполнена прозрачной

студенистой массой—«стекловидным телом». Внутренняя поверхность этой полости выстилается так называемой «сетчатой оболочкой» («сетчатка», «ретины»).

Сетчатка вся пронизана тонкими окончаниями зрительных нервов и является тем светочувствительным слоем, благодаря кото-

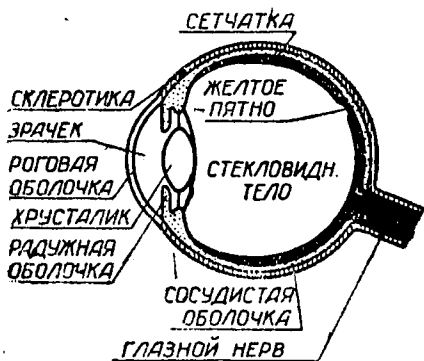


Рис. 4. Схема устройства человеческого глаза.

рому мы воспринимаем даваемое с помощью хрусталика отчетливое изображение предметов, находящихся перед глазом. Отчетливость изображения получается благодаря тому, что с помощью мускулов и особых нитей, прикрепленных к хрусталику, он может сокращаться, делаясь более выпуклым, или растягиваться, становясь более плоским. В первом случае фокусное расстояние хрусталика уменьшается, и мы видим отчетливо близкие предметы, а во втором — более далекие.

Под микроскопом было обнаружено, что светочувствительные нервные окончания глаза бывают двух родов: так называемые «палочки» и «колбочки», и расположены они в сетчатке неравномерно.

Против зрачкового отверстия находится наиболее важное для цветного зрения место сетчатки, называемое «желтым пятном», где палочки почти совершенно отсутствуют, а колбочки сидят чрезвычайно густо. Чем дальше от желтого пятна, тем меньше в сетчатке колбочек и тем больше палочек, так что периферические части сплошь состоят из одних палочек.

Когда мы сосредоточиваем внимание на каком-либо предмете, то глаз автоматически ориентируется так, чтобы изображение этого предмета попадало на желтое пятно. Строго говоря, все данные, которых мы касаемся в настоящей книге, относятся именно к зрению с помощью желтого пятна, к так называемому «центральному зрению», в котором палочки не участвуют. Впрочем, зрение частями сетчатки, близкими к желтому пятну, весьма мало отличается от чистого центрального зрения, и только специальными опытами можно установить это различие.

Колбочки, о которых только и идет речь при центральном зрении, являются аппаратом, при помощи которого мы различаем цветные оттенки. Палочки же способны различать лишь светлое и темное, и основное их назначение—работа в условиях очень слабого освещения, когда колбочки почти не реагируют. Этим и объясняется тот факт, что в сумерках мы не в состоянии различать цветных оттенков, а лишь темное от светлого.

Несмотря на все попытки, анатомический, микроскопический и химический анализ нервных окончаний не в состоянии был до сего времени более подробно выяснить, каким образом мы можем видеть с помощью колбочек различные цветные оттенки. Поэтому приходится обращаться к гипотезам, чтобы представить себе этот механизм.

Не имея возможности опираться на данные анатомии, гипотезы цветного зрения строятся на основе наблюдаемых нами явлений зрения. Наиболее распространенных гипотез две: 3-цветная гипотеза Юнга-Гельмгольца и 4-цветная — Геринга.

Решать, которая из них более правильна, конечно, не входит в наши задачи. Гипотеза Гельмгольца основана главным образом на фактах оптического смешения цветов, которые она объясняет и с качественной и количественной стороны. Гипотеза Геринга, наоборот, в основном исходит из нашего субъективного восприятия цвета, и даваемые ею объяснения многим ученым (особенно психологам) кажутся более естественными. Впрочем, до сих пор неизвестно ни одного экспериментального факта, который прямо противоречил бы трехцветной гипотезе Гельмгольца, в то время как количественная сторона опытов сложения цветов объяснению с точки зрения теории Геринга не поддается¹.

Поскольку измерение цвета представляет для нас центральный интерес, вопрос решается в пользу трехцветной гипотезы, изложением которой мы и ограничиваемся.

Согласно трехцветной гипотезе, цветное зрение считается обусловленным тремя независимыми друг от друга процессами, которые могут изменять свой характер только чисто количественно. Вопрос о том, происходят ли эти процессы в нервных окончаниях (колбочках) или при участии центральной нервной системы, остается открытым. Условно мы будем говорить о реакции трех «нервных центров» или о трех «элементарных (основных) ощущениях».

В виде механической схемы, в части, касающейся опытов измерения цвета, можно представить себе реакцию глаза на свет как совокупное действие трех фотоэлементов, каждый из которых обладает своей кривой чувствительности к свету различной длины волны². Совокупность той или иной комбинации этих трех элементарных реакций определяет видимый нами цвет, причем, однако, в этом целостном ощущении цвета мы не в состоянии воспринимать отдельные элементарные составляющие.

Допустим, что чувствительность трех нервных центров к различным спектральным выражается функциями $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ и $B(\lambda)$

¹ Лучшим подтверждением этого является попытка Шредингера привести количественные данные цветовых измерений в соответствии с гипотезой Геринга (см. E. Schrödinger, Wiener Ber. 134, 471, 1925), так как для этого ему пришлось видоизменить гипотезу Геринга, превратив ее фактически в трехцветную (отказ от исключительной роли «среднего серого»).

² О неполноте этой схемы см. ниже стр. 37.

тогда свет, состав которого определяется функцией $\psi(\lambda)$, действуя на глаз, очевидно, будет вызывать раздражения нервных центров, выражаемые определенными интегралами:

$$r = \int R(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda; \quad g = \int G(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda; \quad b = \int B(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda \quad \dots (6')$$

Сравнивая формулы (6') с выражениями (6) для координат цвета (см. стр. 20), мы видим полную аналогию. Иначе говоря, трехцветная гипотеза истолковывает получаемые опытным путем координаты цвета как раздражения трех гипотетических нервных центров, а опытные кривые смещения — как кривые чувствительности этих нервных центров.

Однако, как мы видели, различные единичные цвета можно выбирать бесконечным числом способов, а от выбора этих цветов будут зависеть как координаты цветов, так и кривые смещения. Кривые же чувствительности нервных центров и величина раздражений этих центров каким-либо цветом должны быть вполне определенными, т. е. для того, чтобы координаты цвета действительно выражали соответствующие данному цвету элементарные раздражения, необходимо выбрать единичные цвета строго определенным образом.

Нетрудно усмотреть при этом и физиологический смысл таких правильно выбранных единичных цветов (мы их будем называть основными цветами). В самом деле, координаты единичного вектора по его собственному направлению очевидно равны 1, а координаты по направлениям двух других равны нулю. Это означает, что основные три цвета есть те цвета, которые мы увидели бы в условиях, когда один нервный центр раздражен с силой 1, а два других не раздражены вовсе.

С точки зрения опытов сложения цветов всякие три единичных цвета могут быть взяты с совершенно одинаковым основанием, а потому из этих опытов принципиально невозможно извлечь указаний, какие три цвета должны быть выбраны за основные. Для нахождения этих основных цветов приходится обратиться к другим явлениям. Практически наиболее удобным оказалось делать заключение из наблюдений над так называемыми цветнослепыми.

Цветная слепота (называемая иногда «дальтонизмом») — это довольно распространенная среди людей зрительная аномалия, заключающаяся в том, что некоторые люди, обладая как будто совершенно здоровыми глазами, путают между собой такие цвета, которые для здорового глаза кажутся резко различными. Наиболее распространен (около 4% всех людей) случай, для которого характерна невозможность отличать красный от определенного сине-зеленого; этот случай называется «красной слепотой».

Реже встречаются люди, которые путают чистый зеленый (напр. спектральный 510 $m\mu$) с определенным пурпуровым, — они называются «зеленослепыми». При этом особенно характер-

но, что «краснослепые» путают красный большой яркости (светлоты) с темным синезеленым, а «зеленослепые», наоборот, путают зеленый большой яркости с пурпурно-красным малой яркости (темным).

Наконец, хотя и чрезвычайно редко, но встречаются «синеслепые», которые не отличают синего от желтого. Кроме этих характерных ошибок, цветнослепые путают между собой еще целый ряд цветов, однако вполне определенных для каждого из видов цветной слепоты.

Исследования зрения цветнослепых показали, что если изобразить с помощью векторов цвета, которые путают цветнослепые, то оказывается, что для каждого из типов цветной слепоты неотличимы те и только те цвета, для которых разность соответствующих векторов есть вектор вполне определенного направления. Трех различным типам цветной слепоты соответствуют три различных направления.

Если определить координаты цветов относительно этих трех направлений («недостаточных цветов» — Fehlfarben, как их называют немцы), то оказывается, что цветнослепые путают между собой как раз те цвета, которые различаются только одной из трех координат. Для различных типов цветнослепых эта «невоспринимаемая» координата будет различной.

Исходя из этого в достаточной степени замечательного факта, Гельмгольц предположил, что единичные цвета, выбранные таким образом, и являются тремя основными, причем цветная слепота обуславливается тем, что тот или иной из трех центров глаза почему-либо не работает.

Последователи Гельмгольца специальными исследованиями довольно твердо установили направления двух из основных цветов (для красно- и зеленослепых)¹, направление же третьей оси в пространстве до сих пор удалось определить только приближенно, так как «синяя слепота» явление очень редкое и обычно сопровождается другими зрительными аномалиями.

Когда эти направления были найдены, то выяснилось, что направления основных цветов лежат вне цветового конуса, т. е. что ни один из обычно видимых глазом цветов не соответствует основным ощущениям.

Это обстоятельство показывает только то, что даже чистые спектральные лучи света, какой бы они ни были длины волны, всегда действуют сразу по меньшей мере на два из нервных центров.

Тем более справедливо это в отношении смешанного света. Иначе говоря, нет такого раздражителя, который был бы в состо-

¹ Отсутствующий «центр» краснослепых по цветовому тону слегка отклоняется от крайнего спектрального красного в сторону пурпуровых, а «зеленый центр» по световому тону соответствует примерно монохроматическому свету длины волны 510 *mμ*. Оба однако значительно насыщеннее соответствующих цветов спектра.

янии вызвать раздражение только одного из нервных центров, не раздражая других, именно поэтому мы в нормальных условиях никогда не видим и не можем увидеть элементарных цветов.

«Нереальность» основных цветов становится даже вполне естественной в силу еще одного обстоятельства. Мы уже говорили, что, как бы ни были выбраны три реальных единичных цвета, всегда найдутся цвета, для которых некоторые координаты окажутся отрицательными. В этом легко убедиться хотя бы из того, что цветовой конус—выпуклый, следовательно, как бы мы ни выбирали координатные оси из числа прямых, лежащих внутри конуса, часть конуса непременно выйдет из того координатного октанта, где все координаты положительны. Поэтому, взяв за основание цвета три реальных цвета, мы неминуемо должны были бы допустить возможность отрицательных раздражений, отчего физиологическая картина значительно усложнилась бы.

Если же взять за координатные оси направления «недостаточных» цветов, то оказывается, что весь цветовой конус расположится в области положительных координат, так что не потребуются допущения отрицательных раздражений.

Хотя видеть основные (элементарные) цвета мы не можем, но мы можем оценивать их цветовой тон. Для этого проведем плоскости, проходящие через ахроматическую ось, и три основные цветовые вектора. Пересечения этих плоскостей со спектральным конусом укажут цветовой тон основных цветов, которые, однако, должны быть еще более насыщенными, чем чистые спектральные.

Таким образом было выяснено, что у краснослепых не работает центр, соответствующий по тону красному, несколько более пурпурового оттенка, чем самый крайний спектральный красный. Второй основной цвет должен быть по тону зеленым, а третий синим или фиолетовым (в этом и сказывается неточность опытов с синеслепыми, о которой говорилось выше). Элементарные цвета должны быть только еще насыщеннее, чем чистые спектральные. Основные нервные центры называются, соответственно тону элементарных цветов, красным, зеленым и синим центрами.

Вычислив координаты чистых спектральных относительно трех элементарных цветов (хотя бы пользуясь векторным изображением цвета), мы получим три кривых (или функции), аналогичные рассмотренным выше кривым смешения. Будем обозначать эти функции символами: $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ принятыми в международной литературе¹. Функции $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ не являются уже функциями смешения, так как элементарным цветам не соот-

¹ Начальные буквы немецких слов rot—красный, grün—зеленый и blau—синий. Когда вместо синего за основной цвет принимают фиолетовый, то вместо буквы „B“ ставят букву „V“ (violett—фиолетовый).

ветствует никаких реальных цветов, но зато они имеют с точки зрения гипотезы Гельмгольца физиологический смысл, а потому, согласно этому смыслу, их можно назвать функциями чувствительности нервных центров.

Собственно говоря, из опытов над цветнослепыми мы устанавливаем только направление элементарных векторов, но не их величину, которая остается произвольной. Это и понятно, так как трудно подыскать основание для установления некоторой одинаковой единицы измерения трех качественно различных нервных процессов. Поэтому мы можем выбирать эти величины произвольно. Практически их выбирают таким образом, чтобы равенству основных раздражений соответствовали ахроматические цвета (в частности белый).

Приняв такой способ измерения, на основании величины раздражений легко сообразить, каков должен быть цвет, вызывающий эти раздражения. В самом деле, если три основных раздражения даны, то одно из них, вообще говоря, будет наименьшим. Эта наименьшая величина укажет нам максимальную бесцветную компоненту, которую можно выделить из данного цвета. Избыток одного или двух других раздражений придает цвету определенный хроматический оттенок, который будет тем сильнее (цвет будет тем насыщеннее), чем больше эти избытки по сравнению с выделенным белым. Цветовой тон цвета будет промежуточным (считая вдоль по спектру) между цветами тех двух раздражений, которые преобладают, располагаясь ближе к тому или другому, в зависимости от того, который из избытков больше.

Так, например, если менее всего раздражение синего центра, цвет может иметь цветовой тон красный, оранжевый, желтый или зеленый, в зависимости от того, преобладает ли раздражение красного центра над зеленым или наоборот¹. При преобладании зеленого и синего раздражений мы видим цвета различных зелено-синих оттенков. Наконец, преобладание синего и красного дают фиолетовые и пурпуровые оттенки.

Механическая схема цветного зрения с помощью трех фотоэлементов не вполне точно отражает устройство нашего глаза, так как глаз способен самостоятельно изменять свою чувствительность, которая у фотоэлемента постоянна. Так, например, вся-

¹ Бесконечные сомнения всегда возбуждает утверждение, что желтый, согласно трехцветной гипотезе, получается из красного и зеленого. Однако здесь дело основано на недоразумении, причина которого заключается в том, что, смешивая краски мы получаем обычно зеленый из синего и желтого. Цвет смеси красок обуславливается главным образом физическими причинами, и на этом основании невозможно делать заключение о физиологических свойствах глаза. Получение при оптическом смешении желтого света из красного и зеленого есть экспериментальный факт. Так, например, свет электрической лампочки обязан своим желтым цветом едва ли не в большей мере значительному содержанию зеленых и красных спектральных, дающих в сумме желтый, чем собственно-желтым спектральным.

кому известно, что, войдя с яркого света в слабо освещенное помещение, мы сначала ничего не видим, и лишь постепенно привыкая к темноте, глаз начинает все яснее видеть окружающие предметы.

Обратно, при переходе из темноты на свет мы сначала бываем почти ослеплены: настолько ярким кажется нам освещение, но по прошествии некоторого времени глаз «привыкает к свету», и мы начинаем видеть нормально.

Аналогичное явление можно наблюдать не только в отношении кажущегося изменения яркости цвета, но нередко и в отношении заметных изменений цветового тона и насыщенности. В последнем случае явление носит иногда название последовательного цветного контраста. Если, после длительного воздействия на глаз какого-либо яркого цветного света, посмотреть на другие предметы, то их цвет изменится в сторону дополнительного к цвету, который действовал на глаз предварительно.

Эти явления объясняются способностью глаза к так называемой «адаптации», механизм которой рисуется в следующем виде. Когда на глаз длительное время действует сильный свет, чувствительность глаза постепенно притупляется, и тот свет, который сначала вызывал сильное раздражение (казался ярким), начинает раздражать глаз уже слабее (кажется менее ярким). Под действием слабого света или в темноте к глазу снова начинает возвращаться его чувствительность, и попадающий в него свет начинает казаться более ярким, чем вначале.

Для объяснения кажущихся изменений цветового тона и его насыщенности приходится прибегать к трехцветной гипотезе.

Когда на глаз действует цветной свет, то он раздражает одни нервные центры сильнее, чем другие, и поэтому чувствительность центров изменяется в различной степени. Так, например, под действием красного света сильно притупляется чувствительность только красного центра, тогда как чувствительность двух других центров остается более или менее нормальной или, может быть, даже повышается. Поэтому, после воздействия красного света, всякий другой свет будет вызывать раздражение синего и зеленого центров более или менее нормальных размеров, а красный центр будет раздражаться слабее, чем в нормальных условиях. Поэтому ощущение цвета изменится против нормального в сторону приближения к сине-зеленому, т. е. дополнительному к красному.

Такое неравномерное изменение чувствительности может быть не только у всего глаза в целом, но и на отдельных участках сетчатки, подвергавшихся действию яркого света. Отсюда происходят так называемые «последовательные образы», примерами которых являются известные каждому цветные круги перед глазами после взгляда на солнце.

С точки зрения цветовых измерений адаптация (особенно цветная) представляет иногда очень серьезную помеху, и поэтому с ней приходится считаться. Тем более важным свойством трехцветных измерений является их независимость от состояния глаза, создавшегося в силу той или иной адаптации¹.

В самом деле, хотя при изменении состояния глаза происходит кажущееся изменение цветов, но одинаковые цвета изменяются при этом всегда одинаково. Поэтому, если в одном случае мы сделаем установку на равенство по цвету двух полей (а в этом и заключается измерение цвета), то при всяком другом состоянии глаза эта установка останется правильной, и данные измерения останутся теми же.

Значительно хуже обстоит дело с гетерохромной фотометрией, так как там делается установка не на полное равенство, а на равенство по одной только светлоте качественно различных цветов. Если произошла адаптация к цветному свету, то кажущаяся яркость качественно различных цветов может измениться по-разному. Например, если чувствительность красного центра понизилась, а зеленого повысилась, то все красные цвета будут казаться темнее, а зеленые светлее. Установка, сделанная при одном состоянии глаза, становится неверной при другом, и данные измерения получаются разные.

Это, пожалуй, самый крупный минус гетерохромных измерений, тем более существенный, что удерживать состояние глаза на постоянном уровне очень трудно, так как оно изменяется в самом процессе измерений. Едва ли не этим в значительной мере и объясняется сравнительно малая точность гетерохромных измерений.

ЦВЕТОВЫЕ НОМОГРАММЫ

Для разного рода пересчетов часто оказывается целесообразным пользоваться графическим методом. В области цвета широко распространенной номограммой является так называемый «цветовой треугольник» или «треугольник Ньютона». Эту плоскую номограмму легче всего получить, исходя из пространственного расположения цветов.

Проведем в цветовом пространстве плоскость, пересекающую координатные оси основных ощущений (см. рис. 5). След от пересечения с координатными плоскостями образует на секущей плоскости треугольник², а пересечение со спектральным конусом цветов даст внутри треугольника «спектральную кривую». Спроектируем теперь все точки пространства из начала координат, как центра проекции на секущую плоскость. При этом каждый цвет

¹ Об условиях, при которых независимость трехцветных измерений от адаптации может считаться вполне установленной, см. ниже стр. 65.

² Направление секущей плоскости обычно выбирают так, чтобы треугольник получился равносторонним. Впрочем, в американской и английской литературе часто пользуются прямоугольными треугольниками.

попадает, очевидно, в то место внутри спектральной кривой, где соответствующий вектор (или его продолжение) пересечется с данной плоскостью.

Положение точки на плоскости определяется всего лишь двумя числами, и для определения положения цвета в треугольнике три координаты цвета являются избыточными. Так как направление вектора в пространстве определяется двумя отношениями между

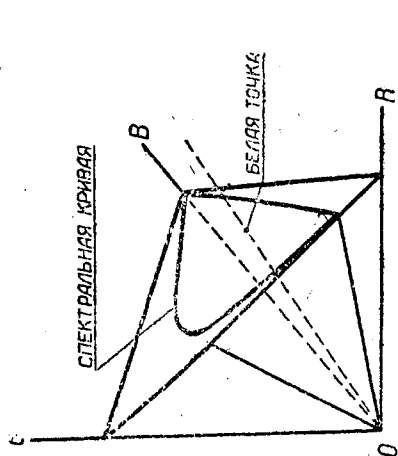


Рис. 5. Проектирование цветового пространства на плоскость (получение треугольника Ньютона).

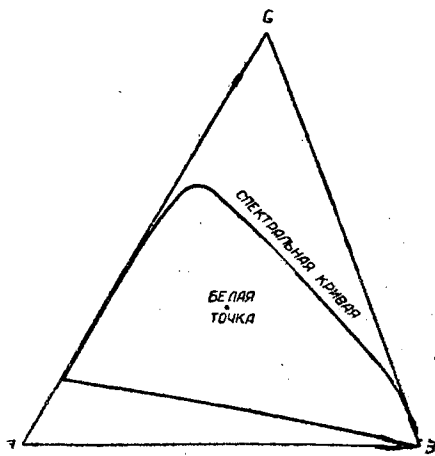


Рис. 5а. Треугольник Ньютона.

трем его слагающими, то и для отыскания положения цвета в треугольнике достаточно знать только два отношения между тремя координатами цвета.

Если полагать, сумму координат всегда равной единице, сохраняя, однако, отношения между ними, а сторону треугольника принять за единицу длины, то нетрудно видеть, что координаты цвета будут выражать расстояние соответствующей точки от трех сторон треугольника, причем каждая из координат будет выражать расстояние от стороны, противолежащей тому углу треугольника, где плоскость треугольника пересекается с соответствующей координатной осью.

Пользуясь начерченными в треугольнике кривыми равной чистоты (см. стр. 27) спектральной кривой с нанесенными на ней длинами волн и «белой» точкой (точка пересечения плоскости треугольника с ахроматической осью), которая будет лежать в центре (на пересечении медиан), по трехцветным координатам цвета можно быстро определять его цветовой тон в длинах волн соответствующего спектрального и его чистоту и обратно.

Чистота определяется непосредственно с помощью кривых равной чистоты (см. рис. 6)¹ и поставленных около них чисел (обычно в процентах от чистоты спектрального). Для определе-

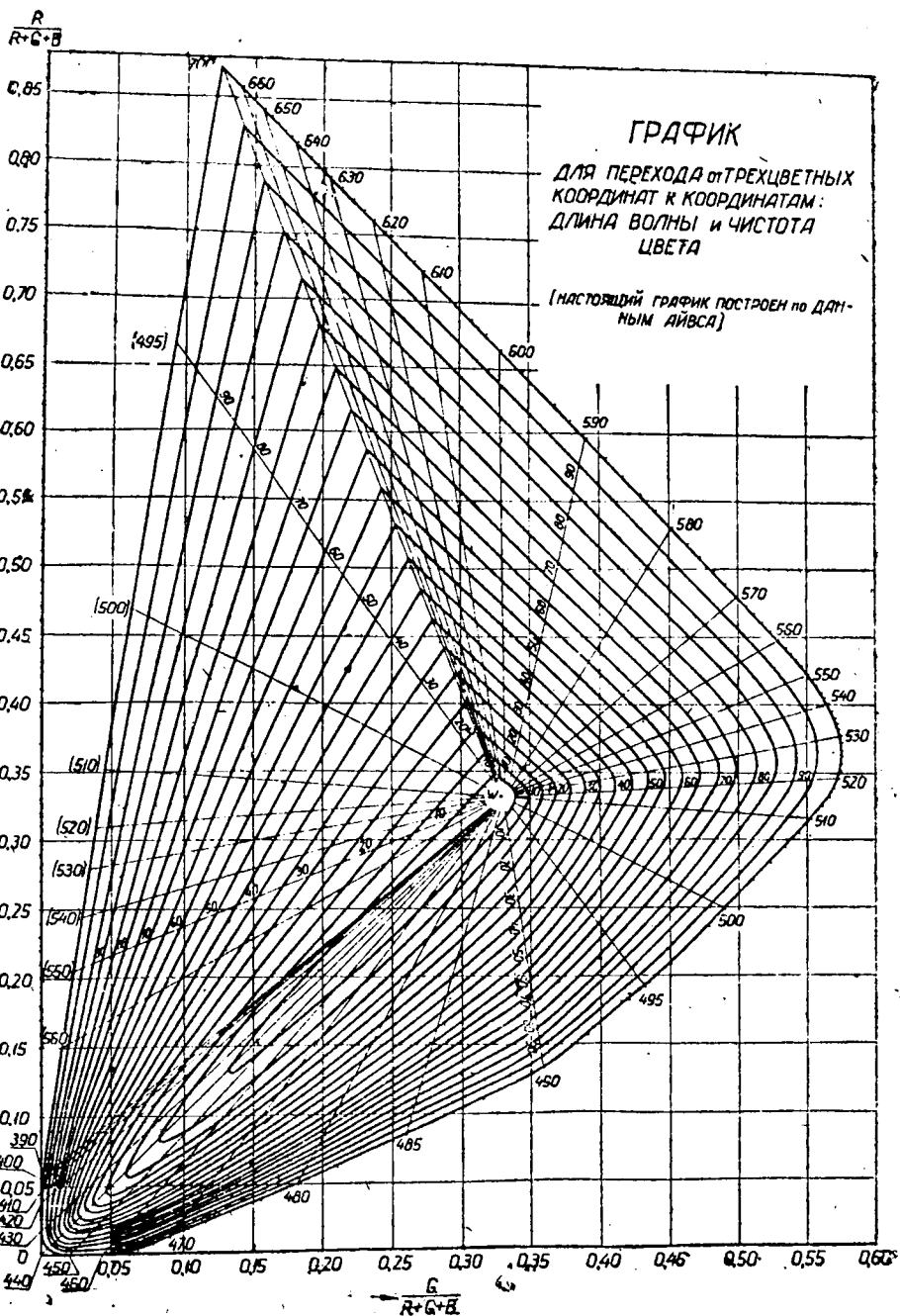


Рис. 6.

ния же цветового тона надо провести через точку, соответствующую данному цвету, и белую точку прямую до пересечения со спектральной кривой. Длина волны, стоящая вблизи точки пересечения, и будет характеризовать тон цвета.

Обратно, можно, зная чистоту и цветной тон, выраженный в длине волн, построить соответствующую точку в треугольнике, измерить ее расстояния от сторон треугольника и получить отношения трехцветных координат. Абсолютная их величина тогда определится без труда, если только известна яркость цвета.

Треугольником можно пользоваться и для интерпретации сложения цветов (например при пересчетах с одних единичных цветов на другие). При сложении, однако, имеет значение количество цвета (яркость), которое в треугольнике геометрически не интерпретируется, вследствие чего его приходится учитывать в отдельности.

Целесообразнее всего представить себе, что в точке, изображающей качество цвета, помещен груз, пропорциональный его количеству, тогда величина и положение такого «груза» полностью определит цвет. Поскольку координаты цвета выбираются так, что для белого цвета они равны, а белый цвет лежит в центре треугольника, то за количество цвета (т. е. «груз») можно брать просто сумму координат (см. стр. 26). При соблюдении этих условий сумма нескольких цветов всегда оказывается лежащей в центре тяжести системы «грузов», изображающих эти цвета, а соответствующий «груз» (т. е. количество цвета) будет равен сумме «грузов» складываемых цветов.

Обратно, чтобы найти для известного нам цвета координаты в отношении каких-то трех новых единичных цветов, надо разложить соответствующий исследуемому цвету «груз» на три лежащих в точках, соответствующих новым единичным цветам, по правилу разложения параллельно направленным силам. Отношения полученных разложением «грузов» к «грузам», соответствующим новым единичным цветам, и будут искомыми координатами цвета в новой системе.

Все указанные свойства треугольника выводятся из способа его получения, как проекции пространства цветов на плоскость. Я предоставляю читателю самостоятельно доказать правильность указанных способов расчета.

Треугольник чрезвычайно удобен для графической записи результатов тех или иных опытов в тех случаях, когда приходится иметь дело с изменением качества цвета, т. е. его тона и насыщенности. Предположим, исследуется процесс, сопровождающийся изменением цвета. Прделаав ряд цветовых измерений через определенные промежутки времени и нанеся в треугольнике соответствующие точки, можно провести через них кривую, иллю-

¹ На рис. 6 самый треугольник не нарисован, а положение цвета определится откладыванием величин, пропорциональных красному и синему раздражениям, по двум взаимно перпендикулярным прямым.

стрирующую нормальный ход процесса. На основании такой кривой, найденной в лаборатории, можно контролировать на производстве процесс, отмечая, протекает ли он «нормально», т. е. соответствует ли цвет «нормальной кривой», идет ли он с нормальной скоростью, замедленно или ускоренно, и т. д. Аналогичные применения графического изображение цвета в треугольниках может найти и в других случаях.

ЦВЕТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Все цветовые измерительные приборы основаны на том, что, пользуясь оптическим сложением трех исходных и четвертого измеряемого цветов, складываемых в различных пропорциях, находят цветовое уравнение, связывающее измеряемый цвет с эталонами (исходными). Наиболее простым является такое измерение, когда цветовое уравнение можно непосредственно получить в явном виде, т. е. решенным относительно измеряемого цвета [формула (2)—стр. 18]. Коэффициенты этого уравнения являются координатами цвета (слагающими цветового вектора) по отношению к трем эталонным цветам.

Уравнение сразу получается в явном виде в тех случаях, когда посредством сложения эталонных цветов между собой оказывается возможным подобрать цвет, неотличимый от измеряемого. В этих случаях все координаты (слагающие) измеряемого цвета положительны.

Когда некоторые из координат цвета оказываются отрицательными, непосредственное нахождение цветового уравнения, выражающего измеряемый цвет через эталонные в явном виде, оказывается невозможным, но всегда, согласно закону Грассмана, удается экспериментально найти цветовое уравнение, содержащее измеряемый и три эталонных цвета. В этом случае надо, пользуясь правилами алгебры, полученное световое уравнение переписать в явной форме решенным относительно измеряемого цвета (см. стр. 22).

Сложение цветов между собой в различных количествах осуществляется в приборах разными способами, из которых важнейшими являются два. В приборах первого типа световые потоки того или иного цвета действительно физически смешиваются так, что все они действуют на сетчатку глаза строго одновременно. Количество (т. е. яркость) каждого из световых потоков увеличивается или уменьшается с помощью одного из обычных способов, принятых в фотометрии. Главными из этих способов являются: 1) приближение или удаление источника света, отсчитываемое по оптической скамье, 2) применение скрещенных николей, 3) дифрагмирование светового потока, 4) применение так называемого серого клина. Все эти способы позволяют увеличивать или уменьшать яркость светового потока, без изменения относительного распределения энергии в спектре этого потока.

В приборах второго типа световые потоки складываемых цветов действуют на глаз не строго одновременно, а быстро, чередуясь один вслед другому (не менее 2000 циклов в минуту).

В этом случае, строго говоря, с физической точки зрения не происходит смещения световых потоков, но если смена цветов (мигание) происходит достаточно быстро, то глаз перестает замечать отдельные мигания, а реагирует так, как если бы общее количество световой энергии тех же длин волн, попадающей на поверхность сетчатки в единицу времени, было бы распределено не через интервалы, а равномерно, без миганий. Иначе говоря, результат сложения цветов при быстром чередовании световых потоков будет для глаза таким же, как и в том случае, если бы они действовали одновременно, и количество световой энергии, приходящееся на единицу поверхности сетчатки за единицу времени, оставалось бы тем же самым.

Таким образом приборы с чередованием световых потоков дают те же самые результаты, что и приборы, где потоки действуют на глаз одновременно, если только за количество цвета, участвующего в смешении, принимать не самую яркость сменяющихся потоков, а произведение этой яркости на суммарную продолжительность действия соответствующего потока в течение единицы времени, или иначе, произведение яркости на число миганий за единицу времени и на продолжительность отдельного мигания (продолжительность непрерывного действия).

Этот факт, установленный на очень большом количестве опытов, показывает, что при конструкции цветowych измерительных приборов мы можем с одинаковым правом применять тот или другой способ смешения цветов. В приборах, основанных на смешении посредством быстрого чередования, в наших руках оказывается еще один способ изменять количество того или иного цвета, участвующего в смешении, путем изменения продолжительности действия светового потока соответствующего цвета. Наряду с этим способом принципиально возможны и другие, перечисленные выше способы изменения количества цвета, но практически изменение продолжительности действия оказывается обычно наиболее целесообразным с конструктивной стороны.

Из всех существующих многочисленных приборов для измерения цвета наибольший интерес для промышленности несомненно представляют те или иные видоизменения так называемой «вертушки Максвелла». Основными ее преимуществами являются: простота конструкции, дешевизна и портативность, позволяющая пользоваться вертушкой не только в лабораторных, но и в любых условиях, до экспедиционных включительно. Вертушку примитивной конструкции не трудно сделать самому; если же в распоряжении имеется быстроходный мотор (2000 об/мин., весьма малой мощности), то легко изготовить вполне хороший измери-

тельный прибор¹. В мастерской хотя бы даже кустарного типа можно изготовить хорошую и портативную модель с механическим приводом за 30—50 руб., а при массовом производстве эту цену легко снизить до 10 и даже до 5 руб. Это, конечно, ставит данный прибор вне конкуренции с цветовыми измерительными приборами лабораторного типа, цена которых доходит до нескольких тысяч рублей (и притом в большинстве случаев в валюте).

Недостатками простых приборов являются несколько меньшая точность измерений и несколько большая продолжительность измерений (около 10 минут). Однако некоторые очень простые приспособления, не удорожая прибора сколько-нибудь значительно, могут довести точность измерений почти до уровня лучших лабораторных моделей и сделать самые измерения почти столь же удобными и быстрыми. Сказанное подтверждается тем, что на практике сложные приборы применяются только для работ теоретического характера, для практических же целей (а весьма часто и для теоретических работ) пользуются почти исключительно вертушками той или иной конструкции.

Сложение цветов на вертушке (см. рис. 7) производится по принципу чередования. При этом складываемые цвета представлены в виде цветных кружков одинакового диаметра из бумаги или тонкого картона, имеющих отверстие в центре и радиальный разрез от центра до самого края. С помощью радиальных разрезов цветные кружки вставляются друг в друга, как показано на рис. 8, и надеваются центральным отверстием на ось, которую можно приводить в быстрое вращение тем или иным способом. Для опоры на оси глухо укрепляется кружок из фанеры или картона, причем вставленные друг в друга цветные кружки прижимаются к опорному кружку с помощью шайбы и гайки, навинчивающейся на ось. Иногда (для работы это удобнее) выступающая над опорным крючком часть оси делается несколько толще, (от 0,5 до 2 см диаметром), и на нее надевается муфточка, прижимающая цветные кружки и держащаяся трением. Такую муфточку целесообразно делать из просверленной пробки или дерева. Благодаря радиальным разрезам цветных кружков мы легко можем установить сектор того или иного цвета произвольных размеров, предварительно слегка ослабив прижимающую гайку или муфту.

Таким образом, если смотреть на вертушку, когда она неподвижна, то мы увидим круг, разделенный на секторы различных цветов, причем размеры этих секторов можно произвольно изменять. Когда вертушка приведена в достаточно быстрое вращение, все цветные секторы сливаются в один цвет, так что кружок кажется совершенно равномерно окрашенным. Слияние цветов

¹ Конструкция с мотором требует, конечно, электрического тока (хотя бы осветительной проводки и аккумулятора). Ниже будут указаны конструкции и без мотора.

здесь происходит в силу того, что на одно и то же место сетчатки глаза поочередно попадает свет, отраженный тем или иным цветным сектором, которые быстро сменяют друг друга при вращении вертушки. Продолжительность действия света, отражаемого каждым из секторов за единицу времени, будет, очевидно,

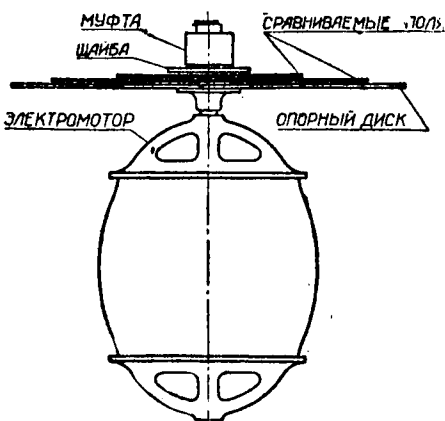


Рис. 7. Вертушка Максвелла с моторным приводом.

равняться угловым размерам соответствующего сектора, выраженным в долях полной окружности. Таким образом, если мы имеем, например, три сектора, окрашенные в цвета E_1, E_2, E_3 , угловые размеры которых соответственно равны числам x_1, x_2, x_3 , то полученный смещением цвет X будет выражаться формулой:

$$X = x_1 E_1 + x_2 E_2 + x_3 E_3,$$

т. е. угловые размеры секторов являются компонентами полученного смещения цвета X относительно эталонных цветов (единичных векторов) E_1, E_2, E_3 . Следует заметить, что при подборе

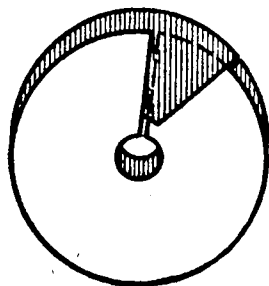
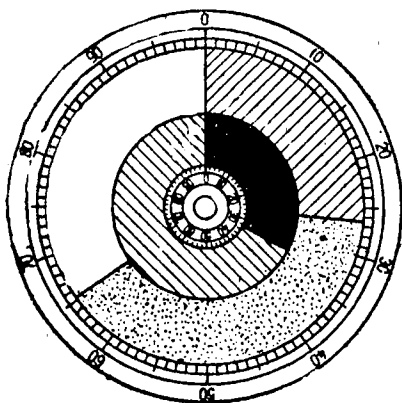


Рис. 8. Установка эталонных кружков вертушки.

на вертушке измеряемого цвета из трех эталонных надо иметь еще четвертый черный кружок, чтобы иметь возможность изменять количество эталонных цветов независимо друг от друга. Причем, если нужно, чтобы сумма $x_1 + x_2 + x_3$ была меньше единицы, остающееся свободное место на кружке (вся окружность = 1) занимают черным. В уравнении член, соответствующий черному сектору, не пишется, так как черный цвет есть нуль-вектор. Присутствие же черного сектора скажется на размерах остальных коэффициентов, сумма которых будет тем меньше, чем больше черный сектор.

Если кружки E_1, E_2, E_3 окрашены в стандартные цвета, то величины x_1, x_2, x_3 являются мерою (координатами) цвета X . Однако в большинстве случаев при измерениях пользуются не стандартными цветами, а цветами, промеренными (проградуированными) по стандартным. В этом случае для выражения цвета в международных единицах приходится пользоваться формулами перехода от одной системы единичных цветов к другой [см. формулу (8) на стр. 1].

Возможность пересчета измерений, сделанных с помощью любых трех цветных эталонов, имеет большую практическую важность, так как это позволяет вести измерения с помощью кружков любого цвета, какие в том или ином случае имеются под руками, необходимо только хотя бы впоследствии «проградуировать» их по стандартным, что всегда может выполнить любая фотометрическая лаборатория¹.

Для сравнения подобранного на вертушке цвета с цветом измеряемого образца, последний можно подкладывать рядом с вертушкой, или, что еще лучше, вырезать образец в виде кружка меньшего диаметра, чем эталонные, и помещать его на самую вертушку. В последнем случае, т. е. когда измеряемый образец тоже вращается, все небольшие неравномерности в окраске образца исчезают, что чрезвычайно облегчает сравнение. Здесь идет речь не столько о более или менее крупных неравномерностях окраски, которых во многих случаях легко избежать, сколько о неравномерностях весьма малых, создаваемых, например, бликами и тенями на мелких неровностях образца. Эти мельчайшие неравномерности окраски обычно оцениваются как так называемые «фактурные» особенности поверхности и в той или иной степени всегда имеются налицо. При вращении образца и соблюдении стандартных условий наблюдения (см. ниже стр. 64) особенности фактуры не играют роли, тем самым сильно повышается точность наблюдений.

Кроме того помещение образца на самую вертушку иногда оказывается обязательным, если только прибор не снабжен специальными приспособлениями, о которых будет сказано ниже. Это бывает при измерении цветов очень насыщенных или очень светлых.

При измерении сильно насыщенных цветов нередко случается, что одна, а то и две из его слагающих в отношении эталонных цветов отрицательны, вследствие чего цвета, получаемые смешением эталонных, окажутся недостаточно насыщенными по цвету. В этом случае для производства измерения необходимо предварительно понизить насыщенность измеряемого цвета на ту или иную известную величину, что осуществляется обычно путем

¹ В Москве градуировку цветных эталонов выполняет цветовая лаборатория Научно-исследов. текстильн. института (НИТИ) Б. Калужская ул., д. № 75, в Ленинграде Всесоюзный институт мер и стандартов (ВИМС) и Ленинградский оптический институт.

смешения измеряемого цвета с белым. Если измеряемый образец помещен в виде кружка на вертушку, то это осуществляется чрезвычайно просто.

Точно так же при измерении цвета очень светлых образцов могут встретиться такие цвета, для которых сумма слагающих должна была бы получиться больше единицы (чем светлее цвет, тем больше длина соответствующего вектора). В этом случае подобрать цвет с помощью эталонных оказывается невозможным,

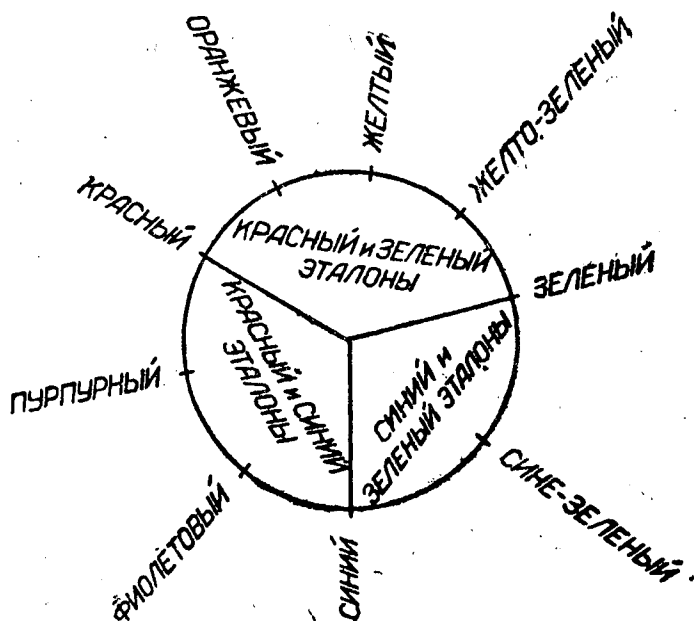


Рис. 9. Схема выбора эталонов для измерений.

так как сумма цветных секторов не может превысить размеров полной окружности. Тогда приходится помещать на вертушку образец в виде маленького кружка, занимая им не полный кружок, а лишь сектор той или иной величины и заполняя остальную часть маленького кружка черным. Таким образом количество измеряемого цвета (его свелота или яркость) настолько понижаются, что полученный цвет можно подобрать из эталонных.

На практике при измерениях тремя эталонами обычно имеют в запасе семь кружков, из них три цветных, белый и черный большого диаметра, а меньшего диаметра только белый и черный кружки. Из этих кружков фактически участвуют в измерениях в каждом отдельном случае только четыре, а именно: два цветных, один из двух белых и один из двух черных. Из цветных кружков выбирают два так, чтобы измеряемый образец лежал, если считать по кругу цветовых тонов, как раз между двумя данными. На рис. 9 изображено наглядно, какие именно два из обыч-

но применяемых трех цветных эталонов красного, зеленого и синего следует брать в том или другом случае.

Если цвет, получаемый смешением двух цветных эталонов, оказывается насыщеннее, чем измеряемый, то к ним прибавляют в качестве третьего белый (большой белый кружок). Если, наоборот, более насыщенным оказывается измеряемый цвет, то насыщенность измеряемого цвета понижают, смешивая его с тем или иным количеством белого (маленький белый кружок). Точно так же черный кружок приходится употреблять: либо большой — при измерении темных цветов, либо маленький — при измерении светлых цветов для понижения их светлоты.

В результате мы всегда можем добиться равенства по цвету наружного и внутреннего круга. Полученные результаты записываются в виде цветового уравнения. Решая это уравнение по правилам алгебры относительно измеряемого цвета (в том случае, если измеряемый цвет пришлось во время измерения изменять), мы находим его слагающие.

Необходимость в известных случаях видоизменять измеряемый цвет является, пожалуй, наиболее крупным минусом цветовых измерений вообще, а особенно измерений на вертушке, где это связано с помещением измеряемого образца на самую вертушку, что не всегда оказывается практически удобным. В более сложных приборах и в вертушках усовершенствованного типа необходимость вращать измеряемый образец (а потому и необходимость вырезать из него кружок) устраняется, но в некоторых случаях приходится все же видоизменять измеряемый цвет. Правда, с точки зрения измерения цвета, это изменение не является недостатком, так как мы всегда знаем внесенное изменение и исключаем его, разрешая цветовое уравнение.

Цветовые измерительные приборы могут, вообще говоря, служить не только для целей измерения, но и для целей воспроизведения цвета по заданным координатам (слагающим). Эта последняя возможность почти столь же важна для практики, как и самые измерения, так как представляет возможность быстро восстановить однажды измеренный цвет, даже спустя много времени или в другом месте, с полной точностью по одной записи. Поэтому прибор, на котором можно было бы не только вообще измерить, но и осуществить любой цвет, являлся бы чрезвычайно нужным.

Из существующих приборов эту задачу решают полностью только немногие конструкции (например колориметр Нетинга), которые для подбора цвета образца позволяют в качестве одного (или двух) смешиваемых цветов брать любые чистые спектральные цвета. Однако точность таких приборов не велика, они дороги (должны разлагать свет и спектр) и громоздки, а главное — в них цвет получается на черном фоне в визирной трубке, т. е. в условиях наблюдения, резко отличающихся от тех, в которых мы привыкли видеть окрашенные предметы. Вследствие этого

по цвету, видимому в трубке колориметра, трудно себе представить, каким будет казаться данный цвет в обычной обстановке.

На вертушке всегда можно получить, правда, не совсем полное, но сколь угодно близкое к полному,—решение этой задачи, вполне достаточное для практических целей. Для этого надо только иметь в своем распоряжении не три-четыре градуированных эталона, а большое их количество (например шт. 8—10). Среди них, кроме белого и черного, необходимо иметь с одной стороны более темные, а с другой стороны и более светлые эталоны, причем все они должны быть возможно большей насыщенности¹.

При воспроизведении и измерении светлых цветов надо брать из более светлых эталонов два ближайших по цветовому тону, лежащих по обе стороны от измеряемого, а для измерения и воспроизведения темных и притом сильно насыщенных цветов надо брать два темных цветных эталона, так как светло окрашенные эталоны обычно будут обладать меньшей насыщенностью по сравнению с темными (см. стр. 29). Для подбора цвета средней светлоты надо брать один из светлых и один из темных цветных эталонов, ближайших по цветовому тону. К выбранным двум цветным добавляют белый и черный кружки, чтобы иметь возможность точно подогнать цвет по его насыщенности и светлоте.

Так как при изготовлении кружков мы можем воспользоваться всеми возможностями, которые дает нам красочная промышленность, и кроме того изготавливать кружки с блестящей поверхностью (блестящие поверхности дают возможность получить окраску более насыщенную, чем матовые), то разве лишь в очень редких случаях может встретиться образец, который мы не могли бы воспроизвести. В огромном же большинстве случаев 10 хорошо выбранных эталонов дадут возможность воспроизводить все встречающиеся цвета и, следовательно, измерять их без внесения изменений в измеряемый цвет. Это позволяет измерять цвета маленьких образцов, а также предметов, находящихся на расстоянии или почему-либо не могущих быть помещенными на вертушку. Имея такой набор образцов, воспроизведение цвета по его координатам удобнее всего решать, пользуясь треугольником Ньютона (см. стр. 39). Для этого в треугольники должны быть нанесены точки, соответствующие имеющимся образцам, а также и соответствующие их яркости «грузы». Зная координаты какого-либо цвета, нетрудно нанести точку и груз, соответствующие данному цвету в треугольнике. Три эталонных цвета выбираются таким образом, чтобы воспроизводимый цвет лежал вну-

¹ Такую чрезвычайно выгодную систему эталонов дают например следующие 8 цветов: красный, синий, зеленый—все три сравнительно темные и очень насыщенные: красный киноварного оттенка, синий—примерно ультрамариновый, зеленый—средний, не обладающий ни заметной синевой, ни желтизной; затем три светлых эталона: желтый, светло-пурпуровый (розовый) и зелено-голубой; наконец, белый и черный эталоны.

три треугольника с вершинами в точках, соответствующих выбираемому эталону, и чтобы при соблюдении этого условия соответствующие эталонным цветам грузы были возможно большими.¹

Когда эталонные цвета выбраны, то, чтобы найти пропорции, в которых их надлежит смешать для воспроизведения данного цвета, соответствующий воспроизводимому цвету груз разлагается на три, лежащие в точках выбранных эталонных цветов, по правилам механики (т. е. на части, обратно пропорциональные расстоянию до соответствующей точки). Отношения полученных трех грузов к грузам, соответствующим эталонным цветам, дадут размеры секторов (в долях полной окружности), которые надо занять эталонными цветами, чтобы, таким образом, воспроизвести данный цвет.

Если сумма этих секторов окажется меньше единицы, то оставшая часть окружности должна быть занята черным.

Всякий, производивший какие-либо фотометрические измерения, знает, насколько повышается точность измерений, если сравниваемые по цвету поля вплотную прилегают друг к другу. При правильной установке оба сравниваемые поля сливаются в этом случае в одно, а граница исчезает. Для осуществления этих условий при измерениях на вертушке необходимо чрезвычайно тщательно следить, чтобы вставляемые друг в друга цветные кружки были совершенно одинакового диаметра, чтобы они при насадке на ось вертушки были хорошо центрированы и чтобы наконец сама ось не имела заметных биений. При несоблюдении этих условий при вращении по периферии кружков образуется более или менее широкая полоска, отличающаяся по цвету от остальной площади и понижающая точность измерений. Тщательно выполненная вертушка обыкновенно более или менее свободна от этих недостатков, но, поскольку отверстия в центре кружков постепенно разбалтываются, центрирование становится все более трудным.

Довольно простое приспособление дает возможность освободиться от всех этих забот. Оно состоит из трубочки, через которую можно рассматривать сравниваемые поля. Внутри обычной окулярной трубочки помещены две склеенные канадским бальзамом полулинзы (их можно сделать из обычных стекол для луп). Как видно из хода лучей, показанного на рис. 10, глаз наблюдателя видит два участка сравниваемых полей, вырезанные на некотором расстоянии от границы и чисто оптическим путем приведенные в непосредственное соприкосновение. При правильной установке трубочки через нее идет в этом случае совершенно однородный по цвету световой поток, и граница между обоими полями исчезает полностью. Неточная центровка кружков при употреблении данного приспособления не играет никакой роли, так как свет, отражаемый пограничным участком, не попадает в поле зрения.

Если измеряемый образец не вращается сам на вертушке, то описанное приспособление выполняет еще одну роль. Находящиеся в трубочке линзы помещены так, чтобы объект находился не в фокусе. Тогда на сетчатке получается расплывчатое изображение цветовой поверхности, причем теряются все мелкие неравномерности окраски, которые иначе затрудняли бы измерение.

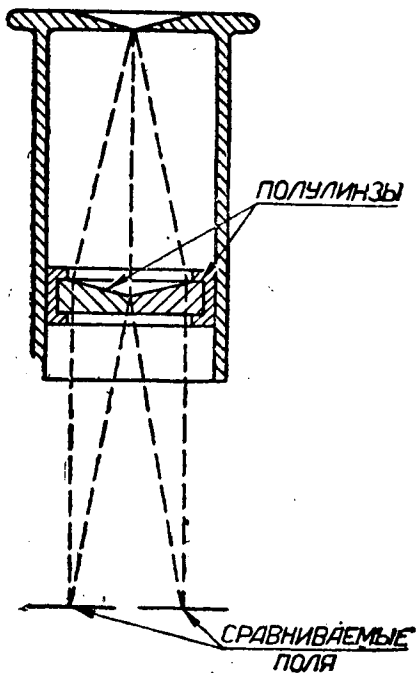


Рис. 10. Визирная трубка для оптического совмещения сравниваемых полей.

Описанные выше недостатки вертушки Максвелла: необходимость смещения с измеряемым цветом и необходимость тщательной центрировки кружков являются наиболее существенными, но они, как видим, сравнительно легко устранимы. Менее существенным недостатком является невозможность изменять пропорцию смешиваемых цветов «на-ходу», — во время вращения. Переставлять секторы можно только тогда, когда вертушка стоит, т. е. когда мы не видим цвета, получающегося при смешении. Это увеличивает время измерения, особенно, если наблюдатель мало опытен. Впрочем, для опытного наблюдателя значение этого недостатка сильно уменьшается, и правильная установка отыскивается довольно быстро.

Однако изобретательская мысль уже немало поработала над устранением и этого недостатка. Найденные решения хотя и удорожают несколько прибор, зато дают возможность подбирать цвет, не останавливая прибора. Несколько таких приспособлений уже испытано на практике. Остановимся на простейшем из них. Над неподвижно стоящим кружком располагаются две призмочки полного внутреннего отражения (см. рис. 11). Одна из них расположена как раз над центром кружка, а другая несколько сбоку. Свет, отражаемый с периферии кружка, попадает сначала на одну призму (А), а оттуда на другую (В) и затем уже через визирную трубочку описанной выше конструкции (см. стр. 51 — рис. 10), — в глаз наблюдателя.

При этом устройстве вращается не кружок с эталонами, а призма внутреннего отражения, причем ось вращения совпадает с осью кружка (призма В как раз расположена на продолжении оси вра-

щения). Нетрудно видеть, что при вращении призмы смещение будет происходить совершенно так же, как и в этом случае, если бы призмы были неподвижны, а вращался бы кружок.

То, что кружок в этой конструкции неподвижен, дает возможность изменять величину цветных секторов, не прекращая вращения призмы. Призмочки следует заключать в коробку, чтобы устранить посторонний свет. Сравнимый образец может быть помещен на эту коробку, причем точное совмещение границ сравниваемых полей достигается описанным выше устройством визирной трубки.

В конструкциях вертушек переносного типа одним из важнейших вопросов является привод, который давал бы нужное число оборотов (как было сказано, не менее 2000 об/мин). Если вертушка применяется внутри помещения, то наиболее целесообразным является быстроходный маломощный мотор. К сожалению, теперь иногда бывает трудно достать мотор с нужным числом оборотов. Можно, однако, пользоваться и более тихоходным мотором, сделав от него передачу. Хорошие результаты дают маленькие динамомашины постоянного тока (например, имеющиеся на рынке системы Курочкина), которые можно заставить работать в качестве мотора, питая их постоянным током от аккумуляторной батареи. Однако, в некоторых случаях (например, при работе в поле, а также в случае отсутствия подходящего мотора) нужную скорость вращения можно получить от механического привода того или иного типа. Ручной привод едва ли можно признать удобным; он хотя и применяется, но в большинстве случаев только для демонстраций. Удобнее привод от часового механизма, но в этом случае необходимо предусмотреть тормоз, останавливающий вращение для перестановки кружков. Часовой механизм, как и всякая вообще зубчатая передача, неминуемо удорожает прибор. Для удешевления стоимости прибора имеется ряд различных конструкций, из которых особенного внимания заслуживает модель с пневматическим приводом по системе Загаринского. Она является наилучшей по своей легкости и дешевизне из всех известных конструкций, предназначенных для широкого распространения.

Колориметр т. Загаринского (см. рис. 11-а) montирован на небольшой струбцинке, которую можно привинчивать к столу или просто держать в руках. Очень легкий опорный кружок *б* с делениями укреплен на тонкой оси (вязальная спица), на той же оси укреплено согнутое из тонкой жести турбинное колесо

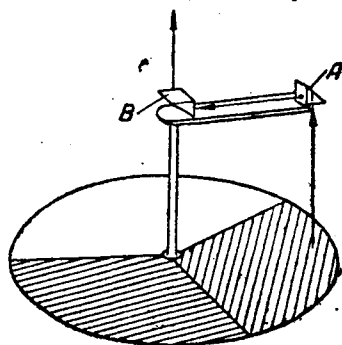


Рис. 11. Вертушка с призмами полного внутреннего отражения (схема).

(на рис. 11-а это колесо прикрыто кожухом *c*). Струя воздуха от резиновой груши *d* ударяет в лопасти турбинки, для чего резиновая трубка, идущая от груши, заканчивается металлическим наконечником, укрепленным на струбцинке в надлежащем положении. Цветные эталоны, лежащие на опорном кружке, прижимаются к этому последнему небольшой фрикционной

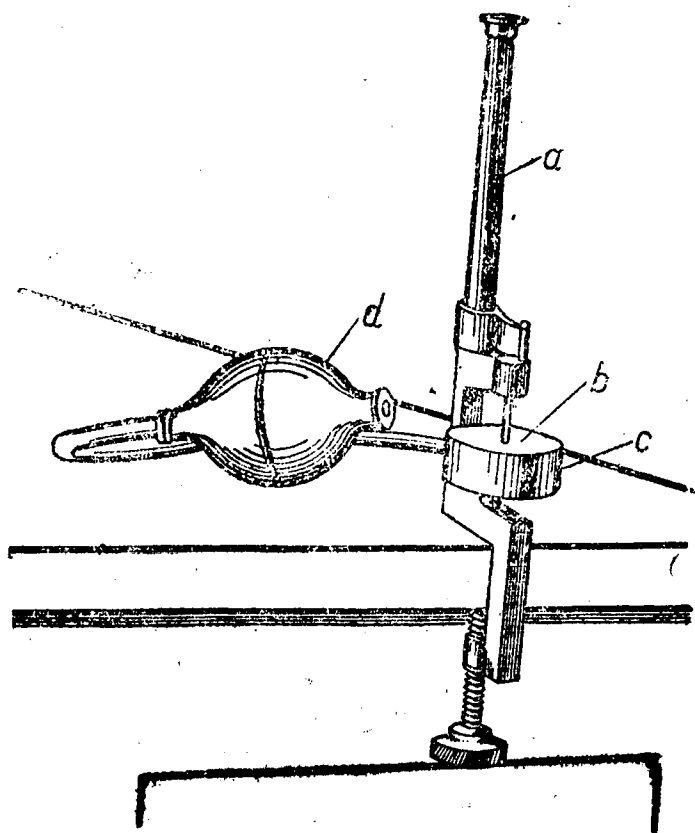


Рис. 11-а. Колориметр Загарнского *a* — визирная трубка; *b* — эталонные кружки; *c* — кожух турбинки; *d* — резиновая груша.

муфтой. Над кружком помещается визирная трубка *a*, подобная изображенной на рис. 10. Вращающаяся система прибора настолько легка, что достаточно двух-трех нажимов груши для получения числа оборотов, необходимого для полного смешения цветов на кружке. Преимуществом данного прибора является его портативность, простота конструкции и независимость от источника энергии (мотора, пружины и т. д.), приводящего кружок во вращение. Аналогичным способом можно приводить во

вращение не самый кружок, а призмочки полного внутреннего отражения, подобно тому как это показано на рис. 11. Последнее, хотя несколько и усложняет прибор, зато делает работу на нем значительно более быстрой и удобной. Прибор системы Загаринского легко может быть изготовлен собственными средствами.

Наиболее употребительными приборами более сложной конструкции является колориметр Гилда и колориметр Нетинга. Колориметр Гилда представляет собой по принципу ту же вертушку Максвелла, но чрезвычайно усложненную. В нем смешиваются световые потоки, поочередно освещающие белую поверхность. Эти световые потоки создаются специальными источниками, проходящими через три светофильтра, причем смешение производится чередованием. В этом приборе изменение пропорций, в которых смешиваются цвета, достигается с помощью заслонок, прикрывающих большую или меньшую часть поверхности светофильтров, причем их устройство таково, что изменение количеств смешиваемых цветов возможно производить на ходу. Сравнимые поля прилегают непосредственно друг к другу, так что при правильной установке оба поля сливаются в одно.

Как и в большинстве приборов, в колориметре Гилда для измерения очень светлых цветов и цветов малой насыщенности иногда приходится ослаблять яркость (изменять количество) измеряемого цвета и понижать его насыщенность прибавлением того или иного количества белого. Для этого не требуется, однако, вращать измеряемый образец, так как прибавление белого осуществляется с помощью оптической системы. При измерении сравниваемые поля находятся на черном фоне, что повышает точность измерений, но зато делает прибор малопригодным для целей воспроизведения цвета по заданным характеристикам. Более подробное описание прибора читатель найдет в изданиях, указанных в конце книги, я же не буду подробно на нем останавливаться, так как этот прибор очень дорог и требует специальной стационарной установки, что делает его доступным только большим лабораториям.

Колориметр Нетинга сконструирован так, что цвет образца подбирается из смеси одного какого-либо чистого спектрального (или двух спектральных) и белого света. Участвующее в смешении количество того и другого света регулируется с помощью скрещенных николей. Измерения дают в качестве результата числа, характеризующие цветовой тон в длине волн соответствующего спектрального, яркость цвета в гетерохромных единицах и насыщенность в виде отношения яркости чистого спектрального, участвующего в смеси, к яркости измеряемого цвета.

Насыщенность, измеренная в этих единицах, как было указано ранее, носит название чистоты цвета.

Если желательно перевести данные колориметры Нетинга на обычные трехцветные, то это делается с помощью описанной выше номограммы (стр. 41, рис. 6; подробнее об измерениях при помощи колориметра Нетинга см. в изданиях, указанных в конце книги).

Наиболее существенным недостатком колориметра Нетинга является его небольшая светосила, происходящая вследствие разложения света в спектр и последующего ослабления поляризацией (применение николей), что заметно понижает точность измерений. Кроме того при измерении на этом колориметре обычно вводится гетерохромное фотометрирование, т. е. сравнение по яркости цветов различного цветового тона и насыщенности (различных качественно). Гетерохромное фотометрирование дает всегда показания менее точные, так как отсутствует объективный критерий правильности установки: слияние сравниваемых полей в одно. Точно так же индивидуальные колебания в гетерохромных измерениях значительнее, чем в определении коэффициентов цветовых уровней.

Колориметр Нетинга принадлежит к числу дорогих и сложных приборов, требующих стационарной установки, т. е. является прибором, предназначенным исключительно для использования в лабораторной обстановке.

Ленинградским оптическим институтом в настоящее время выработано несколько хороших моделей цветовых измерительных приборов. Три эталонных цвета представлены в этих приборах, как и в колориметре Гилда, тремя светофильтрами, через которые проходит свет от стандартного источника света, причем количество цвета регулируется с помощью заслонок, которые могут в большей или меньшей степени прикрывать эти светофильтры. Но смешение световых потоков производится не чередованием потоков, а с помощью конденсора, который проектирует изображение светофильтров в зрачок, в силу чего на сетчатке глаза смешиваемые цвета накладываются друг на друга, т. е. мы имеем одновременное действие складываемых цветов на один и тот же участок сетчатки, а не чередующиеся, как на вертушке и в колориметре Гилда.

Ленинградские модели хотя и являются дорогими приборами, но все же имеют перед колориметрами Гилда и Нетинга преимущество значительно большей портативности. Особенно это относится к фабрично-заводской и полевой моделям, которые, как показывает само их название, предназначены для употребления вне стен лаборатории. Полевая модель интересна еще тем, что приспособлена для измерения цвета отдаленных предметов.

Из разнообразных приборов, предлагавшихся для измерения цвета, особенного внимания заслуживает неосуществленное еще предложение, которое представляется интересным методом объективных цветовых измерений. Это предложение заключа-

ется в применении для цветовых измерений трех фотоэлементов со светофильтрами перед ними, которые должны быть выбраны так, чтобы произведения кривой пропускания светофильтров на кривую спектральной чувствительности фотоэлементов давали бы спектральные кривые чувствительности трех нервных центров среднего человеческого глаза. Достаточно осветить тот или иной из фотоэлементов каким-либо светом, в частности светом, отраженным от образца, чтобы стрелка гальванометра непосредственно дала соответствующую координату цвета. Такой прибор позволил бы, во-первых, избежать более или менее длительной операции подбирания измеряемого цвета, во-вторых, давал бы цветовые координаты прямым отсчетом без каких-либо пересчетов и, в-третьих, свел бы до минимума индивидуальные ошибки наблюдателя, которые при подборе цвета глазом всегда могут происходить. Однако и этот прибор, несмотря на все его преимущества, едва ли может сильно конкурировать с вертушкой, так как он несомненно будет дорогим и более или менее неудобным при переноске с места на место.

Ограничусь сказанным в отношении измерительных приборов, отсылая желающих ознакомиться с ними подробнее к специальной литературе. Считаю, однако, своим долгом предостеречь от появляющихся от времени до времени приборов, предназначенных якобы для измерения цвета, но не пригодных для этой цели. Сюда относятся, во-первых, все приборы, в которых между глазом наблюдателя и измеряемым цветом помещаются светофильтры. Такое помещение светофильтров ни в коем случае недопустимо, так как, каков бы ни был светофильтр, всегда могут оказаться предметы такой окраски, которые при рассмотрении без светофильтра неотличимы по цвету, а при рассмотрении со светофильтром довольно сильно различаются, и обратно.

Отсюда ясно, что эти приборы должны давать при измерении противоречивые данные, т. е., с одной стороны, различные для неотличимых цветов, и, с другой, одинаковые для цветов, отличающихся очень значительно. К числу таких приборов, непригодных для цветовых измерений, принадлежат и ставшие широко известными, благодаря рекламе фирмы «Унесма» и авторитету их изобретателя, — приборы Оствальда.

Наибольшая опасность заключается здесь в том, что противоречивость данных, даваемых этими приборами, обычно обнаруживается не сразу, а только после накопления довольно большого экспериментального материала. Практиков обычно подкупает простота «измерений» этими приборами. Первые встречающиеся несообразности относят обыкновенно к неточностям опытов и только гораздо позже убеждаются в полной непригодности приборов. Так в Германии был основан специальный институт, производивший измерения по системе и при помощи приборов Оствальда, и понадобилось почти десять лет для того, чтобы убедиться в их полной непригодности. В настоя-

щее время этот институт, как и все крупные лаборатории в мире, перешел на измерения по трехцветному методу.

Кроме указанных приборов общего характера для измерения всяких цветов, имеются измерительные приборы, специально приспособленные для измерения в узкой цветовой области. Состоявшееся в апреле 1932 г. совещание по цветоведению при ВАЛОТ (Всесоюзная ассоциация лабораторий осветительной техники) особенно подчеркнуло необходимость разработки конструкций подобного рода. Сюда относятся приборы для измерений небольших отклонений по цвету, в частности отклонений от белого (приборы для измерения белизны). Работы по приборам такого типа ведутся в настоящее время Ленинградским оптическим институтом, которым уже создан и испытан в практической работе ряд приборов.

ТОЧНОСТЬ ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ВОПРОС О ДОПУСКАХ ПО ЦВЕТУ

Цветовые измерения отличаются от других чисто физических измерений тем, что их точность принципиально ограничена точностью нашего зрительного аппарата. Правда, поскольку цвет определяется физическим составом света, мы можем исследовать этот свет с любой точностью, но эта точность, если нас интересует только видимый цвет, имеет смысл лишь до определенных пределов, дальнейшее же увеличение точности становится бессмысленным. Поэтому при постановке вопроса о точности цветовых измерений, а следовательно и вопроса о допусках по цвету, необходимо предварительно рассмотреть вопрос о точности наблюдений самого глаза или, вернее, о чувствительности глаза к изменениям цвета.

Вообще говоря, чувствительность глаза к различиям очень сильно зависит от обстановки, в которой ведутся наблюдения, от фона, на котором находятся сравниваемые образцы, от величины сравниваемых полей, от продолжительности наблюдений, от того, какой свет действовал на глаз за время, предшествующее наблюдению (адаптация), и т. д.

Поэтому все эти моменты должны быть твердо фиксированы (см. ниже, «Стандартные условия измерений», стр. 65). Кроме того приходится различать чувствительность глаза к различного рода изменениям цвета, напр., по яркости (светлоте), насыщенности, цветовому тону.

Наиболее хорошо изученным является вопрос о чувствительности глаза к изменению яркости. Оказывается, что абсолютная чувствительность чрезвычайно сильно зависит от яркости (светлоты) самих сравниваемых цветов, относительная же чувствительность (отношение едва заметного прироста количества к самому количеству) остается в довольно широких пределах постоянной. В среднем ее принимают равной 1%, хотя опытным эксперимен-

таторам удастся в особо благоприятных условиях повышать ее до 0,2%. С другой стороны, относительная чувствительность глаза к различиям в яркости оказывается ниже 1% при очень малых и при очень больших яркостях. После известного предела (слепящая яркость) дальнейшее увеличение силы света вообще не замечается глазом. Примером является солнечный диск, который кажется для глаза совершенно равномерно ярким, тогда как на самом деле сила света, испускаемая средней частью, примерно вдвое превышает силу света, испускаемого краями.

Таким образом, при постепенном увеличении яркости действующего на глаз света, абсолютная чувствительность глаза все время уменьшается, причем чувствительность уменьшается в первое время медленнее, чем возрастает яркость (относительная чувствительность повышается). Затем наступает момент, когда абсолютная чувствительность начинает убывать пропорционально увеличению яркости (относительная чувствительность остается постоянной). Этот более или менее постоянный участок относительной чувствительности охватывает довольно широкий диапазон яркостей, наиболее благоприятных в смысле относительной чувствительности глаза. При еще большем увеличении яркостей абсолютная чувствительность падает быстрее, чем возрастает яркость, т. е. наблюдается падение не только абсолютной, но и относительной чувствительности к дальнейшему увеличению яркости, пока наконец глаз совершенно перестает замечать дальнейшее увеличение силы света.

Обозначив через df кажущийся весьма малый прирост яркости, когда действительная сила света увеличивается на величину ah , а яркость сравниваемых полей через h , мы можем сказать, что в пределах области максимальной (и постоянной) относительной чувствительности глаза к различиям по яркости эта чувствительность выражается формулой:

$$df = C \frac{ah}{h},$$

откуда, интегрируя, имеем:

$$f - f_0 = C(lgh - lgh_0),$$

т. е. кажущееся различие по яркости двух цветов пропорционально разности логарифмов соответствующих яркостей (C — постоянная, зависящая от выбора единицы измерения сила света). Эта формула выражает известный закон Вебера-Фехнера, применимый не только к реакции зрительного аппарата, но в большей или меньшей степени ко всем вообще реакциям наших органов чувств на внешнее раздражение.

Однако, как было указано, этот закон Вебера-Фехнера нарушается при очень больших и при очень малых яркостях, причем в обоих случаях мы получаем меньшую относительную чувствительность, т. е.

$$f - f_0 < C(lgh - lgh_0).$$

Чувствительность глаза к различиям по яркости сравнительно мало зависит от цветового тона и насыщенности цвета (практически можно считать, что она совершенно не зависит), если только яркости не слишком малы и не слишком велики, но зато сильно зависит от яркости окружения (фона) и от адаптации. Точно так же точность измерений зависит от величины сравниваемых полей и от целого ряда других факторов более или менее второстепенного значения. Как общее правило, надо сказать, что темное окружение увеличивает чувствительность глаза к различиям, если только различие между яркостью сравниваемых полей и яркостью окружения не слишком велико.

Чувствительность глаза к различиям по цветовому тону и насыщенности изучена значительно хуже чувствительности к яркости. Во всяком случае можно сказать, что связь между величиной кажущихся различий между цветами и действительными различиями между световыми потоками, вызывающими эти цвета, в достаточной мере сложна.

Поскольку векторное изображение цвета дает размещение цветов в пространстве, то, казалось бы, естественно было бы измерять степень различия между цветами расстоянием между соответствующими точками пространства. Но, к сожалению, кажущиеся различия между цветами резко не соответствуют этим расстояниям в той системе расположения цветов, которую мы рассматривали выше. Наиболее резко это сказывается в отношении цветов различной яркости. Длина цветового вектора (расстояние от начала координат), как было указано выше (см. стр. 13—14), пропорциональна величине светового потока, приходящегося на единицу поверхности сетчатки, а ощущение, как указывает закон Вебера-Фехнера, в широких пределах пропорционально логарифму этой величины. В отношении различий по цветовому тону и по насыщенности вопрос осложняется еще тем, что расстояние между цветами при их пространственном размещении зависит от того, как были выбраны при построении исходные единичные векторы¹.

В настоящее время в целом ряде стран, а в частности и у нас, в СССР, ведутся работы по исследованию кажущихся различий между цветами и связи величины этих кажущихся с трехцветными координатами цвета. Результатом работ должна явиться формула, дающая возможность определять величины кажущихся различий между цветами, когда известны координаты сравниваемых цветов. Такие формулы уже предлагались и как будто дают хорошие результаты. Во всяком случае этими

¹ Формула расстояния в аналитической геометрии имеет различный вид в зависимости от угла между осями координат, в частности в зависимости от того, имеем ли мы дело с прямоугольной или косоугольной координатной системой. Более обстоятельное рассмотрение этих вопросов интересующиеся найдут в моих добавлениях к книге проф. Федорова «Современное состояние колориметрии».

формулами приходится пользоваться впредь до их уточнения.

Наилучшей формулой этого типа, повидимому, является формула, предложенная Шредингером, которая имеет следующий вид

$$\Delta = \sqrt{\left(\lg \frac{h_1}{h_2}\right)^2 + 4\left(\arccos \frac{\rho \sqrt{r_1 r_2} + \gamma \sqrt{g_1 g_2} + \beta \sqrt{b_1 b_2}}{\sqrt{h_1 h_2}}\right)^2} \tag{14},$$

где Δ обозначает величину кажущегося различия между двумя цветами, которым соответствуют элементарные раздражения r_1, g_1, b_1 , и r_2, g_2, b_2 , h_1 и h_2 обозначают светлоту (яркость) сравниваемых цветов, выраженную в гетерохромных единицах (см. стр. 26), а ρ, γ, β светлотные коэффициенты, т. е. иначе говоря:

$$h_1 = \rho r_1 + \gamma g_1 + \beta b_1; \quad h_2 = \rho r_2 + \gamma g_2 + \beta b_2.$$

Автором настоящей книги была предложена другая упрощенная формула, в которой единичные цветовые векторы выбраны: белый, красный (x), соответствующий цвету крайнего спектрального красного, и желтый (y), соответствующий примерно спектральному 569 *mμ*.

$$\Delta = \sqrt{K \left(\lg \frac{h_1}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{h_1} - \frac{x_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{h_1} - \frac{y_2}{h_2}\right)^2 + \dots} \tag{15},$$

где h_1 и h_2 имеют то же значение, что и раньше (гетерохромная светлота), а величина K определяется из опыта. Эта формула, возможно, менее точна, чем формула Шредингера, хотя, впрочем, обе они нуждаются в тщательной экспериментальной проверке, которая в настоящее время и ведется¹.

Практическое значение этих формул заключается в том, что они дают единую меру отклонений по цвету, соответствующую оценке степени различия на глаз. Особенно необходима такая мера в тех отраслях промышленности, где цвет важен сам по себе и где существенно, чтобы отклонение по цвету именно на глаз не превышало определенной нормы. В тех случаях, когда цвет служит косвенным показателем для нас, в первую очередь важны действительные, а не кажущиеся различия, а потому в случае таких измерений величина отклонения от нормы может, собственно говоря, измеряться вектором разности двух данных цветов.

Однако в этом случае необходимо, во-первых, дополнительно условиться, какие углы составляют между собою изображающие стандартные цвета векторы, которые служат осями координат. Удобнее всего считать их прямыми. Находя координаты остальных цветов по отношению этих трех, мы можем измерять степень различия между любыми двумя цветами обычной для прямоугольных координат формулой расстояния²:

$$L^2 = x^2 + y^2 + z^2 \dots \dots \dots \tag{16}$$

¹ Подробнее см. II дополнение к цит. книге Федорова.
² Как известно из аналитической истории, в случае косоугольных координат в формулу расстояния войдут координатные углы.

Этот способ определения величины отклонений представляет известные неудобства даже в тех случаях, когда субъективная оценка степени различия не имеет существенного значения, так как, поскольку измерение цвета в большинстве случаев производится субъективно (за исключением не осуществленного еще прибора с фотоэлементами, см. стр. 57), точность измерений зависит именно от величины кажущихся, а не действительных оптических различий. Поэтому, если дать очень узкие допуски для уклонений по цвету, то по последней формуле они могут оказаться для некоторых цветов за пределами точности измерений, в то время как для других цветов они будут казаться на глаз чрезвычайно грубыми. Таким образом этот способ определения допусков можно принять лишь в случаях, когда: 1) цвет не представляет самодовлеющего интереса, а интересен лишь в качестве косвенного показателя, 2) размеры допусков таковы, что ни для одного из подвергаемых измерению цветов они не выходят за пределы точности измерительного прибора. Последнее практически осуществимо (если нежелательно введение слишком грубых допусков) лишь при условии, что цвета, могущие встретиться при измерении, не слишком сильно различаются друг от друга (главным образом — не слишком различаются по светлоте). Во всех других случаях, впредь до более подробного изучения вопроса, надлежит пользоваться одной из формул (14) и (15), приведенных ранее. Впрочем, вторая из них (15) лишь немного сложнее простой формулы расстояния (16).

Собранные до сего времени экспериментальные данные о размерах кажущихся различий в цвете, несмотря на довольно многочисленные опыты, все же приходится еще признать крайне неподными и недостаточно надежными. Причиной этому является большая сложность зависимости между физическими различиями в составе света и кажущимся различием в цвете. Только для качественно одинаковых (различающихся исключительно по светлоте) цветов эта зависимость выражается в виде сравнительно простого закона Вебера-Фехнера.

Но едва ли не главное затруднение состоит в том, что размеры кажущихся различий очень зависят от условий, в которых производится опыт, в первую очередь: от адаптации глаза, от фона, на котором находятся сравнительные цвета, от времени наблюдения и т. д.

С точки зрения получения постоянных результатов особенно неприятна зависимость от адаптации, которая ставит безусловным требованием не только точную фиксацию времени наблюдения, но и сведения этого времени до минимума, чтобы адаптация не могла за данный промежуток времени измениться слишком сильно.

Наконец проведение опытов измерения кажущихся различий сильно усложняется самым характером исследования. Конкретно целью опыта является обыкновенно установление того минималь-

ного изменения в составе света, которое вызывает едва заметное изменение цвета на глаз, т. е. ведется работа по нахождению так называемых «порогов» различия. Эти пороги следует измерять для всевозможных цветов, так как для различных цветов эти пороги, как видно хотя бы из закона Вебера-Фехнера, различны. Поскольку же цвет может изменяться в различных направлениях, то для каждого цвета надо найти по меньшей мере три порога: напр. по светлоте, насыщенности и цветовому тону.

Нахождение каждого отдельного порога требует проведения довольно большого количества отдельных экспериментов. В самом деле, надо, с одной стороны, найти *наименьшее* заметное различие.

Но, с другой стороны, так как время наблюдения (адаптации) должно быть зафиксировано, то нельзя постепенно увеличивать различие между сравниваемыми цветами вплоть до того момента, когда различие станет заметным, потому что адаптация во время опыта все время будет изменяться, и результат будет сильно зависеть от скорости, с которой увеличивают различие.

Таким образом более или менее надежные данные можно получить только при следующей постановке опытов. Перед каждым отдельным отсчетом наблюдатель должен иметь перед глазами определенное совершенно равномерно окрашенное (серое) поле, на которое он смотрит, пока адаптация не установится окончательно. Затем ему предъявляются на вполне определенный короткий срок два прилегающих поля, несколько отличающихся друг от друга, про которые он должен сказать: одинаковы они или различны (сливаются ли они оба в одно или нет).

Проводя значительное количество опытов с цветами, более или менее отличающимися от данного, определяют величину наименьшего объективного различия между цветами, которое заметно на глаз.

Здесь, впрочем, встречается ряд трудностей, которые окончательно преодолеваются только при большом количестве опытов с последующей статистической обработкой материала. Таким образом для вполне надежного определения одного лишь порога требуется по меньшей мере несколько десятков отдельных опытов.

Такая работа имеет, однако, первостепенную важность и ведется теперь целым рядом лабораторий, в том числе и в СССР. Наряду с этими решающими, но длительными экспериментами, приходится, однако, пользоваться и другими имеющимися в настоящее время, хотя эти эксперименты не являются вполне надежными и несомненно со временем должны быть исправлены на основании более точных данных. Эти предварительные опыты и были использованы в тех формулах различий, которые были приведены выше (см. стр. 61).

СТАНДАРТНЫЕ УСЛОВИЯ ВЕДЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Так как цветовое ощущение вполне определяется составом света только при соблюдении известных стандартных условий наблюдения, то для получения сравнимых между собой результатов необходимо фиксировать эти условия, устраняя все факторы, могущие исказить измерения. Таких побочных влияний на измерения можно насчитать немало, хотя далеко не все они могут вызвать крупные ошибки. Во многих случаях, когда измерения не должны быть очень точны (технические измерения), можно совершенно пренебречь одними из условий стандартного наблюдения, а другие соблюдать не с такою строгостью, как в измерениях, имеющих научное значение.

Наиболее важными факторами, могущими оказать влияние на результаты измерений, являются следующие: размер сравниваемых полей, цвет фона, на котором находятся эти поля; состояние адаптации глаза. Кроме того, когда измерительные эталоны или подвергаемые измерению предметы не излучают собственного света, большое значение имеют: спектральный состав света, при котором производятся измерения; угол, под которым освещены сравниваемые поля, и угол, под которым рассматриваются эти поля. Этим и ограничиваются основные моменты, которые надо принимать во внимание при производстве цветовых измерений.

Все другие помехи, которые могут встретиться, не вносят существенных искажений в результаты измерения.

Требование соблюдения размеров поля вытекает из указанной уже выше (см. 32) неоднородности в строении сетчатки глаза, в которой наряду с колбочками находятся и палочки, реагирующие на цвет несколько по-разному. Палочки практически совершенно не участвуют в работе глаза, если изображения сравниваемых полей полностью укладываются в пределах желтого пятна сетчатки, где имеются одни только колбочки. Это требование удовлетворяется, если угол, под которым мы видим сравниваемые поля, не превышает $0,85$ углового градуса каждое. Впрочем и при несколько больших размерах зрительного поля отклонения будут невелики, так как части сетчатки, прилегающие к желтому пятну, тоже преимущественно состоят из колбочек; только более тщательные измерения обнаруживают в этих случаях расхождения, для опытов же технического характера они большого значения иметь не могут. Устранению влияния палочек способствует также, если фон, окружающий сравниваемые поля, светлый, однако такой фон обычно понижает чувствительность глаза к цветовым различиям.

Очень серьезным моментом является вопрос о фоне и адаптации, в особенности потому, что удерживать адаптацию на постоянном уровне крайне трудно, так как она изменяется в процессе самого измерения.

Различается несколько видов влияния адаптации на измерения. Во-первых, когда при измерениях сравниваются два различных по цвету поля и наблюдение производится более или менее длительно, то на соседних участках сетчатки создаются различные состояния глаза, в силу чего даже совершенно одинаковые цвета могут казаться различными. При трехцветных измерениях это не имеет особого значения, так как, стараясь установить полное тождество двух полей, мы их всегда удерживаем во время измерения довольно близкими по цвету, а потому и состояние соседних участков сетчатки будет настолько близким, что не произойдет заметных искажений.

При гетерохромной фотометрии возможность различной адаптации соседних участков представляет более серьезную опасность, а потому при длительных наблюдениях рекомендуется вести их с перерывами, во время которых следует смотреть некоторое время на однородно окрашенную поверхность (например серую), чтобы на всей сетчатке установилась одинаковая адаптация. Кроме неравномерной адаптации, здесь некоторое влияние может оказать и самый ее уровень. С качественной стороны, точно такое же влияние имеет и цвет фона, на котором находятся сравниваемые поля¹.

Характерной особенностью трехцветных измерений является полная их независимость (по крайней мере в тех случаях, когда поля не слишком велики) от уровня адаптации и фона, при условии одинаковости адаптации для обоих сравниваемых полей и повсеместной одинаковости фона.

Эта чрезвычайно важная особенность трехцветных измерений может считаться вполне доказанной в случаях, когда соблюдены размеры поля (чистое центральное зрение), но и при больших размерах поля ошибка в определении коэффициентов цветовых уравнений настолько мала, что ей можно пренебречь, по крайней мере при технических измерениях. При производстве гетерохромных установок, наоборот, соблюдение стандартного фона и адаптации совершенно необходимо.

Гораздо более жесткими и в отношении трехцветных измерений являются требования стандартности источника освещения, так как при изменении его спектрального состава изменяется и состав света, отражаемого предметом. При этом, зная только цвет окрашенного предмета или светофильтра при одном определенном освещении, но не зная всей кривой отражения или пропускания, принципиально невозможно предугадать, каков будет этот цвет при другом освещении. Предметы, не различимые по цвету при одном освещении, могут очень сильно различаться при другом. Например, светофильтр, кажущийся при дневном

¹ Влияние фона частично именно и заключается в изменении адаптации глаза. Так как глаз никогда не находится вполне неподвижным, то измеряемый цвет постоянно попадает на тот же участок сетчатки вслед за воздействием на него цвета фона.

свете зеленым, при электрическом свете может казаться красным¹.

Правда, применяемые в приборах эталоны обычно не меняют цвета столь резко, но все же эти изменения могут оказаться значительными, а главное, их нельзя заранее предугадать. Поэтому наличие постоянного не только по цвету, но и по спектральному составу освещения является одним из важных условий для измерения цвета. Измерения следует считать вполне надежными, если цветные эталоны освещены тем самым источником, при котором они градуировались.

Пользование естественным дневным освещением для точных измерений тем самым исключается, поскольку оно довольно непостоянно по спектральному составу. Впрочем, при технических измерениях нередко пользуются и естественным освещением, причем очень часто расхождения, получаемые вследствие переменчивости освещения, оказываются в допустимых пределах.

Практика таким образом показывает, что при более или менее грубых измерениях можно удовлетвориться естественным освещением, хотя в этом случае мы никогда не можем быть гарантированы от ошибок, правда, редких, но иногда очень значительных по размерам. Во всяком случае, при пользовании естественным освещением измерения нельзя производить под прямыми солнечными лучами, а также следует обращать внимание на то, чтобы поблизости не было больших однородно окрашенных поверхностей. Рефлексы от таких поверхностей иногда могут очень существенно изменить окраску предметов, причем человек обычно почти не замечает наличия рефлекса, если этот рефлекс захватывает большую площадь и перед глазами не имеется критерия для сравнений. Наоборот, пренебрегать различием в составе естественного дневного света и света искусственного (напр. электрического) недопустимо.

Кроме того очень важными являются для измерений размеры угла, под которым освещена сравниваемая по цвету поверхность, и угла, под которым производится наблюдение. Известно, что поверхность всегда отражает несколько по-разному свет, падающий в различных направлениях. Особенно резко заметно это на глянцевых поверхностях, которые «отсвечивают», т. е. кажутся белыми независимо от их окраски, при рассматривании их под углом, равным углу падения света. Даже идеально матовые поверхности отражают свет не во все стороны одинаково, но всегда отражают сильнее в направлении угла, равного углу падения света, чем по другим направлениям. Только для идеально матовых поверхностей характерной особенностью является независимость отражения от угла падения света, а также то, что отражение от них тем меньше, чем меньше угол отражения. Впрочем, идеально матовых поверхностей не существует, и все они более

¹ Такие светофильтры действительно существуют.

или менее блестят. Поэтому в зависимости от угла падения света и от угла, образуемого поверхностью с направлением на наблюдателя, цвет поверхности может иногда изменяться довольно значительно.

Обычно в жизни мы рассматриваем предметы под разными углами и по характеру изменения цвета в зависимости от угла узнаем степень его блеска или матовости. Это так называемые фактурные особенности поверхности, которые отнюдь не являются чем-то независимым от цвета, что и естественно, так как глаз ничего, кроме цвета, ощущать не может. Фактурные особенности поверхности определяются изменениями цвета при различных направлениях наблюдения и освещения¹ и в известных случаях могут затруднить цветовые измерения.

В самом деле, предположим, что эталоны, которыми производится измерение, — глянцевые, а измеряемые образцы — матовые. В таком случае установить их тождество по цвету весьма затруднительно, так как цвет тех и других, в зависимости от угла зрения, изменяется по-разному, и если под одним углом зрения мы установим тождество, то под другим углом оно нарушится. Более того, если даже наблюдатель неподвижен, но сравниваемые поля велики, то от разных частей поля направление на наблюдателя будет различным, а потому и правильная установка будет сильно затруднена.

Для устранения этих крупных неудобств необходимо производить измерения в условиях так называемого бесфактурного зрения, т. е. в условиях, при которых мы различаем только цвет предмета, но не его фактуру. Эти условия создаются при соблюдении требований: 1) ограниченности размеров сравниваемых полей, 2) определенного угла между окрашенной поверхностью и направлением на наблюдателя и, наконец, 3) направления освещения, причем угол падения не должен быть равен углу, под которым смотрят на поверхность.

В отношении способа освещения поверхности делались предложения двух родов: 1) чтобы освещение было рассеянным, т. е. равномерным со всех сторон, и 2) чтобы поверхность была освещена под углом 45° . Первое из этих предложений весьма трудно осуществимо на практике, поэтому освещение под углом 45° является в настоящее время общепринятым.

Наблюдение ведется под прямым углом к поверхности, причем для ограничения размеров сравниваемых полей между ними и глазом наблюдателя помещают экран с прорезью нужной величины. Если пользоваться описанной на стр. 51—52 окулярной трубкой (см. рис. 10), то она автоматически ограничивает размеры поля. Поэтому пользование окулярной трубкой следует еще раз настоятельно рекомендовать. Стационарная установка этой трубки дает возможность осуществить и перпендикулярность направления наблюдения к измеряемой поверхности.

¹ А также мелкими неравномерностями в окраске.

Если выполнение стандартных условий наблюдения почему-либо затруднительно, а самые измерения носят грубо приближенный характер, то в качестве паллиатива выдвигается требование, чтобы фактура эталонов была возможно более близкой к фактуре измеряемых предметов. Но к этому следует прибегать только в самых крайних случаях, при полной невозможности соблюсти условия наблюдения, что обычно не представляет большой трудности.

Перечень условий, необходимых для получения сравнимых между собою результатов, был бы не полон, если бы мы не упомянули об индивидуальных отклонениях, которые встречаются вследствие тех или иных отклонений в зрении отдельных лиц. Наиболее важными являются аномалии, называемые цветной слепотой, о которых сказано выше (см. стр. 35).

Цветовые измерения, сделанные цветнослепым, конечно, покажутся подчас совершенно непонятным для человека с нормальным зрением. Поэтому цветнослепые, которых встречается в среднем около 4-5%, производить цветовые измерения не могут. Дело несколько осложняется тем, что цветнослепые обычно научаются в жизни правильно называть цвета, и нередко встречаются случаи обнаружения цветнослепых, которые и не подозревали о наличии у них этого недостатка. Впрочем, проверка цветной слепоты производится довольно легко с помощью специальных таблиц.

Кроме цветовой слепоты, встречаются и другие, менее значительные уклонения, происходящие от того, что у некоторых лиц прозрачные вещества глаза обладают той или иной окраской. Наиболее крупные аномалии этого рода приписывают обычно более или менее сильной окраске желтого пятна, которое играет основную роль в цветном зрении. Лица с аномалиями этого рода дают наибольшие отклонения при измерениях синих и фиолетовых цветов; такие лица не должны допускаться к ответственным измерениям, но они могут принимать участие в измерениях технического характера, не требующих большой точности. Кроме того недостаток этого рода может быть исправлен специальными голубоватыми очками.

Описанный нами прибор с фотоэлементами (см. стр. 56—57) воспроизводит среднее человеческое зрение, и с таким прибором могут с одинаковым успехом работать люди с нормальным и аномальным зрением.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СТАНДАРТЫ

Необходимость введения стандартов в области колориметрии настолько осознана в настоящее время во всех странах, что имеются даже попытки введения стандартов в мировом масштабе. Соответствующая работа ведется и в СССР, и на состоявшемся в апреле 1932 г. совещании вопрос об окончательном установле-

нии основных стандартов был поставлен на очередь. Однако, поскольку стандарты еще не установлены окончательно, нам придется разобрать ряд различных предложений, делавшихся у нас и за границей в отношении одних и тех же объектов.

Оставляя пока в стороне вопрос о стандартности терминологии, интересующие нас стандарты можно разделить на две большие группы. Первая группа содержит стандарты, фиксирующие тот или иной *спектральный состав*, т. е. устанавливающие данные относительно каждой длины волны видимой части спектра (точнее, относительно длин волн через определенные интервалы с интерполяцией в промежутках)¹. Ко второй группе относятся чисто цветовые стандарты, где фиксируются только три координаты цвета, независимо от спектрального состава света, совпадающего со стандартным лишь *по цвету*.

К числу наиболее важных объектов стандартизации принадлежат: белый свет, белый цвет и белая поверхность. Эти три объекта следует строго различать друг от друга. Стандарт *белого света* должен фиксировать вполне определенную *кривую распределения энергии* в спектре некоторого источника. Стандарт *белого цвета* фиксирует только *цвет*, т. е. всякий источник света (или окрашенный предмет), не отличимый на глаз от стандартного эталона, сам может служить эталоном. Наконец стандарт *белой поверхности* определяет *кривую отражения*, т. е. фиксирует некоторое объективное свойство тела, не будучи в то же время принципиально связан чем-либо с ощущением цвета.

Эти три стандарта должны удовлетворять единому условию: стандартная белая поверхность, освещенная стандартным белым светом, должна быть стандартного белого цвета. Это условие делает излишним отдельное определение стандартного белого цвета, определяя его через два других стандарта.

Наиболее легкой является стандартизация белой поверхности, которая теоретически определяется как *идеально матовая поверхность, рассеянно отражающая полностью свет всех длин волн, падающих на нее* (см. стр. 30).

Однако это определение является только теоретическим, так как практически такую поверхность мы не в состоянии осуществить. Поэтому наряду с теоретической белой поверхностью требуется дать такой практический стандарт белой поверхности, который было бы нетрудно осуществить. В настоящее время происходят колебания между двумя предложениями: 1) пластинка, покрытая окисью магния (магnezия), и 2) пластинка, покрытая серноокислым барием («баритовая пластинка»).

Первое предложение дает стандарт, более близкий к теоретическому отражению (около 98%), но менее удобный в практическом отношении: малая прочность (не выдерживает пересы-

¹ При желании дать эмпирическую кривую полностью должны быть стандартизованы, во-первых, ряд отдельных ее значений, во-вторых, интерполяционная формула, в-третьих, количество знаков (точность).

лок), требование высокой чистоты материала в химическом отношении и т. д. Баритовая пластинка отстоит несколько дальше от теоретического идеала (отражение 92%), но зато она может быть легко изготовлена и является значительно более прочной.

Кстати следует отметить, что оба практических эталона отличаются от теоретического идеала, кроме более низкого коэффициента отражения, и небольшим цветным оттенком, так как отражают свет различных длин волн не вполне одинаково.

Много сложнее обстоит дело со стандартизацией белого света. Здесь возникают трудности теоретического и практического характера, так как одного установления теоретического стандарта мало, нужно создать удобный для пользования источник света, который давал бы именно стандартный белый свет.

В настоящее время имеется уже несколько предложений стандартов белого света. Разбирать вопрос о преимуществах того или иного предложения было бы совершенно бесполезно, не поставив предварительно перед собою с полной четкостью вопроса о цели, для которой предназначается стандарт. Стандарт белого света имеет несколько различных назначений, в силу чего и происходят нередко разногласия по вопросу о преимуществах того или иного стандарта.

Во-первых, для всяких измерений цвета окрашенных предметов, сравниваемых между собой, совершенно необходим постоянный источник света, так как изменение в спектральном составе освещения немедленно скажется на цвете предметов, видимых при этом освещении (см. стр. 28). Строго говоря, функцию освещения может выполнять любой источник света, вообще хотя бы даже и не белый, лишь бы при практическом пользовании этот источник давал возможность легко и надежно получать вполне стандартную кривую распределения. В отношении такого источника света основным является требование *постоянной кривой распределения и легкости практического осуществления*, требование же белизны света является второстепенным.

Единственное ограничение, которое приходится вводить, да и то только в общей форме, заключается в требовании, чтобы стандартное освещение содержало длины волн всех участков видимой части спектра в достаточном количестве. Это несколько неопределенное требование исключает из пользования только свет с линейчатым спектром, состоящим из немногих отдельных линий, как, например, желтое натровое пламя, свет ртутной лампы и т. п. Дело в том, что при линейчатом спектре окажутся затруднительными измерения таких окрашенных предметов, которые отражают по преимуществу свет, слабо представленный в спектре источника света. Требование, чтобы все участки спектра были достаточны полно представлены в источнике света, сводятся к тому, что свет источника может быть не обязательно белым, но во всяком случае он не может быть очень насыщенным цветным. Белизна света таким образом является в данном случае мо-

ментом второстепенным: по соображениям удобства осуществления и использования можно, например, пожертвовать строгой белизной.

Во многих случаях требование постоянства спектрального состава является, однако, явно недостаточным. Это бывает во всех тех случаях, когда существенный интерес представляет цвет предмета в определенных условиях освещения, напр. в условиях естественного дневного освещения.

Очевидно, что во всех таких случаях измерения цвета должны производиться в тех же самых условиях освещения, при которых требуется определить цвет предмета. Здесь вопрос осложняется тем, что встречающиеся на практике источники света не обладают вполне определенным спектральным составом.

Больше всего это касается дневного освещения, спектральный состав которого колеблется в довольно широких пределах. Дневное освещение всегда более или менее сложно по своему происхождению и состоит, во-первых, из прямого солнечного света, освещающего предмет, и, во-вторых, из света, исходящего от всевозможных объектов, освещенных солнечным светом. Этот «косвенный» свет по спектральному своему составу нередко очень сильно отличается от солнечного.

В отличие от прямого солнечного света этот свет исходит со всех сторон и может быть различным по спектральному составу в зависимости от того, какого цвета предметы находятся в соответствующем направлении. Для такого непрямого света общим названием является термин «рефлекс».

Рефлексы от наземных предметов могут быть, конечно, чрезвычайно разнообразны, но если поблизости не имеется больших однородно окрашенных поверхностей, то эти рефлексы условно могут быть исключены из рассмотрения, так как вследствие разнообразия окраски вносимые ими изменения в состав света взаимно компенсируются¹.

Возможность ошибок, происходящих от рефлексов, ослабляется тем, что большинство наземных предметов имеет сравнительно очень темную окраску, и отражаемый ими свет обладает малой яркостью по сравнению с прямым светом.

Гораздо большее значение имеют так называемый рассеянный свет голубого неба (рефлекс голубого неба) и рефлекс от облаков. Этот рассеянный свет представляет собою световое явление в мутных средах, наблюдающееся всякий раз, когда свет проходит через прозрачную среду, в которой взвешены мельчайшие (порядка длины световой волны) частицы какого-либо вещества другой оптической природы. Не входя в теорию этого вопроса, которую можно найти в учебниках по оптике (а также

¹ Предположение это, повторяем, законно только при условии, что вблизи измеряемого предмета не имеется больших поверхностей, однородно окрашенных в яркие цвета. Так, например, среди зелени свет будет содержать заметно большее количество зеленых спектральных.

во многих элементарных учебниках физики), укажем, что сквозь мутную среду хорошо проходит, не изменяя своего направления, только свет сравнительно большой длины волны, свет же с более короткой волной (синий конец спектра) рассеивается во все стороны и притом рассеивается, как правило, тем сильнее, чем короче длина его волны. Величина длины волны света и степень его рассеивания зависят также и от величины производящих муть частиц. Чем крупнее эти частицы, тем сильнее рассеивание в количественном отношении и тем более длинные волны оно охватывает.

В воздухе мутящими частицами являются, главным образом, капельки конденсирующейся влаги, пыль и т. п. Их размеры, а следовательно и все явления рассеяния, сильно зависят от атмосферных условий. В безоблачный день и когда солнце стоит высоко, рассеяние сильно захватывает, главным образом, синюю и фиолетовую части спектра, но так как наряду с мелкими мутящими частицами всегда встречаются и более крупные, рассеиванием захватываются, хотя и в меньшей степени, убывающей с длиной волны, зеленые, желтые, оранжевые и даже красные спектральные. Тот свет, который не рассеялся (поглощение света можно считать в данном случае весьма малым), проходит сквозь толщу воздуха, не изменяя своей направленности.

Направленный свет и есть прямой солнечный свет, а рассеянный в воздухе свет, который в конце концов достигает земли, является светом голубого неба. Небо потому и кажется голубым, что рассеянию значительно сильнее подвергнуты более короткие (синие) лучи спектра. Прямой солнечный свет, лишенный значительной части синих лучей, наоборот, кажется желтым.

В случае облачного неба образующие облака капельки настолько крупны, что рассеивают более или менее полно все лучи видимой части спектра, а потому в облачный день мы имеем рассеянный свет, для которого кривая распределения энергии лежит между кривой распределения прямого солнечного света и кривой распределения в свете голубого неба. Такой рассеянный облаками свет ближе всего подходит к тому, что мы осознаем как белый дневной свет.

Внутри помещения, если туда не попадает непосредственно ни свет неба, ни прямой солнечный свет и если стены помещения не имеют яркой цветной окраски (белые стены), освещение более или менее близко по составу к свету на улице в пасмурный день.

Такое «пасмурное» освещение как будто бы и надлежало взять за стандарт для измерений цвета предметов, рассматриваемых днем. Однако «пасмурное» освещение тоже недостаточно постоянно и находится в зависимости от характера облаков, высоты солнца над горизонтом и т. д. Поэтому дневной свет всегда занимает по своему составу какое-то промежуточное место между прямым солнечным светом и рассеянным светом неба. Таким образом для стандарта белого света, заменяющего дневной свет,

необходимо, чтобы соответствующая кривая занимала во всех частях спектра более или менее промежуточное положение между указанными двумя крайностями.

Как видно из рис. 11, эти пределы оставляют довольно широкий простор для выбора, а потому при выборе стандартной кривой распределения энергии надо исходить в первую очередь из постоянства спектрального состава источника света и других соображений технического характера.

Стандартизированный условный белый свет, с одной стороны, позволит унифицировать все опыты по измерению цвета и сделать их сравнимыми, а с другой стороны, гарантирует, что полученный измерением какого бы то ни было предмета цвет всегда будет лежать в пределах тех изменений в цвете предмета, которые наблюдаются в естественных условиях дневного освещения в силу его непостоянства.

Очевидно, что во всех случаях, когда важно установить цвет предмета в условиях естественного дневного освещения, точность измерений ограничена пределами колебаний, вызванных изменчивостью состава естественного освещения, и большей точности и не требуется. Что эта точность не будет особенно грубой, гарантируется тем, что мы с помощью нашего глаза обыкновенно легко узнаем предметы по их цвету в различных условиях дневного освещения (напр. в пасмурные дни и при солнечной погоде).

В известных условиях (напр. в экспедициях) предпочтительнее иногда отказаться от большой точности измерений, чем вести их с помощью стандартного источника света. В этих случаях допустимо пользование естественным освещением с соблюдением, однако, следующих предосторожностей: 1) измерения никогда не должны вестись под прямыми солнечными лучами; 2) следует избегать сильных прямых рефлексов голубого неба (напр. вести наблюдения из палатки); 3) следить, чтобы вблизи измеряемых полей не находилось крупных однородно окрашенных предметов ярких по цвету. Полученные таким путем данные, конечно, будут иногда более или менее уклоняться от полученных в лабораторной обстановке, но в них всегда будут заключаться только те ошибки в определении цвета, которые в данной обстановке неизбежны и для глаза, т. е. по сравнению с оценкой цвета на глаз пользование прибором и в этом случае будет обладать преимуществом все же большей объективности.

Из двух поставленных для стандарта белого света целей требования для создания постоянного источника искусственного дневного света, полностью перекрывают собою требования для получения вообще какого-либо достаточно постоянного источника, а поэтому, если бы удалось создать удобный, легко осуществимый и постоянный по спектральному составу источник света, кривая которого лежала бы приблизительно по середине между солнечной кривой распределения энергии и кривой голу-

бого неба, то этот источник света мог бы служить для всех цветовых измерений вообще как просто постоянный источник.

Но естественный дневной свет всегда содержит такое количество синих и фиолетовых спектральных, которое довольно затруднительно получить в искусственном источнике. Как известно, относительное количество света коротких волн возрастает с повышением температуры светящего тела, причем оказывается, что для получения надлежащего количества синих лучей пришлось бы выходить далеко за пределы температур, которые выдерживают применяемые в осветительной технике материалы¹.

Сравнительно высокую (хотя все же еще недостаточную) температуру имеет пламя вольтовой дуги, но дуга слишком непостоянный и неудобный для практики источник. Поэтому приходится обратиться к лампам накаливания, для которых допустимая температура значительно ниже. Поскольку распределение энергии в спектре зависит, кроме температуры, также и от материала накаливаемого тела, то для известной унификации источников их свет при той или иной эффективной температуре пересчитывается на так называемую температуру абсолютно черного тела. Для абсолютно черного тела имеются теоретически построенные кривые распределения энергии в спектре, и пересчет ведется с целью найти ту температуру абсолютно черного тела, при которой цвет испускаемого им света совпадал бы по цвету со светом, фактически испускаемым данным телом при данной эффективной температуре. Получаемая пересчетом температура абсолютно черного тела носит в фотометрии название «цветовой температуры».

Оказывается, что цветовая температура дневного света лежит во всяком случае выше 5000° (см. рис. 12), в то время как источники света, приемлемые с точки зрения практики, в состоянии давать цветовую температуру только в $2000\text{—}2500^{\circ}$, т. е. содержат относительно избыточное количество света большой длины волн и недостаточное количество света малой длины волн. Дальнейшая подгонка кривой распределения энергии источника к дневной кривой возможна, таким образом, только с помощью светофильтров, поглощающих избыточное количество света большой длины волн.

Так как применением светофильтров приходится производить очень значительное изменение соотношений между различными спектральными, то получение белого света неминуемо сопряжено с большими потерями в светофильтре, что, при сильном источнике света, само по себе связано с неприятными явлениями в виде значительного нагревания светофильтра, не говоря уже о малой экономичности такого источника. Поэтому во многих из проектов стандартов белого света явно сквозит желание выбрать

¹ Это вполне понятно, если принять в расчет, что температура солнца очень высока.

свет с заведомым недостатком синих лучей не только против среднего дневного, но иногда даже и против прямого солнечного света.

Хотя на удобство стандартной конструкции и должно быть обращено серьезное внимание, но это отнюдь не означает, конечно, что в качестве стандарта белого дневного света можно принять свет заведомо желтый. Но, с другой стороны, как я уже заметил, для очень большого числа цветовых проблем нужен не

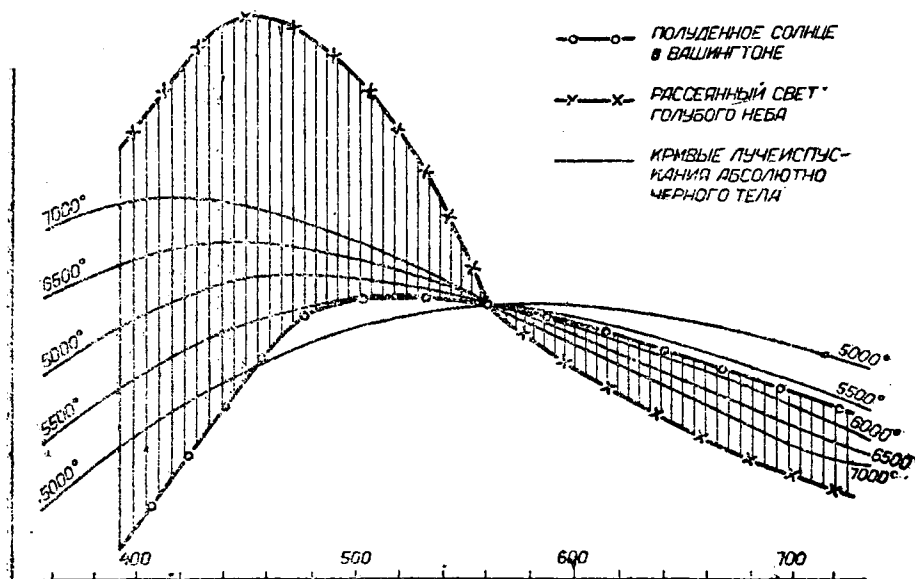


Рис. 12. Кривые распределения энергии: абсолютно черного тела, солнечного света и света голубого неба.

столько белый, сколько вообще надежный стандартный источник света, лишь более или менее приближающегося к белому.

Белый свет, лежащий обязательно в пределах вариации естественного освещения, требуется значительно реже, а потому, естественно, намечается выход в виде двух стандартов: один — удобный, постоянный, экономичный, но заведомо желтый или оранжевый источник света, а другой — менее удобный, но зато действительно белый, более или менее соответствующий по всей кривой распределения энергии в спектре реальному дневному свету. Именно в этой плоскости и намечается в настоящее время окончательное решение вопроса.

Предлагавшиеся, а в некоторых странах даже принятые стандарты белого освещения, обычно давались в виде теоретической кривой лучеиспускания абсолютно черного тела при той или иной температуре. В качестве такого стандарта предлагались температуры в 5000, 5500, 6000, 6500 и даже 7000°. На рис. 12 соответ-

ствующие кривые нанесены для сравнения с кривой прямого солнечного света и с кривой голубого неба. Для удобства сравнения за единицу всюду взято значение для 560 *mμ*. Мы видим, что для имитации дневного освещения цветовая температура должна быть во всяком случае не ниже 6000°, а еще лучше даже 6500—7000°. Наиболее распространенная среди светотехников норма в 5000° заведомо неудовлетворительна.

На недавно состоявшемся в Англии конгрессе светотехников остановились на двух стандартах: в 4800 и в 6500°. Таким образом конгресс несомненно встал на ту же точку зрения, которая развивалась выше, т. е. принял 4800° в качестве стандартного, но не строго белого света и 6500° — в качестве среднего дневного света.

Следует, однако, заметить, что эти стандарты установлены под большим влиянием светотехников, которых сравнительно мало интересовал цвет несветящихся предметов. Вследствие этого, хотя ими и фиксирована кривая распределения энергии источника света, но фактически их интересовал лишь получаемый цвет источника, который они, привыкнув к спектро-фотометрированию, часто определяют с помощью всей кривой лучеиспускания. Следствием такого подхода и явилось принятие в качестве стандартных кривых, непременно соответствующих той или иной температуре черного тела.

Если бы стандартный источник света действительно получился путем нагревания до той или иной температуры реального абсолютно черного тела, это имело бы смысл, но поскольку кривые все равно приходится подгонять с помощью светофильтров, то выбор кривых может производиться свободнее, исходя из данных дневного или какого-либо иного важного в практике освещения, совершенно не ограничиваясь случайными для данных целей теоретическими кривыми.

Поэтому мне кажется более целесообразною американская попытка взять в качестве стандарта дневного света среднюю годовичную кривую лучеиспускания полуденного солнца в Вашингтоне. Стандарт такого типа, исходящий из тех или иных средних данных реального распределения энергии в дневном свете, безусловно является единственно приемлемым выходом для тех случаев, когда соблюдение условий дневного освещения желательно. В самом деле, если даже исходить из кривых для черного тела, то приемлемой будет только кривая, лежащая в пределах колебаний реального дневного освещения, а это значит, что взята будет какая-то средняя дневная кривая, но средняя, вычисленная из совершенно посторонних дневному свету соображений. А если так, то и вопрос должен ставиться как вычисление некоторой средней кривой распределения энергии в дневном освещении. На самом же деле (как это видно на рис. 11) кривые получения черного тела при всех температурах имеют совсем не тот характер, какой имеет реальное распределение энергии в дневном

свете, и если при температуре около $6500-7000^{\circ}$ излучение абсолютно черного тела по цвету и подойдет более или менее близко к цвету реального дневного света, то по *распределению энергии* (форма кривой) этот свет все же будет резко не соответствовать реальному распределению энергии в спектре дневного света¹.

В отношении постоянного, хотя бы и не вполне белого источника света предложенная цветовая температура в 4800° тоже может вызывать известные сомнения. Раз свет все равно не белый, то эту цветовую температуру (точнее — относительное содержание коротких световых лучей) можно понизить, так как достижение такой высокой цветовой температуры технически все же еще достаточно затруднительно.

Кроме того и здесь могут быть выдвинуты те же возражения против целесообразности во что бы то ни стало имитировать кривые лучеиспускания черного тела.

В настоящее время при научных работах пользуются главным образом следующими стандартами: 1) цветовая температура в $4800^{\circ}-5000^{\circ}$ и 2) средняя кривая полуденного солнца в Вашингтоне (дана на рис. 12)². Наряду с этим измерения технического характера, особенно ведущиеся на вертушках Максвелла, часто производятся при естественном освещении в комнате, защищенной от прямых солнечных лучей, со стенами, окрашенными в ахроматические цвета (белый, серый или черный). Как показывает опыт, в этих условиях ошибки, вызываемые непостоянством естественного освещения, обычно не выходят за пределы технической точности.

Кроме стандарта белого света, следующим и едва ли не более важным объектом стандартизации в области цветоведения являются три основные кривые (кривые чувствительности или кривые сложения (см. стр. 19 и 34). В данном случае мы, собственно, имеем дело с двумя различными задачами: 1) необходимо стандартизовать три цвета, в отношении которых определяются компоненты всех остальных цветов, 2) установить для этих трех цветов три соответствующие им функции (кривые), представляющие собою не что иное, как компоненты цветов чистых спектральных лучей в отношении выбранных трех стандартных эталонов.

Окончательные стандартные кривые зависят от решения обеих задач, однако задача выбора основных цветов решается совершенно независимо от нахождения из опыта цветовых уравнений, из которых определяют и самые кривые. Решение второй задачи

¹ Интересно заметить, что получение кривых распределения, соответствующих высоким температурам черного тела, еще сложнее, чем получение средней дневной кривой.

² Когда настоящая книга была уже написана, были получены резолюции Международной светотехнической конференции, установившей стандартные источники света (см. приложения в конце книги).

в значительной своей части чисто экспериментальное и в этой части, казалось бы, не подлежит стандартизации, которая всегда является известным произвольным выбором. Однако данные, получаемые различными экспериментаторами, несколько различаются друг от друга в силу индивидуальных особенностей зрения, а также вследствие большего или меньшего совершенства в методике ведения эксперимента. Поэтому при стандартизации надлежит установить на основе произведенных экспериментов, какие кривые следует считать соответствующими «среднему» человеческому глазу. Тогда всякие отклонения от этих кривых, которые могут быть у отдельных конкретных наблюдателей, следует считать их индивидуальными отклонениями от «среднего» глаза (индивидуальными аномалиями). При этом лица со значительными аномалиями не должны, конечно, как говорилось уже, допускаться в качестве наблюдателей при экспериментах большой точности. Таким образом стандартизации подлежит, собственно, понятие «среднего глаза».

Выбор трех эталонных цветов, конечно, может быть произведен совершенно независимо от того, что именно условились считать «средним глазом». Правда, самые опыты, на основе которых выводится понятие о свойствах «среднего глаза», должны быть произведены с помощью каких-то конкретных цветовых эталонов, но результаты таких опытов всегда возможно пересчитать на любые ныне эталоны и в частности на те, которые будут приняты как стандартные (см. формулу 8 на стр. 21).

Рассматривая разные проекты стандартизации основных кривых, следует разделять в них элемент экспериментальный (т. е. стандарт «среднего» глаза), с одной стороны, и выбор основных трех цветов, с другой. Соответственно с этим часто приходится встречаться с предложениями, где за средний глаз принимаются те же самые экспериментальные данные, но три стандартные цвета взяты по-разному. С другой стороны, бывает и так, что стандартные три цвета берутся те же самые, но кривые «среднего глаза» вычисляются на основании иного опытного материала.

Обращаясь к разбору этих вопросов, укажем предварительно, на каком материале должно быть основано решение того и другого вопроса. Стандарт «среднего глаза» устанавливает, какие различные по спектральному составу потоки света должны казаться для «среднего глаза» одинаковыми по цвету. Таким образом эта часть работы должна базироваться исключительно на опытах по составлению цветовых уравнений. Индивидуальные колебания будут при этом выражаться в неточности совпадений коэффициентов цветовых уравнений для разных лиц. Из этих-то несовпадающих значений коэффициентов и надо выбирать средние.

Таким образом при нормировке «среднего глаза» допустимы только соображения, основанные исключительно на опытах

оптического сложения цветов. При выборе же трех стандартных цветов (цветовых эталонов), наоборот, опыты сложения цветов не могут иметь никакого значения, так как с точки зрения этих опытов всякие три цвета с совершенно одинаковым правом могут быть приняты за основные.

Делавшиеся до сих пор предложения относительно выбора стандартных цветов можно разбить на две основные группы. Одна группа принимает в качестве основных цветов те три цвета, которые глаз воспринимал бы в условиях, когда возбужден только один из трех нервных центров, так что здесь идет дело о решении путем опытов вопроса о том, каковы должны быть действительные так называемые «основные» ощущения, из которых складывается наше ощущение цвета. Для этой цели исследовалось, как было сказано, зрение цветнослепых (стр. 34).

Этими опытами установлено, что основной красный должен был бы казаться чрезвычайно насыщенным красным, несколько более пурпурового оттенка, чем крайний спектральный красный. Основной зеленый по цветовому тону должен был бы более или менее совпадать со спектральным длиной волны около 505—510 *mμ*, но тоже быть значительно более насыщенным. Наконец, основной синий должен был бы соответствовать примерно ультрамариново-синему (согласно мнению некоторых — фиолетово-синему), тоже чрезвычайно сильно насыщенному.

Наблюдения, аналогичные опытам над цветнослепыми, возможны и у людей с нормальным, но утомленным глазом, у которого чувствительность того или иного центра сильно понижена. Работы такого рода трудно производить с большой точностью, но они существенны в том отношении, что в пределах соответствующей точности дают результаты, совпадающие с опытами над цветнослепыми, а потому служат новым подтверждением правдоподобия гипотезы относительно причин цветной слепоты, являясь в то же время серьезным опровержением мнения о недопустимости выводов относительно нормального зрения, построенных на опытах над зрением, заведомо сильно уклоняющимся от нормы.

Кроме этих опытов, для нахождения основных ощущений привлекался материал самого разнообразного характера (до эстетических соображений включительно). Конечно, все эти соображения всегда содержат одновременно и некоторую более или менее произвольную гипотезу (например, что наиболее «красивыми» должны казаться цвета, соответствующие по цветовому тону одному из основных раздражений). Такого рода материал кажется мне малоубедительным, так как гипотеза всегда нуждается в проверке.

Опыты над цветнослепыми или с изменением чувствительности глаза, производимые в процессе нахождения основных ощущений, могут служить проверкой самой гипотезы, так как, например, цветнослепые путают между собою очень много различ-

ных цветов, причем каждая пара цветов, которые они не различают, дает возможность определить направление вектора, соответствующего неработающему центру. Таким образом иско-мое направление вектора может быть найдено при помощи весьма большого числа независимых друг от друга способов, причем тот факт, что все они дают хорошо совпадающие результаты, является проверкой самой гипотезы.

Точно так же опыты с последовательным контрастом (адаптацией) позволяют определить направление основных векторов многими независимыми друг от друга путями, чего обычно нельзя сказать про другие соображения, привлекаемые к нахождению основных ощущений. Поэтому, как мне кажется, нахождение основных ощущений следует производить, исходя из опытов над цветнослепыми и из наблюдений над явлением последовательного контраста. При этом для взаимного контроля надо всегда и непременно определять основные ощущения несколькими независимыми друг от друга путями.

Наряду с выбором в качестве стандартных цветов трех основных ощущений, неоднократно предлагалось, особенно в последнее время, брать какие-либо реально осуществимые цвета, выбор которых производится исключительно из соображений практического удобства.

Эта мысль безусловно является совершенно здравой. В самом деле, все цветовые измерения и большинство практических задач цветоведения сводятся в конце концов к оптическому сложению цветов. А с точки зрения этих опытов все цвета являются вполне равноправными. Но, с другой стороны, если за три стандартных цвета взяты реально осуществимые цвета, то этими цветами можно воспользоваться как эталонами в приборах, что даст возможность находить на этих приборах стандартные координаты цвета прямым отсчетом, тогда как на основные ощущения всегда необходимо производить пересчет.

С практической стороны это создает настолько крупное преимущество, что перед ним совершенно отступают на задний план такие чисто теоретические недостатки, как то, что координаты цвета в этом случае будут чисто условными, не имеющими физиологического значения, и что иногда (при реальных исходных цветах это неизбежно) одна или две координаты для некоторых цветов будут отрицательными.

На светотехнической конференции, происходившей в Англии, остановились на трех чистых спектральных цветах, легко выделяемых светофильтрами $700\text{ m}\mu$, $546,1\text{ m}\mu$, $435,8\text{ m}\mu$ из спектра ртутной дуги. По отношению к этим цветам даны кривые среднего глаза на рис. 13, а числовые данные приведены в таблице 1.

Что касается установления понятия «среднего глаза», то здесь был проведен целый ряд работ различными учеными. Наибольшим распространением пользовались кривые Кенига-Дитеричи,

Кенига-Айвса (кривые Кенига с поправками Айвса) и, наконец, в самое последнее время — данные Гилда.

Данные Кенига в настоящее время значительно устарели, а главное, они представляют собою кривые только для одного единственного экспериментатора, т. е. являются индивидуальными, а не средними кривыми. То же самое можно сказать и в от-

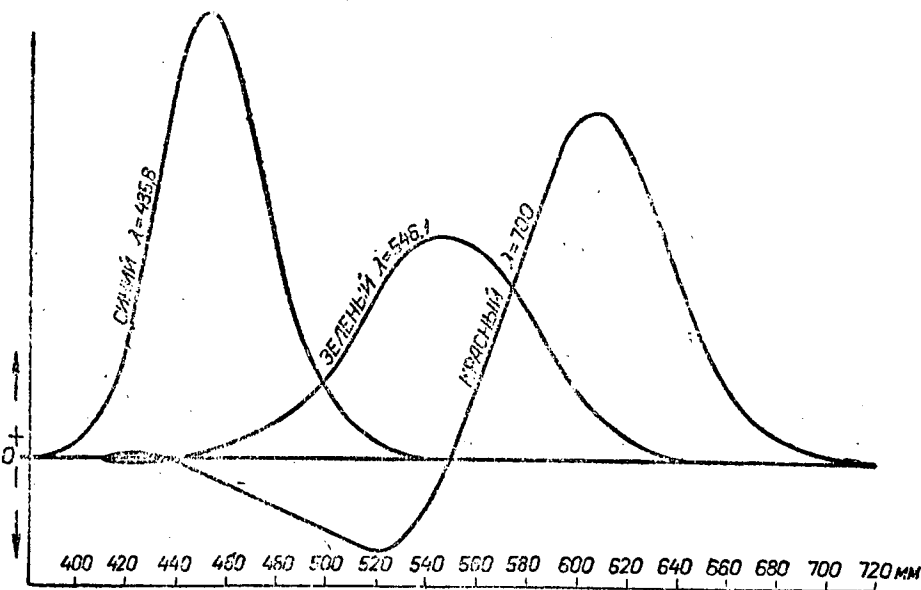


Рис. 13. «Кривые сложения» по Гилду. За единичные цвета взяты чистые спектральные 700 $m\mu$, 546,1 $m\mu$ и 435,8 $m\mu$.

ношении данных Кенига-Айвса, таблицу которых все же привожу (см. табл. 2), так как одно время ими пользовались чрезвычайно часто.

Данные, помещенные в табл. 1, представляют собою средние результаты проделанных Гилдом наблюдений над целым рядом лиц. Впредь до окончательного установления кривых данные Гилда являются наиболее надежными, и с этой стороны они получили признание и на международной светотехнической конференции. В настоящее время как у нас, так и за границей ведутся однако работы по окончательному установлению «средних кривых».

В дополнение следует сказать, что цель указанных кривых (или, что то же, — соответствующих таблиц) — установить связь между объективными физическими явлениями — светом и ощущением цвета. Поэтому, отыскивая компоненты для различных спектральных, естественнее всего брать эти спектральные в одинаковых количествах по энергии. Однако часто пользуются кри-

КРИВЫЕ СМЕШЕНИЯ ДЛЯ «СРЕДНЕГО ГЛАЗА» ПО ГИЛДУ¹

Длина волны в $m\mu$	Красный эталон $\lambda = 700 m\mu$	Зеленый эталон $\lambda = 546,1 m\mu$	Синий эталон $\lambda = 435,8 m\mu$	Длина волны в $m\mu$	Красный эталон	Зеленый эталон	Синий эталон	Длина волны в $m\mu$	Красный эталон	Зеленый эталон	Синий эталон
380	0,000	0,000	0,000	515	-9,292	+15,904	+2,401	650	+10,200	+0,114	0,000
85	+0,0026	-0,0014	+0,128	20	-9,214	18,258	1,625	55	7,949	0,067	0
90	0,0087	-0,0045	0,423	25	-8,492	19,972	1,122	60	5,934	0,038	0
95	0,0192	-0,0100	0,933	30	-7,203	21,268	0,698	65	4,292	0,022	0
400	0,0381	-0,0193	1,851	35	-5,381	22,008	0,376	70	3,147	0,012	0
05	0,0649	-0,0343	3,366	40	-3,148	22,446	0,169	75	2,297	0,007	0
10	0,092	-0,0497	5,136	45	-0,612	22,525	0,026	80	1,691	0,004	0
15	0,141	-0,077	8,611	50	+2,030	22,195	-0,061	85	1,196	0,002	0
20	0,190	-0,102	13,750	55	5,318	21,551	-0,144	90	0,818	0,001	0
25	0,257	-0,135	22,422	60	8,904	20,639	-0,180	95	0,534	0,000	0
30	0,215	-0,111	29,801	65	12,771	19,432	-0,179	700	0,410	0	0
35	0,039	-0,018	35,310	70	16,767	17,873	-0,169	05	0,295	0	0
40	-0,276	+0,154	39,599	75	20,708	15,999	-0,146	10	0,210	0	0
45	-0,762	0,378	43,101	80	25,748	14,108	-0,120	15	0,132	0	0
50	-1,362	0,696	43,889	85	23,507	12,294	-0,094	20	0,105	0	0
55	-2,024	1,097	42,479	90	31,344	10,109	-0,058	25	0,077	0	0
60	-2,656	1,543	39,223	95	33,258	8,195	-0,041	30	0,053	0	0
65	-3,182	2,046	33,511	600	34,374	6,543	-0,025	35	0,036	0	0
70	-3,03	2,610	28,002	05	34,574	5,013	-0,020	40	0,025	0	0
75	-4,335	3,312	22,810	10	33,881	3,742	-0,019	45	0,017	0	0
80	-4,916	4,089	18,101	15	32,224	2,747	-0,017	50	0,012	0	0
85	-5,411	4,963	13,907	20	29,552	1,952	-0,016	55	0,009	0	0
90	-5,869	5,960	10,527	25	26,256	1,320	-0,014	60	0,007	0	0
95	-6,406	7,229	7,743	30	22,714	0,862	-0,012	65	0,004	0	0
500	-7,240	8,942	5,923	35	19,309	0,542	-0,010	70	0,003	0	0
05	-8,083	11,045	4,531	40	16,024	0,337	-0,008	75	0,001	0	0
10	-8,876	13,411	3,359	45	13,006	0,201	-0,007	80	0,000	0,000	0,000

Формула светлоты:

$$H = A_{700} + 4,4 A_{546} + 0,05 A_{436}$$

Формулы пересчета на координаты x и y для определения степени различия:

$$x = 17A_{700} - 15A_{546} - 2A_{436}; y = 10 (A_{546} - A_{436})$$

¹ Данные настоящей таблицы взяты в том виде, как они приведены Гилдом, однако следует заметить, что цветовые измерения даже в лучшем случае не превосходят 0,2%, обычная максимальная точность 1%, а для темных цветов (концы спектра) и того меньше. Поэтому в числовых данных настоящей таблицы имеют значение во всяком случае только первые три знака. Прочие знаки совершенно случайны и их всегда можно округлять. Кривые даны для спектра с равномерным распределением энергии.

выми, где различные спектральные взяты не в равных по энергии количествах, а в тех количествах, какие имеют эти спектральные в спектре того или иного стандартного источника света.

С математической точки зрения кривые для такого источника света получаются перемножением ординат кривых для равной энергии на соответствующие ординаты кривых распределения в спектре данного источника.

Наконец, даже при всех этих условиях еще один вопрос остается открытым, а именно: относительный масштаб ординат для каждой из трех кривых. Собственно говоря, чувствительности различных нервных центров несравнимы между собою по величине, так как мы имеем здесь дело с качественно различными процессами. Поэтому для каждой из трех кривых масштаб ординат может быть выбран совершенно независимо от других. Обычно их выбирают таким образом, чтобы определенные интегралы, взятые от трех функций чувствительности по всей видимой части спектра, были бы равны между собой. Это, конечно, совершенно произвольное условие, но оно удобно в том отношении, что именно таким путем наиболее просто формулируется «равномасштабность» для кривых. Употребление различных, в этом смысле, масштабов привело бы к тому, что данные размеры чертежа были бы использованы нерационально.

Если кривые чувствительности вычислены для распределения энергии принятого в качестве стандарта белого света, то условие равенства интегралов имеет тот смысл, что равенство координат будет соответствовать ахроматическому цвету. Такой выбор масштабов для кривых имеет большое преимущество при вычислении цветного тона и насыщенности цвета, так как приведенная выше формула (см. стр. 27) рассчитана именно на то, что координаты белого цвета равны между собой.

Точно так же, естественно, что при составлении графика расположения спектральных цветов в треугольнике Ньютона (см. стр. 39), исходя из кривых чувствительности, в центре треугольника окажется цвет света с тем распределением энергии, для которого все три интеграла равны между собой, т. е. при соблюдении поставленного условия — цвет света с распределением энергии, для которого вычислены кривые.

По этим причинам кривые в большинстве вычисляют не для света с равным распределением энергии, а для того или иного распределения в спектре света, принимаемого за стандарт белого освещения. Поэтому, имея перед собой данные по чувствительности нервных цветов, необходимо обращать внимание, для какого распределения энергии они вычислены.

Приводимые данные должны содержать, таким образом, пометки, во-первых, о том, какие три цвета приняты в них за стандартные, во-вторых, для какого распределения энергии они вычислены, и, в-третьих, для какого цвета три координаты приняты равными.

ВЕЛИЧИНЫ ОСНОВНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ГЛАЗА

(по Кеңигу — Айвсу)

Для спектра абсолютно черного тела при температуре 5000°K.

Длина волны в μ	R	G	B
380	0,0000	—	0,0000
390	0,0029	—	0,0485
400	0,0073	—	0,127
410	0,0118	—	0,230
420	0,0144	—	0,365
430	0,0117	0,0000	0,588
440	0,0065	0,0039	0,763
450	0,0000	0,0147	0,803
460	0,0009	0,0319	0,756
470	0,0090	0,0598	0,630
480	0,0203	0,100	0,421
490	0,0575	0,154	0,217
500	0,117	0,231	0,117
510	0,192	0,334	0,0778
520	0,268	0,442	0,0521
530	0,335	0,518	0,0361
540	0,396	0,555	0,0282
550	0,440	0,564	0,0216
560	0,466	0,576	0,0168
570	0,472	0,496	0,0138
580	0,464	0,396	0,0105
590	0,440	0,288	0,0051
600	0,399	0,199	0,0024
610	0,349	0,133	0,0009
620	0,288	0,0921	0,0005
630	0,212	0,0551	0,0002
640	0,150	0,0334	0,0000
650	0,0934	0,0180	—
660	0,0561	0,0097	—
670	0,0330	0,0052	—
680	0,0140	0,0022	—
690	0,0090	0,0013	—
700	0,0048	0,0007	—

Во многих цветовых вопросах (особенно в светотехнике) большое значение имеет так называемая «кривая видимости», которая представляет собою результат гетерохромного фотометрирования чистых спектральных. С помощью кривой видимости определяется субъективное впечатление яркости (светлота) светового потока, когда на глаз действует свет того или иного состава. Субъективная яркость светового потока вычисляется с помощью интеграла, распространенного на весь видимый спектр от произведения функции распределения энергии на функцию видимости [см. стр. 27 формула (11)].

Кривая функции видимости, как было уже указано, кроме значительных индивидуальных колебаний, сильно зависит от адаптации глаза. Однако опыты показывают, что при постоянстве адаптации для одного и того же человека, если свет к тому же не является слишком темным или, наоборот, слепяще ярким, субъективная оценка яркости (светлоты) цвета является линейной однородной функцией координат цвета, т. е. выражается формулой, уже приводившейся выше:

$$H = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 \dots \dots \dots (9)$$

Поэтому мы можем считать, что индивидуальным вариациям и зависимости от адаптации подвержена не вся кривая видимости в целом, а лишь три величины коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ¹. Легко видеть, что, зная эти коэффициенты, можно без всякого труда вычислить кривую видимости из трех кривых чувствительности глаза.

$$H(\lambda) = \rho R(\lambda) + \gamma G(\lambda) + \beta B(\lambda) \dots \dots \dots (16)$$

Таким образом, стандартизуя среднюю кривую видимости, мы должны делать это не вне зависимости от стандартизации «средних кривых» чувствительности, но так, чтобы между теми и другими сохранялась линейная зависимость (15).

Это, действительно, так всегда и делается, но важно отметить, что с н а ч а л а непременно надо стандартизовать кривые чувствительности, а лишь з а т е м те три коэффициента, которые дают из них кривую видимости. Такой порядок необходим потому, что кривые чувствительности определяются на основании опытов сложения цветов, которые значительно точнее и надежнее опытов гетерохромной фотометрии, определяющих кривую видимости. Естественнo, что мы можем корректировать менее точные опытные данные с помощью более точных, но не наоборот. Между тем иногда приходится встречать, что кривые чувствительности подгоняются к кривой видимости, что является безусловно недопустимым.

Поскольку кривые чувствительности еще не стандартизованы окончательно и вероятно будут подвергаться в будущем поправ-

¹ Если за основные цвета взяты недостаточные цвета цветослепых, то эти коэффициенты обозначают буквами ρ, γ, β .

кам, кривая видимости тоже быть может подвергнется уточнению в деталях. Приняв временно данные Гилда, мы даем для них и значения величин $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (светлотные коэффициенты) в том виде, как они были указаны самим Гилдом. Следует заметить, что, собственно говоря, как это видно из формулы (9), существенными являются не самые величины коэффициентов, а только их отношения. Поэтому мы можем предъявить к ним дополнительное условие, которое бывает двоякого рода: 1) полагают один из коэффициентов равным единице или 2) полагают равной единице сумму коэффициентов. Значения будут при этом отличаться только множителем пропорциональности.

Наконец, предлагаемая на стр... формула оценки субъективных различий между цветами имеет указанную простую форму при вполне определенном выборе единичных цветов. Эти цвета отличаются от принятых обычно в качестве стандартных для измерений. Для возможности пересчета на эти координаты мы прибавили к таблице Гилда формулу, связывающую эти координаты x и y с координатами цвета относительно трех цветов, выбранных Гилдом за исходные (стандартные).

Перечисленным исчерпываются основные стандарты цветоведения, которые лежат в основе цветовых измерений. Пользуясь ими, мы тем самым вводим стандартную номенклатуру цветов, дающую возможность записывать с любой необходимой в том или другом случае точностью все оттенки, которые только способен различать глаз. Они устанавливают также однозначную связь между объективным явлением — светом — и субъективным понятием цвета, которое однако объективизируется введением понятия «среднего нормального глаза».

Последнее позволяет свести цветовые измерения к объективным измерениям света. В наиболее полной мере это осуществляется прибором с фотоэлементами, о котором упомянуто на стр. 56. Конечно, результаты таких объективных измерений будут иногда несколько расходиться с субъективным ощущением цвета у того или иного отдельного наблюдателя, поскольку его глаз отклоняется от условного «среднего глаза», но, как было сказано, при выполнении определенных условий наблюдения эти отклонения будут чрезвычайно незначительными для огромного большинства наблюдателей.

Незначительность субъективных отклонений от некоторой объективно определяемой величины и дает возможность ввести цветовые измерения наряду с другими оптическими методами исследования (которые тоже ведь нередко ведутся субъективно, например субъективная спектрофотометрия) как способ изучения объективных явлений и в частности, например, для исследования тех или иных свойств материала, определяющих его качество.

Кроме указанных основных стандартов, посредством которых мы можем выразить все цветовые особенности того или

иного объекта, практика с большой настойчивостью требует введения большого количества точно фиксированных цветов, которые с той или иной степенью точности охватывали бы цвета всех окрашенных предметов. В этом случае речь идет о создании стандартных цветовых шкал или даже сборника таких шкал — цветового атласа.

Цветовой атлас представляет собой таким образом сборник цветовых образцов, каждый из которых твердо фиксирован в отношении цвета. Такой атлас во многих случаях может заменять измерение цветов на приборе простым отысканием наиболее подходящего цвета среди образцов атласа. Хотя такой способ определения цвета, конечно, уступает по точности измерениям на приборе, но он во многих случаях представляется более удобным и быстрым, а потому проблема цветового атласа является одной из важнейших задач цветоведения.

ЦВЕТОВЫЕ ШКАЛЫ И АТЛАСЫ

Проблема цветового атласа является одной из наиболее трудных задач, стоящих перед современным цветоведением. Хороший цветовой атлас является прежде всего своего рода измерительным прибором, так как ссылка на тот или иной образец атласа представляет собой наилучший способ характеризовать цвет, какой только можно себе представить.

Хороших цветовых атласов пока выпущено немного, но все же, несмотря на ряд их несовершенств и весьма значительную стоимость, они получили уже довольно широкое распространение.

У нас в СССР более всего известен немецкий атлас Оствальда и несколько менее — американский Мензелла. Но особенно убедительно указывают на нужду в цветовом атласе бесчисленные цветовые шкалы окрашенных образцов, которые выпускают все красочные предприятия и которые часто можно встретить в самых разнообразных отраслях промышленности в качестве рабочего пособия.

Всякая такая шкала или даже простой ряд цветовых образцов представляют собой некоторый суррогат цветового атласа и служат для целей точного указания цвета. Хороший атлас должен быть в состоянии заменить все шкалы такого рода, причем нумерация образцов атласа должна быть связана с числами, получаемыми на измерительных приборах. Последнее необходимо хотя бы для того, чтобы иметь возможность всегда проверить степень сохранности образцов атласа, а в случае, если цвет их со временем изменился, иметь возможность внести соответствующие поправки в нумерацию образцов.

Для того чтобы атлас мог с достаточной надежностью выполнять указанные функции, к нему должны быть предъявлены довольно суровые требования.

Самым важным из них, но в то же время и наиболее трудно осуществимым является требование строгой точности цвета всех образцов во всех отдельных экземплярах атласа. Атласом можно пользоваться как надежным указателем цвета только в том случае, если в любых двух экземплярах атласа любые два образца одинакового номера весьма точно совпадают друг с другом по цвету. Различие между ними во всяком случае не должно превосходить различия между двумя соседними цветами одного и того же атласа. Таким образом, чем больше различных цветовых образцов содержится в атласе, тем точнее должны быть цвета каждого отдельного образца.

Из указанного наиболее важного требования неминуемо вытекает и другое, с практической точки зрения тоже весьма необходимое. Это прочность (в частности светопрочность) окраски образцов. Атлас, исполненный быстро выцветающими красками, конечно очень скоро потеряет свою ценность и в лучшем случае будет нуждаться в периодической проверке, во время которой должны быть отмечены происшедшие изменения в цвете образцов. Такая проверка, конечно, предполагает, что способ обозначения (нумерация) цветов в атласе связан с измерениями цвета.

Ценность атласа будет тем выше, чем он подробнее, причем подробность означает не только и не столько возможно большее количество различных образцов, сколько возможно более полный охват всех цветных оттенков, т. е. наряду с числом образцов требуется возможно более равномерное их распределение между всеми оттенками цвета. В идеале это означает, что во всем атласе всякие два соседние цвета должны отличаться друг от друга в одинаковой степени. Последнее, как мы видим, тесно связывает проблему цветового атласа с вопросом о порогах чувствительности глаза к цветовым различиям, рассмотренным выше.

Наконец, для удобства ориентировки в пределах атласа образцы должны быть расположены по определенной системе.

Наибольшую трудность представляет многократное точное воспроизведение значительного числа цветовых образцов, из которых каждый является своего рода стандартом. Трудности здесь заключаются как раз в том, что делает цветовые измерения такими ценными в качестве косвенного метода испытания, а именно — в большой чувствительности цвета ко всякого рода даже очень малым объективным изменениям, в частности сильная изменчивость цвета от малейших примесей к красителю, от способа окраски, толщины слоя краски, вида связующего вещества и т. д.

В силу этого, для обеспечения постоянства цвета образцов далеко не достаточно, например, стандартизовать состав краски, так как для многих красок даже очень небольшие примеси могут заметно изменить цвет.

Далее, большие заботы доставляет зависимость цвета от толщины слоя краски. Проверять толщину слоя измерением едва ли возможно с надлежащей точностью и во всяком случае сложнее, чем проверить самый цвет, хотя бы трехцветным измерением. Проверять же измерением каждый образец каждого атласа при сколько-нибудь значительном тираже, конечно, дело трудно осуществимое.

Практически из этих затруднений выходят путем применения наиболее чистых химически и не чувствительных к примесям красок, которые в строго определенных пропорциях смешиваются между собой в больших количествах. Ими окрашиваются большие листы (окраска производится обычно от руки), причем наблюдается, чтобы весь лист был покрашен совершенно равномерно.

Окрашенный лист разрезается затем на небольшие кусочки, которые и вклеиваются на страницы атласа.

Однако, окрашивая большие пространства вручную, полной равномерности окраски можно добиться только при сильно кроющих (мало прозрачных) красках. Такие краски, если слой их толст, практически почти не изменяют своего цвета при дальнейшем увеличении толщины, а потому, если краска достаточно единообразна, стандартность цветовых образцов обеспечивается довольно хорошо.

Но все кроющие краски всегда очень белесоваты, так как кроющая сила красок находится в неразрывной связи с белесоватостью. Кроющие краски никогда не дают сильно насыщенных цветов, особенно если они темные. На практике для получения достаточно сильно кроющих красок к ним даже умышленно прибавляют более или менее значительное количество белил.

Правда, поверхность, окрашенная такими кроющими красками, всегда бывает матовая, а потому ее цвет сравнительно мало зависит от угла зрения, под которым смотрят на поверхность, и от угла, под которым она освещена, что облегчает сравнение цвета исследуемого предмета с цветом образца. Но все же отсутствие в атласе большого количества насыщенных цветов, которые высоко ценятся в художественной промышленности и нередко встречаются в природной окраске растений, животных, минералов и т. д., является крупным недостатком. Поэтому в цветовой атлас, который предполагается выпустить в СССР, решено включить также образцы, сделанные более прозрачными красителями и обладающие блестящей поверхностью.

Вопроса устойчивости цвета образцов (в первую очередь их светопрочности) я здесь разбирать не буду, так как он должен решаться в отдельности почти для каждого цвета и во всяком случае для каждой краски. Этот вопрос является особенно важным, так как именно наиболее яркие краски (например, анилиновые) обычно довольно мало устойчивы. Приходится не-

редко отдавать поэтому предпочтение минеральным краскам, что снова затрудняет получение сильно насыщенных цветов. Во всяком случае атлас может гарантировать большую или меньшую сохранность цветов только при бережном обращении.

Система расположения цветов в атласе в основном диктуется, конечно, степенью сходства цветов между собой: так как многообразие цветов трехмерно, то все цвета нельзя разместить

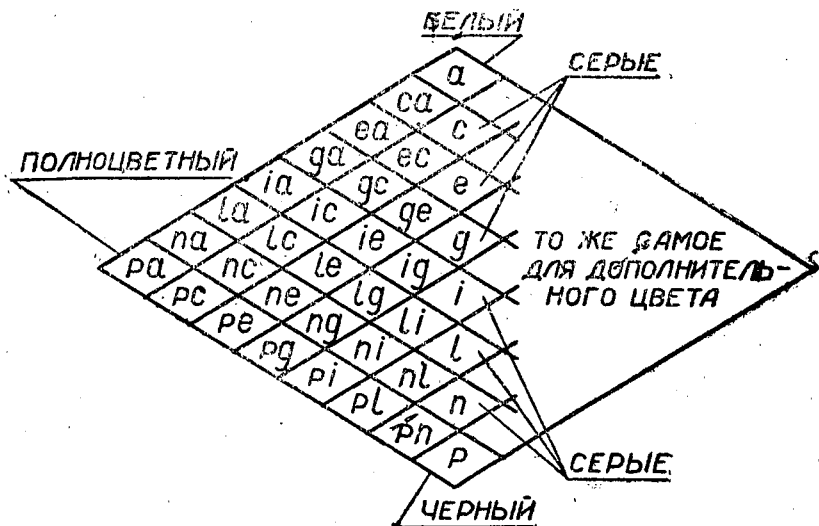


Рис. 14. Вид таблицы из атласа Оствальда (однотонный треугольник).

на одной таблице, и требуется ряд таблиц, расположенных в известной последовательности друг за другом.

В основу системы расположения кладутся чаще всего три основных качества цвета: светлота, цветовой тон и насыщенность, но иногда бывают и отступления, которые я рассмотрю подробнее на примере атласов Оствальда и Мензелла, наиболее распространенных и наилучших по выполнению.

В атласе Оствальда таблицы разделяются более или менее точно по цветовым тонам, причем два дополнительных тона со всеми их оттенками соединены в одну таблицу по обе стороны от ряда ахроматических цветов (см. рис. 14). Расположение по цветовым тонам, однако, выполнено у Оствальда не вполне точно, так как он исходил из ряда ошибочных положений своей теории, которая не обеспечивает надежного измерения цвета.

Все оттенки цветов одного и того же цветового тона одной и той же таблицы образуют треугольник (однотонный треугольник по терминологии Оствальда), в одной вершине которого расположен белый, в другой черный, а в третьей наиболее «полноцветный» (по терминологии Оствальда) цвет данного цветового тона. Практически «полноцветный» означает наи-

более «яркий цветной» (яркий не в научном понимании слова яркость — светлота, а в том смысле, как говорят обычно про цвета окрашенных предметов, например, «яркое платье», подразумевая под этим цвет довольно сильно насыщенный и в то же время не слишком темный)¹.

Между белой и черной вершинами треугольника расположены ахроматические (серые) цвета. Между полноцветным и белым находятся цвета, получаемые смешением в различных пропорциях белой и цветной краски. Между черным и цветным — смесь цветной и черной красок. Середина треугольника состоит из цветов, смешиваемых из всех трех красок, образующих непрерывный переход от более насыщенных цветов к цветам ахроматическим (серым).

Два таких треугольника дополнительных цветовых тонов смыкаются по ахроматической оси, образуя вместе ромб, как показано на рис. 14. На том же рисунке показана оствальдовская система буквенных обозначений отдельных цветовых образцов в треугольнике.

Различных цветовых тонов в атласе 24, что дает 12 таблиц указанного вида. Цветовые тона обозначаются номерами от 1 (лимонно-желтый) до 24, или по особой шкале, которая охватывает 100 цветовых тонов. На рис. 15 показано, каким приблизительно цветам соответствуют номера оствальдовской шкалы.

Будучи прекрасным по техническому выполнению, атлас Оствальда страдает рядом крупных недостатков, обусловленных ошибками оствальдовской теории.

Наиболее важным недостатком является чрезвычайная неравномерность атласа. Всевозможные зеленые, начиная от синезеленых и кончая желто-зелеными, составляют без малого половину всего атласа, в то время, как оранжевые и красные оттенки недостаточно многочисленны. Это усугубляется тем, что темных цветов дано больше, чем нужно, а светлых — значительно меньшее количество. Затем в атласе совершенно не принято во внимание, что, например, полноцветный синий несомненно значительно ближе к черному, чем к белому, а полноцветный желтый — наоборот. В атласе все треугольники равносторонние, и количество промежуточных между полноцветными и черным или полноцветными и белым для всех цветовых тонов одинаково.

В силу такой неравномерности часть цветовых образцов почти не отличима друг от друга, в то время как в других случаях ближайшие друг другу цвета различаются очень сильно. Это не дает возможности ввести даже грубую систему допусков по цвету, единую для всего атласа.

¹ В художественной промышленности полноцветные цвета называют еще цветами «полной силы».

Не менее, если не более крупным недостатком является полное отсутствие какого-либо реального смысла в обозначениях эталонов. Правда, Оствальд полагал, что ими он характеризует особые свойства цвета, которые он называл «содержанием черного» и «содержанием белого».

Но при составлении атласа он исходил из смешения между собой красок, а цветовой результат такого смешения зависит в очень сильной степени не только от цвета красок, но и

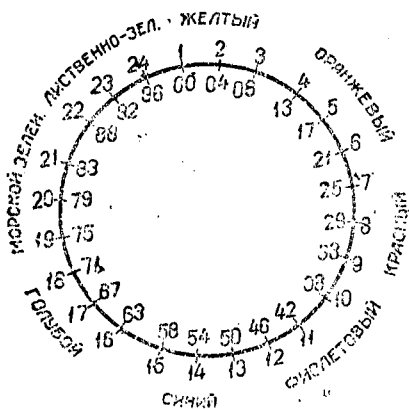


Рис. 15. Числовые обозначения цветовых тонов по Оствальду.

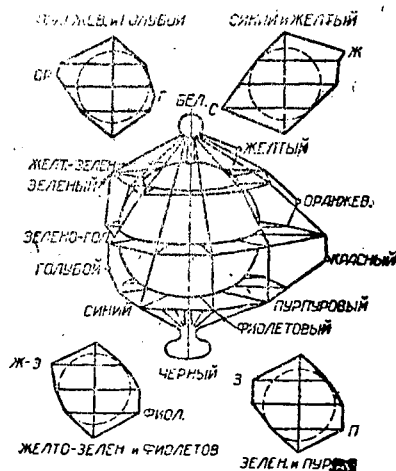


Рис. 16. Цветовое тело, соответствующее атласу Мензелла, и его меридиональные сечения.

от всей кривой отражения и других самых разнообразных свойств применяемых красителей¹, которые Оствальдом не учитывались. Дефектность метода измерения цвета, которым пользовался Оствальд, не позволила ему связать цвета его атласа с какими-либо вполне надежными стандартными цветами (например с цветом чистых спектральных), а потому его атлас остается только набором хорошо выполненных цветных образцов.

По этой же причине атлас Оствальда не представляет надежной гарантии в том, что в отдельных экземплярах образцы цвета с одинаковыми обозначениями действительно одинаковы по цвету, особенно в отношении атласов, изготовленных в разное время. Мне самому пришлось, сравнивая два различных экземпляра атласа Оствальда, обнаружить очень значительные расхождения между ними.

Во многих отношениях более совершенным является американский атлас Мензелла. Расположение цветов в нем организовано по следующему принципу. В основной серии таблиц цветные образцы, как и у Оствальда, объединены по цветовому

¹ Подробнее о цвете смеси красок см. Н. Нюберг, «Курс цветоведения».

тону (точнее — два дополнительных на одной общей таблице). В середине каждой таблицы вертикально расположены ахроматические образцы, начиная от белого (наверху) и кончая черным (внизу).

По обе стороны от этого ахроматического ряда расположены цветные образцы, тем более насыщенные по цвету, чем они дальше от ахроматического ряда, причем по одну сторону расположены оттенки различной светлоты и насыщенности одного цветового тона, а по другую — другого, дополнительного первому.

Существенным отличием от атласа Оствальда является соблюдение равенства по светлоте всех образцов, находящихся в одном горизонтальном ряду. В пределах одного горизонтального ряда мы имеем, следовательно, образцы, отличающиеся друг от друга лишь по насыщенности.

Возрастание насыщенности от образца к образцу одного и того же горизонтального ряда соблюдено возможно более равномерно, а длина ряда (т. е. количество образцов в ряду) определяется тем наиболее насыщенным цветом данного цветового тона и данной светлоты, который только оказалось возможным получить с помощью применявшихся красителей.

Следствием этого совершенно естественно получаются ряды различной длины, и половина таблицы, хотя и образует нечто вроде треугольника (а для двух цветовых тонов не совсем правильный параллелограм), однако треугольники получаются не равносторонними, как у Оствальда, так как для одних цветовых тонов (например для желтого) самый длинный ряд будет довольно светлым, т. е. одним из верхних рядов таблицы, для других (красный и зеленый) длиннее будут средние ряды, наконец, для третьих (синий и фиолетовый) наибольшее число ступеней по насыщенности получается в одном из нижних темных рядов таблицы.

Расположение цветов атласа Мензелла нагляднее всего иллюстрирует цветовое тело, соответствующее его атласу. Это цветовое тело можно представить себе так. Предположим, что все цвета атласа мы располагаем в пространстве вокруг вертикального ряда ахроматических цветов, так что цвета различных цветовых тонов располагаются звездообразно во все стороны вокруг ахроматического ряда. Иначе говоря, мы рассматриваем каждую таблицу атласа как сечение цветового тела плоскостью, проходящей через ряд ахроматических цветов. На рис. 16 дано изображение такого тела, соответствующее атласу Мензелла, а внизу ряд его сечений, соответствующих различным цветовым тонам.

Оствальдовскому атласу можно привести в параллель тоже соответственное цветовое тело, но оно будет иметь вид совершенно правильной фигуры, состоящей из двух конусов (тело вращения равностороннего треугольника вокруг его основания),

в то время как мензелловское тело обладает неправильной формой, более точно отражающей цветовые возможности, представляемые красками.

Вследствие более правильной системы расположения, в атласе Мензелла все цветовые оттенки представлены гораздо равномернее, чем у Оствальда, так что требование, чтобы цвет уклонялся от данного не более, чем ближайший соседний в атласе Мензелла, представляет собой довольно единообразный (хотя все же грубый) допуск для всех цветов. Избыточное количество зеленых по сравнению с красными, а также темных по сравнению со светлыми наблюдается и в атласе Мензелла, но в меньшей степени, чем у Оствальда.

В атласе Мензелла, кроме таблиц, где цвета расположены по цветовым тонам, имеются таблицы (горизонтальные сечения тела), где собраны цвета всех цветовых тонов, равные по светлоте. В этих таблицах ряды цветов одинакового цветового тона данной светлоты располагаются по радиусам от равносветлого им серого, находящегося в центре.

Наконец, в последнем, более полном издании мензелловского атласа имеются таблицы, где собраны цвета, равноудаленные от ахроматических, считая по ряду их расположения в атласе. Эти цвета Мензелл называет равнонасыщенными, что является интересной попыткой практически поставить вопрос о сравнении по насыщенности цветов различных цветовых тонов.

В кратком издании атласа Мензелла имеются таблицы для 16 различных световых тонов (8 дополнит. пар), а общее число цветов доходит до 379 против 680 образцов атласа Оствальда, что для практических целей едва ли можно считать достаточным. Однако в более полном издании атласа Мензелла число образцов несколько увеличено.

Полный атлас Мензелла надлежит считать лучшим цветовым атласом, существующим в настоящее время.

Выполнен атлас Мензелла ручной нарисовкой, все его образцы обладают матовой поверхностью и довольно белесоваты, т. е. в нем отсутствуют сильно насыщенные цвета, которые можно встретить на предметах, обладающих блестящей поверхностью, и которые можно осуществить лишь прозрачными красками или последующей лакировкой. По сравнению с атласом Оствальда, у Мензелла цвета кажутся, пожалуй, еще менее насыщенными, что объясняется, повидимому, худшими красками.

О точности совпадения образцов в различных изданиях атласа Мензелла у меня не имеется определенных сведений, так как такого сравнения производить не приходилось. Выпускающая атлас фирма утверждает, что цвет образцов проверяется измерением на вертушке, что должно было бы обеспечить хороший контроль.

Обозначения в атласе Мензелла исходят из порядка расположения цветов в атласе, т. е. с помощью чисел, обозначающих

цветовой тон, светлоту и насыщенность цвета. Однако эти числа не согласованы с получаемыми из формул (10) и (11) или других аналогичных и являются, собственно говоря, порядковыми номерами, характеризующими положение образцов в таблицах атласа.

К сожалению Мензелл не указывает связи между своей системой обозначения цветов и принятой при трехцветном измерении, хотя это и нетрудно было бы сделать, поскольку проверка цвета образцов производится с помощью вертушки Максвелла. Отсутствие указаний на такую связь вредит и самому атласу, препятствуя его проверке через неизменные стандарты цвета, которыми являются спектральные той или иной определенной длины волны.

Кроме разобранных двух цветовых атласов в разное время выпускалось много других, но они далеко уступают разобранным как в отношении качества выполнения и полноты, так и в отношении удобства практического пользования. Это чаще всего более или менее хаотические наборы цветных образцов, иногда снабженные краткими указаниями на то, с помощью каких красителей эти образцы получены. Эти атласы обычно не дают никакой гарантии, что одинаковые образцы в различных экземплярах атласа действительно одинаковы по цвету.

В настоящее время в СССР ведется работа по составлению цветового атласа на 36 цветовых тонов и около 1 000 отдельных цветовых образцов, с соблюдением тех принципов, которые изложены в начале настоящей главы. Эта работа ведется под постоянным контролем цвета с помощью измерительных приборов, и при издании каждый образец будет снабжен градуировкой в стандартных трехцветных координатах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Резолюции по колориметрии, принятые Международной светотехнической комиссией (С. I. Е.).

РЕЗОЛЮЦИЯ I

Для получения стандартной основы при определении колориметрических величин для коммерческих и технических целей предлагается все эти величины выражать по отношению к некоторому гипотетическому «стандартному наблюдателю» 1931 г. С. I. Е., который характеризуется стандартной кривой видимости С. I. Е.¹ и находит равенство по цвету между монохроматическими потоками света, длины волн которых даны в 1-й графе табл. I и смесью монохроматических же потоков с длинами волны 700, 546,1 и 435,8 μ , взятых в пропорциях, указанных во 2-й, 3-й и 4-й графах той же таблицы. Единицы количеств для потоков длиной волны 700, 546,1 и 435,8 μ выбраны так, чтобы их сумма в равных количествах давала цветовое равенство с потоком света с равномерным распределением энергии (поток, для которого полная энергия излучения для всех длин волн между любыми двумя заданными наперед равна некоторой постоянной, умноженной на разность пограничных длин волн).

РЕЗОЛЮЦИЯ II

В качестве стандартных источников для цели общей колориметрии материалов предлагаются следующие три:

Источник А. Газонаполненная лампа с цветовой температурой 2848° К (градусы Кельвина).

Источник В. Та же лампа в комбинации со светофильтром, состоящим из двух растворов В₁ и В₂; с толщиной слоя каждого раствора в 1 см, находящихся в двойном сосуде из бесцветного оптического стекла.

¹ Прим. автора. Как видно из дальнейшего, фактически комиссией стандартизована не кривая видимости как таковая, а лишь яркостные коэффициенты для света длин волн 700, 546,1 и 435,8 μ , которые позволяют вычислить кривую видимости с помощью ординат кривых смещения стандартного наблюдателя, приведенных в таблице I.

Растворы имеют следующий состав:

Раствор В₁.

Медный купорос ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) . . .	2 452 г
Маннит [$\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$]	2 452 г
Пиридин ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$)	30 см ³
Дистиллированная вода до объема . .	1 000 см ³

Раствор В₂.

Сульфат кобальт-аммония [$\text{CoSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] . . .	21,71 г
Медный купорос [$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$]	16,11 г
Серная кислота (уд. вес 1,835)	10,0 см ³
Дистиллированная вода до объема	1 000 см ³

Источник С. Та же лампа в комбинации со светофильтром из двух растворов С₁, С₂ с толщиной слоя каждого в 1 см и находящихся в двойном сосуде бесцветного оптического стекла.

Раствор С₁.

Медный купорос ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) . . .	3,412 г
Маннит [$\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$]	3,412 г
Пиридин ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$)	30 см ³

Дистиллированная вода до объема 1000 см³.

Раствор С₂.

Сульфат кобальт-аммония [$\text{CoSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] . . .	30,580 г
Медный купорос ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	22,520 г
Серная кислота (уд. вес 1,835)	10 см ³

Дистиллированная вода до объема 1000 см³.

Для источника А во всех колориметрических расчетах в качестве кривой спектрального распределения энергии может быть принята кривая распределения абсолютно черного тела при температуре 2848° К, принимая постоянную Планка С равной 14 350.

Для источников В и С принимается распределение энергии, вычисленное на основании измерений пропускания светофильтров, проведенных Дэвисом и Джипсоном в Бюро стандартов.

РЕЗОЛЮЦИЯ III

При колориметрических измерениях отражающих поверхностей, кроме тех случаев, когда особые обстоятельства требуют поступать иначе, свет должен падать под углом 45°, а наблюдения производятся под прямым углом к измеряемой поверхности. Если особые свойства измеряемого объекта или условия наблюдения вынуждают отступить от этих требований, при опубликовании результатов необходимо указывать, как производились наблюдения.

При колориметрических измерениях непрозрачных объектов яркость должна быть выражена по отношению к яркости по поверхности окиси магния в тех же самых условиях освещения.

СТАНДАРТНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ С. I. Е. 1931 г.

λ в м μ	Ординаты кривых смещения			λ в м μ	Ординаты кривых смещения		
	$\overline{r}$	$\overline{g}$	$\overline{b}$		$\overline{r}$	$\overline{g}$	$\overline{b}$
380	0.00003	-0.00001	0.00117	490	-0.05814	0.05689	0.08257
385	0.00005	-0.00002	0.00189	495	-0.06414	0.06948	0.06246
390	0.00010	-0.00004	0.00359	500	-0.07173	0.08536	0.04776
395	0.00017	-0.00007	0.00647	505	-0.08120	0.10593	0.03688
400	0.00030	-0.00014	0.01214	510	-0.08901	0.12860	0.02698
405	0.00047	-0.00022	0.01969	515	-0.09356	0.15262	0.01812
410	0.00084	-0.00041	0.03707	520	-0.09264	0.17468	0.01721
415	0.00139	-0.00070	0.06637	525	-0.08473	0.19113	0.00830
420	0.00211	-0.00110	0.11541	530	-0.07101	0.20317	0.00549
425	0.00266	-0.00143	0.18575	535	-0.05316	0.21083	0.00320
430	0.00218	-0.00119	0.24769	540	-0.03152	0.21466	0.00146
435	0.00036	-0.00021	0.29012	545	-0.00613	0.21497	0.00023
440	-0.00261	+0.00149	0.31228	550	+0.02279	0.21178	-0.00058
445	-0.00673	0.00379	0.31860	555	0.05514	0.20588	-0.00105
450	-0.01213	0.00678	0.31670	560	0.09060	0.19702	-0.00130
455	-0.01874	0.01046	0.31166	565	0.12840	0.18522	-0.00138
460	-0.02608	0.01485	0.29821	570	0.16768	0.17087	-0.00135
465	-0.03324	0.01977	0.27295	575	0.20715	0.15429	-0.00123
470	-0.03933	0.02538	0.22991	580	0.24526	0.13610	-0.00108
475	-0.04471	0.03183	0.18592	585	0.27989	0.11686	0.00093
480	-0.04939	0.03914	0.14494	590	0.31928	0.09754	-0.00079
485	-0.05364	0.04713	0.10968	595	0.33184	0.07909	0.00063

λ в мμ	Ординаты кривых смещения			λ в мμ	Ординаты кривых смещения		
	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$		$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$
600	0.34429	0.06246	-0.00049	695	0.00572	0.00000	0.00000
605	0.34756	0.04776	-0.00038	700	0.00410	0.00000	0.00000
610	0.33971	0.03557	-0.00030	705	0.00291	0.00000	0.00000
615	0.32265	0.02583	-0.00022	710	0.00210	0.00000	0.00000
620	0.29708	0.01828	-0.00015	715	0.00148	0.00000	0.00000
625	0.26348	0.01253	-0.00011	720	0.00105	0.00000	0.00000
630	0.22677	0.00833	-0.00008	725	0.00074	0.00000	0.00000
635	0.19233	0.00537	-0.00005	730	0.00052	0.00000	0.00000
640	0.15968	0.00334	-0.00003	735	0.00036	0.00000	0.00000
645	0.12905	0.00199	-0.00002	740	0.00025	0.00000	0.00000
650	0.10167	0.00116	-0.00001	745	0.00017	0.00000	0.00000
655	0.07857	0.00066	-0.00001	750	0.00012	0.00000	0.00000
660	0.05932	0.00037	0.00000	755	0.00008	0.00000	0.00000
665	0.04366	0.00021	0.00000	760	0.00006	0.00000	0.00000
670	0.03149	0.00011	0.00000	765	0.00004	0.00000	0.00000
675	0.02294	0.00006	0.00000	770	0.00003	0.00000	0.00000
680	0.01687	0.00003	0.00000	775	0.00001	0.00000	0.00000
685	0.01187	0.00001	0.00000	780	0.00000	0.00000	0.00000 *
690	0.00819	0.00000	0.00000				

Яростные (светлотные) коэффициенты $H_r = 1$; $H_g = 4,5907$; $H_b = 0,0601$

* Настоящая таблица приводится мною, как она была принята Международной светотехнической комиссией, однако не могу не заметить, что приводимое в ней количество знаков не оправдывается точностью колориметрических измерений, поэтому для расчетов могут иметь значение не более чем первые три знака. Примечание автора — Н. Н.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ СТАНДАРТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА А, В и С

(Резолюция Международной светотехнической комиссии)

λ в нм	A	B	C	λ в нм	A	B	C	λ в нм	A	B	C
380	9.79	22.40	33.00	515	69.25	89.65	98.81	650	165.03	103.90	88.20
385	10.90	26.85	39.92	520	72.50	89.50	96.90	655	168.51	104.59	88.20
390	12.09	31.30	47.40	525	75.79	90.43	96.78	660	171.96	105.00	87.90
395	13.36	36.18	55.17	530	79.13	92.20	98.00	665	175.38	105.08	87.22
400	14.71	41.30	63.30	535	82.52	94.46	99.94	670	178.77	104.90	86.30
405	16.15	46.62	71.81	540	85.95	96.90	102.10	675	182.12	104.55	85.30
410	17.68	52.10	80.60	545	89.41	99.16	103.95	680	185.43	103.90	84.00
415	19.29	57.70	89.53	550	92.91	101.00	105.20	685	188.70	102.84	82.21
420	21.00	63.20	98.10	555	96.44	102.20	105.67	690	191.93	101.60	80.20
425	22.79	68.37	105.80	560	100.00	102.80	105.30	695	195.12	100.38	78.24
430	24.67	73.10	112.40	565	103.58	102.92	104.11	700	198.26	99.10	76.30
435	26.64	77.31	117.75	570	107.18	102.60	102.30	705	201.36	97.70	74.36
440	28.70	80.80	121.50	575	110.80	101.90	100.15	710	204.41	96.20	72.40
445	30.83	85.44	123.45	580	114.44	101.00	97.80	715	207.41	94.60	70.30
450	33.09	85.40	124.00	585	118.08	100.07	95.43	720	210.36	92.90	68.30
455	35.41	86.88	123.60	590	121.73	99.20	93.20	725	213.26	91.10	66.30
460	37.82	88.30	123.10	595	125.39	98.44	91.22	730	216.12	89.40	64.40
465	40.30	90.08	123.30	600	129.04	98.00	89.70	735	218.92	88.00	62.80
470	42.87	92.00	123.80	605	132.70	98.08	88.83	740	221.66	86.90	61.50
475	45.52	93.75	124.09	610	136.34	98.50	88.40	745	224.36	85.90	60.20
480	48.25	95.20	123.90	615	139.99	99.06	88.19	750	227.00	85.20	59.20
485	51.04	96.23	122.92	620	143.62	99.70	88.10	755	229.58	84.80	58.50
490	53.91	96.50	120.70	625	147.23	100.36	88.06	760	232.11	84.70	58.10
495	56.85	95.71	116.90	630	150.83	101.00	88.00	765	234.59	84.90	58.00
500	59.86	94.20	112.10	635	154.42	101.56	87.86	770	237.01	85.40	58.20
505	62.93	92.37	106.98	640	157.98	102.20	87.80	775	239.37	86.10	58.50
510	66.06	90.70	102.30	645	161.51	103.05	87.99	780	241.67	87.00	59.10

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Проекты стандартов, предложенные Всес. инст. мер и стандартов и одобренные на конференции по цветоведению белой поверхности. Стандарт 1932 г.

Определение

1. Поверхностью белого цвета является такая, которая одинаково отражает световую энергию всех длин волн видимого спектра, при этом коэффициент отражения ее более 0,65.

2. Коэффициентом яркости поверхности называется отношение ее яркости к яркости идеально матовой поверхности, имеющей коэффициент отражения равным единице.

Технические условия

3. Поверхностью белого цвета для цветовых измерений является плоская матовая поверхность порошкообразной химически чистой окиси магния.

Примечание. Допускается также применение для тех же целей плоской матовой поверхности порошкообразного химически чистого серноокислого бария.

4. Коэффициент яркости окиси магния при освещении ее пучком света, падающим под углом 45° (43°) к поверхности, и при наблюдении в перпендикулярном к ней направлении принимается равным единице.

Примечание. Коэффициент яркости поверхности серноокислого бария принимается равным 0,96.

5. Точное значение коэффициента яркости данной пластинки белого цвета и пригодность ее для цветовых измерений в случае особенной в том надобности определяется ВИМСом и его филиалами.

Рекомендуемые технические указания к изготовлению пластинки белого цвета

1. Пластика из окиси магния. Химически чистый порошок окиси магния, полученный, например, путем сжигания магния в воздухе, подвергается сильному сжатию. При этом лицевая сто-

рона сдавливается полированной металлической (или стеклянной) поверхностью. Толщина слоя — не менее 3 мм. Если желают придать пластинке прочность, то ее сжимают в металлической рамке. Для прочности следует также поместить внутрь порошка перед его сжатием проволочную сетку. Последняя делается из мягкой меди диаметром около 0,3 мм; отверстия в сетке — около 7×7 мм.

После сжатия изготовленная таким образом пластинка покрывается тонким слоем (толщиною около 0,2—0,3 мм) окиси магния путем копчения, для чего пластинка держится над открытым пламенем горящего в воздухе магния.

2. Пластинка из сернокислого бария. Пластинка изготовляется из мелко растертого (незадолго до употребления) порошка сернокислого бария. Берется порошок, обычно применяемый для рентгенографии. Порошок подвергается сильному сжатию. Матовая лицевая сторона может быть получена двумя способами. 1. Между полированной металлической поверхностью и лицевой поверхностью сернокислого бария во время сжатия прокладывается очень тонкая, однородная бумажная калька, которая после сжатия удаляется. 2. Сернокислый барий перед сжатием в очень небольшой степени увлажняется. Лицевая сторона сдавливается полированной металлической поверхностью. После сжатия и последующего высыхания поверхность становится матовой.

Достаточная матовость определяется тем, что при падении света под углом около 10° к поверхности не должно иметь места правильное отражение.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Технические условия

1. При цветовых измерений должны применяться следующие источники света:

а) Электрический источник света — газополная электрическая лампа накаливания с вольфрамовой нитью, горящая при цветовой температуре 2842°K .

б) Источник белого света — такая же лампа совместно с двойным жидким поглотителем.

2. Составы растворов жидкого поглотителя для источника белого света таковы:

а) первый раствор:

серно-медная соль	3,412 г
маннит	3,412 г
пиридин	30,0 мл
вода добавляется до	1 000 мл

б) второй раствор:

двойная серно-кобальто-аммониевая соль . . 30,580 г
 серно-медная соль 22,520 г
 серная кислота (плотность 1,835) 10,0 мл
 вода дистиллированная добавляется до . . . 1000 мл

Каждый из растворов помещается в сосуде с плоскими стенками из бесцветного оптического стекла, толщина слоя жидкости в нем — 10,0 мм.

3. Относительное распределение мощности по спектру обоих источников света, которое применяется в случае надобности при вычислениях трехцветного и двухцветного состава цвета по его спектральным коэффициентам отражения или пропускания, таково:

Длина волн, милли- микроны	Электриче- ский источ- ник света	Источник белого света	Длина волн, милли- микроны	Электриче- ский источ- ник света	Источник белого света
—	—	—	560	100,00	105,3
380	9,79	33,0	570	107,18	102,3
390	12,09	47,4	580	114,44	97,8
400	14,71	63,3	590	121,73	93,2
—	—	—	600	129,04	89,7
410	17,68	80,6	—	—	—
420	21,00	98,1	610	136,34	88,4
430	24,67	112,4	620	143,62	88,1
440	28,70	121,5	630	150,83	88,0
450	33,09	124,0	640	157,98	87,8
—	—	—	650	165,03	88,2
460	37,82	123,1	—	—	—
470	42,87	123,8	660	171,96	87,9
480	48,25	123,9	670	178,77	86,3
490	53,91	120,7	680	185,43	84,0
500	59,86	112,1	690	191,93	80,2
—	—	—	700	198,26	76,3
510	66,06	102,3	—	—	—
520	72,50	96,9	710	204,41	72,4
530	79,13	98,0	720	210,36	38,3
540	85,95	102,1	730	216,12	64,4
550	92,91	105,2	740	221,66	61,5
—	—	—	750	227,00	59,2
—	—	—	760	232,11	58,1

4. Электрический источник света применяется в тех случаях, когда требуется определять цвет применительно к условиям искусственного (электрического) освещения, источник белого цвета — применительно к условиям дневного рассеянного освещения.

431с
Цена 4 р. 25 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТИЗАЦИЯ и РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ

Москва, Ильинка, Рыбный пер., 2, пом. 28

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ:

А. К. ГАСТЕВ

Методологические предпосылки разработки, обоснования и классификации стандартов.

Сборник статей, дающих общие указания о методах разработки и техно-экономического обоснования стандартов в соответствии с новейшей углубленной постановкой проблемы стандартизации в социалистическом хозяйстве.

Серия „Проблемы социалистической стандартизации“, вып. 1.
1933 г., 4¹/₂ печ. листа, ц. 80 коп.

ГУФФЕНБЕРГ

Справочник по стандартам научно-технических обозначений и нормальных величин.

7 печ. листов.

Справочник предназначен для научно-технических кругов, научных работников во всех областях техники, учащихся ВТУЗов, для инженерно-технических кругов.

БАХРАХ, ГОРОДЕЦКИЙ, ЛЕСОХИН и КУТАИ

Стандартизация машин. Серия „Проблемы социалистической стандартизации.“

Вып. 2, 5³/₄ печ. листа, ц. 1 р. 85 к.

Этапы стандартизации машин. Стандартизация агрегатов и деталей машин-орудий. Очередные проблемы взаимозаменяемости.

ПРОДАЖУ И ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАКАЗОВ

НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ ПРОИЗВОДЯТ:

МАГАЗИН ИЗДАТЕЛЬСТВА: Москва, Кузнецкий Мост, 20;

ОТДЕЛЕНИЯ ИЗДАТЕЛЬСТВА: Ленинград, ул. Герцена, 11; Киев, ул. Воронского 29; Смоленск, Б. Советская, 26; Горький, ул. Свердлова, 9; Иваново, Социалистическая, 40; Воронеж, Пр. Революции, 57;

ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ИЗДАТЕЛЬСТВА: отделения Книгосбыта ОНТИ—Свердловск, ул. Ленина, 33; Ростов/Дон, ул. Энгельса, 119; Самара, Ленинградская ул., 34;

УКРАИНСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ОГИЗ—Харьков, Сергиевская пл. 3; БАКТ—Минск, Революционная, 26;

ТАТИЗДАТ—Казань, Чернышевская, 21.

A

8068

343