621.3
М 55

В. В. Мешков

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Госэнергоиздат · 1961

В. В. МЕШКОВ

628
М559

628.9

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИКА И КОЛОРИМЕТРИЯ

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия
для высших технических учебных
заведений

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

628.9

ЭЭ-5-2

Книга является второй частью учебного пособия «Основы светотехники», выпущенного Госэнергоиздатом в 1957 г. В первой главе рассматриваются принципы работы органа зрения, основные характеристики зрительного процесса и методы оценки чувствительности органа зрения в различных условиях освещения. Наряду с установившимися зрительными процессами в книге рассмотрены явления адаптации, зрительной инерции и индукции. Первая глава заканчивается рассмотрением принципов учета зрительного дискомфорта и утомления.

Во второй главе рассмотрены общие принципы построения колориметрических систем и методы их преобразования, описаны свойства применяемых на практике колориметрических систем, изложены методы расчета цвета, рассмотрены существующие принципы воспроизведения цвета, методы оценки качества воспроизведения в различных областях применения цвета (цветовая сигнализация, цветовая кинематография, цветное телевидение, цветная полиграфия).

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов светотехнической специальности высших учебных заведений и может быть полезна для инженеров-светотехников, врачей-гигиенистов и других лиц, занимающихся вопросами освещения и воспроизведения цвета.

6П2.19
М 56

Мешков Владимир Васильевич

Основы светотехники, ч. 2, Физиологическая оптика и колориметрия (Учеб. пособие для высш. техн. учеб. заведений). М.—Л., Госэнергоиздат, 1961, 416с. с черт.

6П2.19

* * *

Редактор *Г. И. Ашкенази* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 18/XI 19[illegible] Подписано к печати 21/I 1961 г.
Формат бумаги 60×92¹/₁₆ Объем 26 п. л. Уч.-изд. л. 28,4
Т-01648 Тираж 7 000 Цена 1 р. 02 [illegible] Зак. 2589

Типография Госэнергоиздата, Шлюзовая наб., 10.

КНИЖНЫЙ ФОНД
Библиотека МЭИ. Энерг.
Ин-тута им.
Инв. № 48324

237-243
247-254
260-266
286-290

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой вторую часть учебного пособия по курсу «Основы светотехники» для студентов светотехнической специальности. В основу этого пособия, так же как и первой его части, положен курс лекций, читаемый автором в Московском ордена Ленина энергетическом институте с 1949 г.

Вторая часть пособия содержит две главы: «Основы физиологической оптики» и «Основы учения о цвете». При изложении материала этих глав автор пытался установить тесную связь между ними, учитывая, что колориметрия, пользуясь методами преобразования в ряде случаев условных колориметрических систем, все же основывается на соотношении действительных реакций трех рецепторов органа зрения.

Для обеспечения возможности самостоятельного, более углубленного ознакомления студентов с вопросами физиологической оптики, а также методами контроля качества воспроизведения цвета и преобразования колориметрических систем обе главы учебного пособия написаны несколько шире программы курса и снабжены перечнем литературы как отечественной, так и зарубежной.

Рукопись учебного пособия, так же как и программа курса, неоднократно обсуждалась на кафедре Светотехники МЭИ. Считаю своим приятным долгом выразить благодарность всему коллективу кафедры и в первую очередь доц. М. М. Епанешникову, канд. техн. наук А. Б. Матвееву и ассистентам Л. И. Крупенниковой и В. С. Литвинову, активно участвовавшим в подготовке и проведении обсуждения рукописи. Особую признательность выражаю доктору техн. наук проф. М. М. Гуревичу и доктору физ.-матем. наук А. В. Луизову, сделавшим ряд ценных замечаний в процессе рецензирования рукописи.

За помощь в подготовке книги к печати благодарю редакторов Издательства инж. Г. И. Ашкенази и инж. А. Л. Сапарову.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Глава первая

ОСНОВЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Зрительный анализатор (общие сведения) 7
1-1. Структура анализатора 7
1-2. Оптическая система глаза 10
1-3. Световоспринимающая система глаза 22
1-4. Биоэлектрические процессы 29

Установившийся зрительный процесс 33
1-5. Характеристики зрительного процесса . . . 33
1-6. Спектральная чувствительность 44
1-7. Абсолютная световая чувствительность . . . 49
1-8. Контрастная чувствительность 60
1-9. Различимость формы и расстояния 80
1-10. Цветовая чувствительность 96

Неустановившиеся зрительные процессы 121
1-11. Зрительная адаптация 121
1-12. Зрительная инерция . . 135
1-13. Зрительная индукция 167
1-14. Зрительный дискомфорт и утомление 182

Глава вторая

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О ЦВЕТЕ

Основные понятия и определения 195
2-1. Цвет и его компоненты 196
2-2. Цветовое пространство 204
2-3. Аддитивное смешение цветов 216
2-4. Основы построения колориметрических систем 223
2-5. Преобразование систем 237
2-6. Система *RGB* 245
2-7. Международная система *XYZ* 247
2-8. Основная физиологическая система *КЗС* . . 254
2-9. Система B, λ, p 260
2-10. Равноконтрастные системы 257
2-11. Цветовые атласы . . . 284

Цветовые расчеты 290
2-12. Расчет цвета излучения с линейчатым спектром 290
2-13. Расчет цвета излучения со сплошным спектром 293
2-14. Определение цветовой температуры излучения 301

Воспроизведение цвета . . . 302
2-15. Аддитивное воспроизведение цвета 302
2-16. Субтрактивное воспроизведение цвета 309
2-17. Оценка качества воспроизведения цвета . . 322

Некоторые вопросы практики применения цвета . . . 335
2-18. Светофильтры 335
2-19. Цвет в световой сигнализации 350
2-20. Цвет в кинематографии 352
2-21. Цвет в полиграфии . . 366
2-22. Цвет в телевидении . . 372
2-23. Основные принципы измерения цвета 386
Приложения 397
Литература 400
Алфавитный указатель 414

ВВЕДЕНИЕ

Науку о зрении — оптику принято разделять на три отдела:
а) геометрическая оптика;
б) физическая оптика;
в) физиологическая оптика и учение о цвете.

Такое деление оптики на три самостоятельных раздела очень условно, так как все три раздела во многом взаимосвязаны. Так, например, принципы построения системы фотометрических величин и выбор для них единиц, так же как и колориметрических систем оценки цвета излучений, формально относящиеся к геометрической оптике и проективной геометрии, не могут быть правильно решены без привлечения методов физиологической оптики, без знания закономерностей взаимодействия излучения с органическим веществом рецепторов.

Теоретические основы современной светотехники, решающей инженерные вопросы генерации, распространения и преобразования излучения оптического диапазона, охватывают все три раздела оптики. Необходимость использования при решении светотехнических задач закономерностей физиологической оптики, опирающейся не только на физику и химию, но также на физиологию и частично на психологию, определяет специфику многих разделов светотехники, в первую очередь осветительной техники. Специфика тех разделов светотехники, в которых приемником излучения является орган зрения (зрительный анализатор), заключается в необходимости учета особенностей реакции сложного биологического приемника, а также необходимости разработки методов количественной и качественной оценки зрительных ощущений. Все эти вопросы, включая и методы измерения характеристик зрительных процессов в их установившихся и неустановившихся фазах, относятся к группе многочисленных вопросов физиологической оптики. Для современного инженера-светотехника невозможно ограничиться умением пользоваться лишь системой световых величин и применением этой, в достаточной степени условной, системы к решению пусть даже самых сложных задач распространения излучения. Светотехник должен располагать методами экспериментального и расчетного анализа процессов действия излучения на приемник, следовательно, представлять механизм

взаимодействия излучения с веществом. Светотехник должен также располагать знаниями, позволяющими ему установить необходимые светотехнические требования, обеспечивающие заданные условия функционирования приемной системы. Для того чтобы решить эти вопросы применительно к зрительному анализатору в условиях осветительной, светопроекционной и светосигнальной техники, необходимо знать закономерности поведения органа зрения в различных режимах его освещения. Необходимо уметь выбирать те характеристики излучения, которые однозначно определяют требуемые реакции органа зрения, и находить функциональные зависимости уровней реакции от выбранных фотометрических характеристик излучения. Для самостоятельного решения этих вопросов светотехники необходимы знания основных законов физиологической оптики. Задачу сообщения минимума этих сведений и ставит перед собой автор настоящего учебного пособия.

Широкое внедрение цвета в различные отрасли техники (кино, телевидение, полиграфия и др.) и необходимость технического контроля качества воспроизведения цвета заставляют светотехников сосредоточить внимание на изучении основ физиологической оптики и колориметрии. Возможное несоответствие зрительного цветового ощущения спектральным характеристикам излучения и его цвету приводит к необходимости выбора методов и критериев оценки воспроизведения цвета, учитывающих действительные соотношения уровней реакции трех цветовоспринимающих рецепторов органа зрения, работа которых определяется законами физиологии органа зрения. Тесная связь физиологической оптики с учением о цвете — колориметрией вызвала необходимость всемерной увязки этих разделов светотехники. Такая попытка, основанная на трехкомпонентной теории цветового зрения, сделана в настоящем учебном руководстве.

Отсутствие достаточных знаний в области механизма возникновения зрительных ощущений заставило при рассмотрении некоторых особенностей зрительного процесса пользоваться эквивалентными схемами (световая и цветовая индукция, цветовая адаптация и др.). Дальнейшая разработка теоретических основ физиологической оптики, в частности изучение механизма зрительного процесса, требует более тесного сотрудничества физиков, светотехников и физиологов. Для активного участия в этой работе инженеры должны понимать физиологические проблемы светотехники, так же как физиологи и гигиенисты, работающие в области физиологии и гигиены зрения, должны понимать светотехнические и колориметрические методы исследования, используемые в физиологической оптике.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

„Таким образом, вся жизнь от простейших до сложнейших организмов, включая, конечно, и человека, есть длинный ряд все усложняющихся до высочайшей степени уравновешиваний внешней среды. Придет время, пусть отдаленное, когда математический анализ, опираясь на естественно-научный, охватит величественными формулами уравнений все эти уравновешивания, включая в них, наконец, и самого себя".

И. П. ПАВЛОВ

ЗРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР

(общие сведения)

1-1. Структура анализатора

Источником знаний об окружающем нас мире являются те ощущения, которые возникают в результате воздействия материи внешнего мира на наши органы чувств (ч. I, § 3-22). Согласно этому положению, являющемуся основой материалистического понимания процессов возникновения ощущения, ... «мир действительно существует помимо человека и живет самобытной жизнью, но познание его человеком помимо органов чувств невозможно, потому что продукты деятельности органов чувств суть источники всей психической жизни» [1].

Передовая физиологическая школа русских ученых И. М. Сеченова (1829—1905) и И. П. Павлова (1849—1936), создавшая материалистическую рефлекторную теорию ощущения, утверждает, что ощущения отражают объективно существующий мир. Выражая эту мысль, И. М. Сеченов писал [Л. 1, 2] о чувственных образах, что в них мы «чувствуем не себя, не перемену

---

[1] И. М. Сеченов. Предметная мысль и действительность, Избранные философские и психологические произведения, Госполитиздат, 1947.

в состоянии нашего тела, а предмет, вызвавший впечатление ... того, что происходит в глазу при видении мы не чувствуем, а видим непосредственно все внешнее стоящим вне нас». Ощущения в зависимости от свойств материи, действующей на органы чувств, и формы ее движения разделяются на несколько разновидностей, из которых зрительные ощущения играют немаловажную роль в общении человека с природой. В настоящее время существует несколько попыток классификации ощущений. Наиболее распространенной является классификация по содержанию ощущений: зрительные, слуховые, вкусовые, обонятельные, осязательные, температурные, а также ощущения, возникающие в результате процессов внутри организма (голод, жажда и др.).

Человек с его высокоразвитой нервной системой обладает многими специализированными органами чувств, позволяющими ему познать окружающий мир. Специализированные органы чувств, возникшие в процессе эволюционного совершенствования их формы и свойств специализированных чувствительных клеток организма, называемых *рецепторами,* обладают очень высокой чувствительностью. Так, например, орган зрения в наиболее благоприятных условиях способен реагировать на несколько десятков фотонов видимого излучения, упавшего на зрачок глаза (ч. 1, § 2-16), что соответствует возможности увидеть в ночное время источник с силой света в одну свечу на расстоянии 10—12 *км*.

Сложный специализированный орган чувств обладает способностью не только оценивать количественный уровень сигналов, поступающих извне, но также судить о качестве этих сигналов. Так, например, орган зрения позволяет судить не только об уровне зрительного ощущения — *светлоте,* но также обеспечивает возможность дифференцировать цветовые оттенки излучения, определяемые их спектральным составом.

Сигналы, воспринимаемые органами чувств извне, принято называть *раздражителями,* а их воздействие — *раздражениями.* Раздражение любого органа чувств вызывается внешним по отношению к рецептору воздействием движущейся материи, например световым излучением, вызывающим раздражение органа зрения.

Для обеспечения качественной оценки поступающих извне раздражителей орган чувств должен обладать способностью качественного анализа реакций рецепторов. Этот анализ реакций осуществляется в коре головного мозга, с которой рецепторы любого органа чувств связаны нервными волокнами. Способность органов чувств анализировать поступающие извне раздражения позволила И. П. Павлову [Л. 2] присвоить им название *анализаторов.* Анализатором является такой орган, в котором

энергия раздражителя трансформируется в энергию биологических процессов высшей нервной деятельности, определяющих возникновение ощущения.

Для возникновения целостного зрительного восприятия наблюдаемого предмета, определяемого в первую очередь его размером, формой и цветом, необходимо не только анализировать сигналы, поступающие от рецепторов в центральное звено анализатора, но также и синтезировать эти сигналы в ощущения, а отдельные ощущения в восприятие. Таким образом, деятельность каждого анализатора, в том числе и зрительного, представляет собой единство анализа и синтеза поступающих извне раздражений.

Зрительный, так же как и любой другой, анализатор состоит из трех звеньев: периферического, проводникового и центрального. Периферическим звеном зрительного анализатора является глаз, представляющий совокупность оптической и световоспринимающей систем. Оптическая система глаза состоит из оптики, предназначенной для создания изображения внешнего пространства на сетчатой оболочке, а также из мышц, управляющих движением глаза, фокусировкой изображения и регулированием его яркости. Световоспринимающей системой глаза является его сетчатая оболочка, заполненная светочувствительными клетками — *зрительными рецепторами.* Проводниковым звеном служит зрительный нерв, соединяющий отдельными волокнами рецепторы с клетками затылочной части коры головного мозга, являющейся центральным звеном зрительного анализатора.

Как было показано ранее (ч. 1, § 3-22), ощущения объективны по содержанию, так как они отражают внешний мир, и в то же время они зависят от состояния не только всех звеньев анализатора, но и всего организма в целом «...Материя, действуя на наши органы чувств, производит ощущения... Ощущение зависит от мозга, нервов, сетчатки и т. д., т. е. от определенным образом организованной материи»[1]. Опыт показывает, что существует взаимодействие между отдельными анализаторами. Так, например, световая чувствительность [Л. 3] изменяется при сильном раздражении слухового или обонятельного анализатора. Это взаимодействие, подтверждающее целостность живого организма и взаимосвязь его частей, следует объяснять наличием центральных индуктивных связей, существующих между всеми анализаторами. Это заставило внести понятие об *адэкватном раздражении,* являющемся таким сигналом внешнего мира, на который специализирован исследуемый орган чувств. Так, например, видимое излучение есть адекватное раздражение для зрительного анализатора.

[1] В. И. Ленин, Собрание сочинений, т. XIV, стр. 43.

1-2. Оптическая система глаза

Редуцированный глаз. Различение формы наблюдаемого предмета и отдельных его деталей обеспечивает оптика глаза, фокусирующая уменьшенное и обратное изображение предмета на поверхность сетчатой оболочки. Как известно (ч. 1, § 1-27), преломляющая сила оптики глаза в основном определяется роговой оболочкой и хрусталиком глаза. Роговая оболочка, имеющая в среднем радиус кривизны передней поверхности 7,7 и задней 6,8 *мм* и обладающая показателем преломления $n_р = 1{,}37$, отделена от хрусталика передней камерой глаза (рис. 1-1), заполненной водянистой влагой с показателем преломления $n_в = 1{,}33$. Хрусталик имеет чечевицеобразную форму с различной кривизной передней и задней поверхностей. Преломляющая сила хрусталика изменяется в пределах 19—33 диоптрий за счет уменьшения радиуса кривизны, главным образом его передней поверхности, и взаимного перемещения слоев тела хрусталика, обладающих различными показателями преломления. Перемещение слоев тела хрусталика увеличивает роль его ядра в центральной зоне[1], благодаря чему в этой зоне возрастает преломляющая сила хрусталика. Увеличение преломляющей силы оптики глаза для обеспечения четкого изобра-

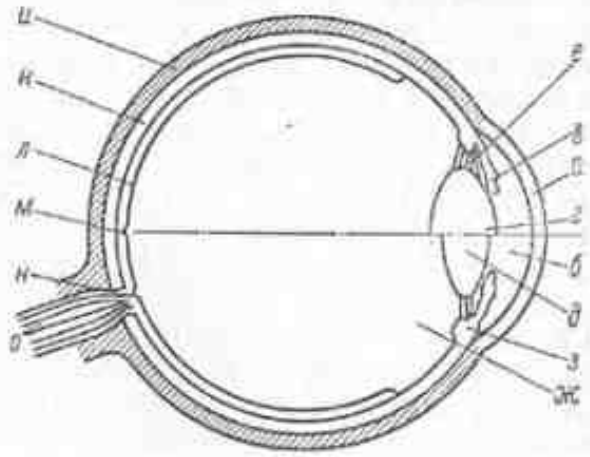


Рис. 1-1.

а—роговая оболочка; *б*—передняя камера; *в*—радужная оболочка; *г* и *д*—хрусталик (*г*—в аккомодации, *д*—в покое); *е*—цинновые связки; *ж*—стекловидное тело; *з*—цилиарная мышца; *и*—белковая оболочка; *к*—сосудистая оболочка; *л*—сетчатая оболочка; *м*—центральная ямка сетчатки; *н*—слепое пятно; *о*—глазной нерв.

[1] Ядро хрусталика обладает показателем преломления $n_я = 1{,}41$ при среднем значении показателя для всех слоев $n_х = 1{,}386$.

жения на сетчатой оболочке близко расположенных предметов принято называть *аккомодацией*. Вследствие того, что расстояния между главными, а также узловыми точками сложной оптической системы глаза очень невелики, при расчетах изображения принято схематизировать оптику глаза, заменяя ее одной преломляющей поверхностью, разделяющей внешнее пространство от стекловидного тела. Такой глаз названный *редуцированным*, имеет одну узловую точку, расположенную на 7 *мм* сзади от роговицы, и одну главную, расположенную примерно в середине передней камеры глаза на расстоянии 2 *мм* от внутренней поверхности роговой оболочки.

Редуцированный глаз по Вербицкому [Л. 4] характеризуется следующими данными:

Преломляющая сила, диоптрий (*дптр*)	58,8
Длина глаза, *мм*	23,4
Радиус кривизны преломляющей поверхности, *мм*	6,8
Показатель преломления второй среды	1,4
Радиус кривизны поверхности сетчатой оболочки глаза, *мм*	10,2

В случае аккомодации параметры редуцированного глаза по Вербицкому должны изменяться. Аккомодация на 1 *дптр* определяется уменьшением радиуса кривизны преломляющей поверхности на 0,04 *мм* и увеличением показателя преломления второй среды на 0,004.

Механизм аккомодации. Изменение кривизны преломляющих поверхностей хрусталика и перемещение его слоев в процессе аккомодации осуществляются под воздействием аккомодационной (цилиарной) мышцы. Хрусталик, обладающий очень большой упругостью, прикреплен по периферии с помощью цинновых связок к аккомодационной мышце, управляющей его формой. При сокращении кольцевых волокон этой мышцы происходит ослабление натяжения цинновых связок и увеличение кривизны хрусталика, а также изменение расположения его слоев (рис. 1-1). Чем ближе наблюдаемый предмет, тем сильнее сокращение кольцевых волокон аккомодационной мышцы, тем меньше натяжение цинновых связок, тем выпуклее хрусталик, тем больше его преломляющая сила. При удалении наблюдаемого предмета происходит сокращение радиальных и расслабление кольцевых волокон аккомодационной мышцы, в результате чего увеличивается натяжение цинновых связок и уменьшается преломляющая сила хрусталика. Границы аккомодации глаза определяются ближней и дальней точками ясного видения. *Ближняя точка ясного видения* характеризуется наименьшим расстоянием от глаза наблюдателя до предмета, отчетливо различаемого при максимальной аккомодации. *Дальняя точка ясного видения* характеризуется расстоянием от гла-

за до наблюдаемого предмета, отчетливо видимого при полном покое аккомодационной мышцы. Расстояние между ближней и дальней точками ясного видения является мерой пространства, в пределах которого наблюдатель может отчетливо видеть все предметы благодаря аккомодационной способности. Это расстояние, выраженное для глаза в единицах оптической силы, принято называть *глубиной (длиной) аккомодации:*

$$A = \frac{1}{l_б} - \frac{1}{l_д}, \qquad (1\text{-}1)$$

где A — глубина аккомодации глаза, *дптр*;
$l_б$ — расстояние ближней точки от глаза, *м*;
$l_д$ — расстояние дальней точки от глаза, *м*.

Для глаза с нормальной рефракцией дальняя точка ясного видения расположена в бесконечности $l_д = \infty$, следовательно, глубина аккомодации определяется:

$$A = \frac{1}{l_б}. \qquad (1\text{-}1а)$$

Длительная аккомодация на ближнюю точку приводит к утомлению. Без излишнего утомления нормальный глаз может наблюдать предметы, находящиеся на расстоянии 0,25—0,3 *м*. Это расстояние принято называть *оптимальным расстоянием*. Оптимальному расстоянию соответствует согласно (1-1а), аккомодация глаза, равная 3—4 *дптр*. Как показывает опыт, быстрота аккомодации (рис. 1-2) и ее глубина зависят от уровня яркости адаптации, повышаясь до некоторого предела с увеличением яркости.

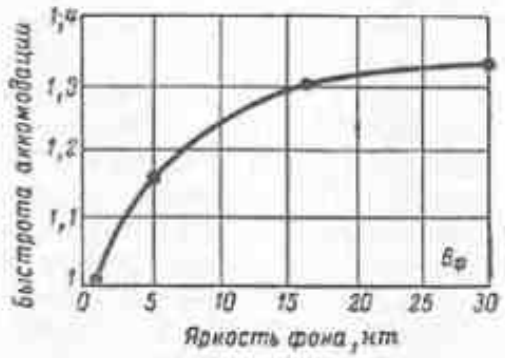


Рис. 1-2.

Мышечный баланс глаза. Для повышения возможности ориентации в окружающем пространстве, а также для обеспечения совместной согласованной работы правого и левого глаз глазные яблоки могут совершать вращательные движения вокруг центров, лежащих внутри каждого глаза.

Движение глаза осуществляется тремя парами мышц, прикрепленных сухожилиями к роговой оболочке глаза. Две пары прямых мышц — верхняя и нижняя, а также наружная и внутренняя в основном управляют движением глаза: вверх, вниз, вправо и влево. Вследствие того, что сокращение верхней и нижней прямых мышц приводит к движению глаза не только вверх и вниз, а несколько кнаружи и внутрь, третья пара косых мышц участвует в любом вертикальном движении глаза. Сокращение мышц и связанное с ним движение глаза возникают в результате импульсов, поступающих из центра по глазодвигательному нерву.

Движения глаза бывают произвольные, возникающие в результате сигналов, поступающих из центра, а также непроизвольные. Непроизвольными движениями глаза принято называть систематические небольшие смещения изображения на сетчатке при кажущемся постоянстве фиксации объекта наблюдения. Непроизвольные движения глаза могут иметь амплитуду до 20—40″. Эти движения происходят скачками относительно фиксации линии зрения со средней скоростью 5—6 *угл. мин·сек*$^{-1}$, достигающей в максимуме до 30 *угл. мин · сек*$^{-1}$ [Л. 6].

Произвольные движения глаза происходят также прерывисто с некоторыми небольшими паузами между отдельными скачками. Такое скачкообразное движение глаза следует объяснить антагонистическим действием глазодвигательных мышц. Наибольший интерес представляют движения, обеспечивающие сведение и разведение осей двух глаз, называемые *конвергенцией* и *дивергенцией*. Конвергенция и дивергенция необходимы для обеспечения согласованной работы правого и левого глаз при наблюдении предметов, удаленных на различные расстояния (§ 1-9). Глаза наблюдателя конвергируют при переводе взгляда на более близкие предметы, а дивергируют — на более удаленные. Дивергенция и конвергенция осуществляются с помощью прямых внутренних и наружных мышц.

Конвергенция и аккомодация вызываются одной причиной — приближением наблюдаемого предмета, вследствие чего они взаимосвязаны. Эта зависимость определяет соответствие состояний аккомодации и конвергенции. При бинокулярном наблюдении это соответствие, называемое *мышечным балансом глаза*, обязательно, так как нарушение баланса вызывает двоение зрительного ощущения. Изучение динамики мышечного баланса глаза позволяет контролировать утомление организма, возникающее в результате напряженной зрительной работы [Л. 8].

Зрачковый рефлекс. Для предотвращения чрезмерного раздражения сетчатой оболочки глаза по мере увеличения яркости поля зрения происходит уменьшение диаметра глазного зрачка. Эту реакцию, протекающую без участия воли человека, принято называть *зрачковым рефлексом*.

Причиной зрачкового рефлекса может быть не только изменение яркости поля зрения, но также сильная боль, испуг и другие ощущения. Изменение диаметра зрачка происходит в результате сокращения и расслабления мышц радужной оболочки. Сокращение кольцевых волокон этих мышц приводит к сокращению зрачка, а радиальных волокон этих же мышц — к расширению. Действие кольцевых волокон мышц радужной оболочки возникает в результате сигналов, поступающих по глазодвигательному нерву, ведающему дви-

жением глазного яблока и регулирующему аккомодацию глаза. Единство сигналов действия определяет взаимосвязь зрачкового рефлекса с процессами аккомодации и конвергенции. Как показывают исследования [Л. 9], усиление аккомодации и конвергенции приводит к уменьшению диаметра зрачка. По исследованиям Кувре, рост аккомодации от 0 до 7 *дптр* приводит почти к двукратному сокращению диаметра зрачка.

На основании обобщения результатов исследования многих авторов Крауфорд [Л. 10] предложил математическую зависимость диаметра зрачка от уровня яркости поля зрения:

$$d = 5 - 3 \operatorname{tg} h\,(0{,}4 \lg B), \tag{1-2}$$

где d — диаметр зрачка, *мм*;

B — яркость поля зрения, *нт*;

$\operatorname{tg} h\,(x) = \dfrac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ — гиперболический тангенс.

Уравнение Крауфорда (1-2) с достаточной точностью определяет размер зрачка в том случае, если все поле зрения или большая его часть имеют одинаковую яркость B (рис. 1-3). Как показал Н. И. Пинегин [Л. 11], уменьшение углового размера поля зрения при постоянстве его яркости приводит к уменьше-



Рис. 1-3.

1—по данным Риса; *2*—по данным Фляман; *3*—по данным Крауфорда; *4*—расчетная по Крауфорду.



Рис. 1-4.

нию зрачкового рефлекса. Ход кривых $d = f(\Theta)$ при $B = \text{const}$ (рис. 1-4) показывает, что увеличение поля зрения сверх 5—10° практически не оказывает влияния на зрачковый рефлекс.

Скорость реакции зрачка неодинакова для его сужения и расширения. Согласно наблюдениям Риаса сужение зрачка происходит значительно быстрее его расширения. При переходе из темноты к яркости $B = 318$ *нт* сужение зрачка происходит в течение 5 *сек*, а расширение при обратном переходе требует около 150 *сек* (рис. 1-5).

Освещенность сетчатой оболочки. Как известно (ч. I, § 1-34), освещенность сетчатой оболочки глаза в зоне

изображения определяется произведением яркости объекта наблюдения на площадь зрачка:

$$E_c = \frac{\tau}{f^2} Bq, \tag{1-3}$$

где E_c — освещенность, *лк*;

B — яркость объекта наблюдения, *нт*;

τ — коэффициент пропускания глазных сред;

f — переднее фокусное расстояние оптической системы глаза ($f = 1{,}7$ *см*);

q — площадь входного зрачка глаза, *см*².

Подставляя в (1-3) постоянное значение первого фокусного расстояния $f = 1{,}7$ *см*, получим:

$$E_c = 0{,}27 \cdot 10^{-3} \tau B d^2, \tag{1-3а}$$

где d — диаметр зрачка глаза, *мм*.

За единицу освещенности сетчатки было предложено принять плотность светового потока на сетчатой оболочке, созда-

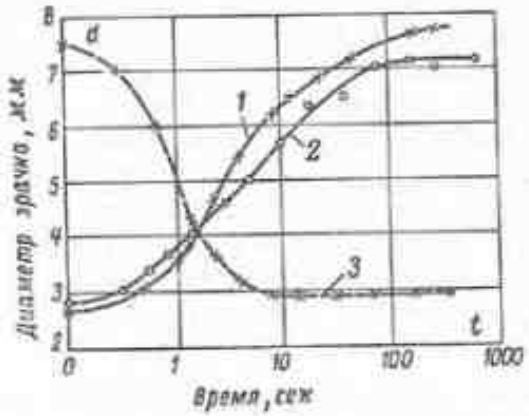


Рис. 1-5.

1—расширение зрачка по Риесу; *2*—расширение зрачка по Крауфорду; *3*—сужение зрачка по Риесу.

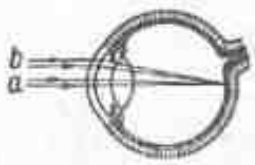


Рис. 1-6.

ваемую излучением яркостью $B = 1$ *нт* при площади входного зрачка глаза $q = 1$ *мм*². Эта единица освещенности сетчатки носит название *троланд*[1] (*трол*).

Зависимость освещенности сетчатки, *трол*, от яркости поля зрения, *нт*, можно получить, пользуясь (1-2) и (1-3):

$$\mathcal{B}_c = 0{,}79\,[5 - 3 \operatorname{tg} h\,(0{,}4 \lg B)]^2 B. \tag{1-4}$$

Эффект Стайлса — Крауфорда. В. Стайлс и Б. Крауфорд обнаружили (1933 г.), что лучи одинаковой яркости, попавшие на одно и то же место сетчатой оболочки через центр и периферию зрачка глаза (рис. 1-6), воспринимаются не-

[1] Троланд, предложивший впервые эту единицу освещенности сетчатки в 1917 г., назвал ее фотоном. С 1931 г. по предложению Американского колориметрического комитета ее название изменили на троланд.

одинаковыми по светлоте. Как было показано ранее (ч. 1, § 1-34), количественная характеристика зрительного ощущения — светлота действующего на глаз излучения — определяется его яркостью.

Пользуясь понятием светлоты как уровнем зрительного ощущения, можно сопоставить зрительную эффективность количественно и качественно различных излучений отношением свет-

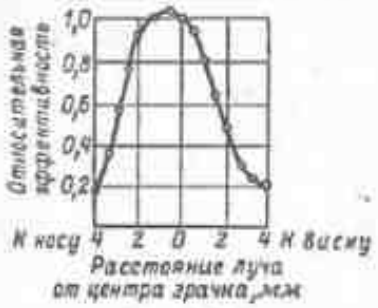


Рис. 1-7.

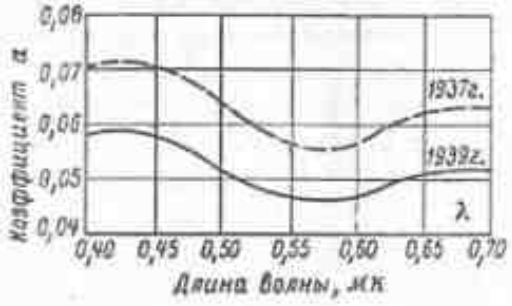


Рис. 1-8.

лоты к яркости. Следовательно, *относительную зрительную эффективность* двух излучений можно характеризовать обратным отношением их яркостей, обеспечивающих одинаковую светлоту. Пользуясь этим правилом, можно количественно выразить эффект Стайлса-Крауфорда относительной зрительной эффективностью периферического пучка (рис. 1-6), определяемой отношением яркостей центрального a и периферического b пучков при условии обеспечения одинаковой их светлоты. Как можно видеть из графика (рис. 1-7), относительная зрительная эффективность пучка, смещенного от центра зрачка на 4 *мм*, составляет лишь 20% возможного максимума.

Попытка объяснения механизма различия относительной эффективности излучений, поступающих через разноудаленные от оптической оси зоны зрачка, неодинаковым их ослаблением в глазных средах не увенчалась успехом, так как разница ослабления периферического пучка лучей по сравнению с ослаблением центрального пучка не может превышать 10—12%. Следует предполагать, что причиной возникновения эффекта Стайлса—Крауфорда является неодинаковое поглощение колбочками излучений, падающих под различными углами к оси колбочек.

На рис. 1-7 приведена кривая относительной зрительной эффективности периферических пучков в функции линейного смещения их относительно центра зрачка. Принимая эту кривую симметричной относительно оптической оси зрачка, Стайлс и Крауфорд предложили эмпирическую зависимость относительной зрительной эффективности β в функции линейного смещения пучка ρ, *мм*, от оптической оси:

$$\lg \beta = a\rho^2 \qquad (1\text{-}5)$$

где a — постоянный коэффициент порядка 0,05 для белого света.

Уравнение (1-5) можно написать в следующем виде:

$$\beta = 10^{-a\rho^2} = e^{-0{,}3a\rho^2}. \qquad (1\text{-}5а)$$

Коэффициент a практически не изменяется в условиях дневного зрения $B \geqslant 10$ *нт*. В условиях сумеречного зрения a изменяется от $a=0{,}05$ до $a=0$ для белого света. Исследование зависимости коэффициента a от длины волны однородного излучения, проведенное Стайлсом, показало, что этот коэффициент имеет наименьшие значения в области зелено-оранжевых излучений с длинами волн 0,52—0,63 *мк* (рис. 1-8).

Мун и Спенсер предложили несколько более точную эмпирическую формулу, описывающую эффект Стайлса — Крауфорда

$$\beta = 1 - 0{,}085\rho^2 + 0{,}002\rho^4. \qquad (1\text{-}6)$$

Учитывая различие относительной светлоты излучений, поступающих внутрь глаза через различные зоны зрачка, необходимо ввести поправку в определение площади зрачка при расчете эффективного значения освещенности сетчатой оболочки глаза [Л. 10]. Принимая относительную ценность кольцевых зон, равноудаленных от центра зрачка, равной относительной эффективности излучения, поступающего через эти зоны, получим следующее выражение эффективной площади зрачка:

$$q_э = 2\pi \int_0^r \beta\rho \, d\rho, \qquad (1\text{-}7)$$

где ρ — расстояние от центра зрачка до кольцевой зоны шириной $d\rho$.

r — радиус зрачка глаза.

Заменяя относительную зрительную эффективность β ее значением согласно (1-5) и (1-6), получим:

по Крауфорду

$$q_э = \frac{\pi}{2{,}3a}(1 - e^{-2{,}3ar^2}); \qquad (1\text{-}8)$$

по Муну и Спенсер

$$q_э = \pi r^2 (1 - 0{,}0425r^2 + 0{,}00067r^4). \qquad (1\text{-}9)$$

Имея выражение эффективных значений площади зрачка, можно определить эффективное значение освещенности на сетчатой оболочке как произведение яркости на эффективное значение площади зрачка. Это произведение Ле Гран [Л. 10] рекомендует назвать *световым уровнем* (niveau lumineux):

$$\Phi = Bq_э. \qquad (1\text{-}10)$$

КНИЖНЫЙ ФОНД
Библиотека Моск. Энерг. Ин-тута им.
Инв. № 483894

Для определения действительной освещенности сетчатой оболочки в люксах необходимо знать коэффициент пропускания излучения глазными средами (1-3). Спектральные значения коэффициента пропускания всех сред глаза приведены на рис. 1-9. Интегральное значение коэффициента пропускания можно рассчитать по кривой $\tau_{гл}(\lambda)$, зная спектральный состав излучения, падающего на зрачок глаза. В частности, для стандартного белого излучения с цветовой температурой $T_ц = 2854°$ К (источник А) $\tau_{гл} = 0{,}58$.

Оптические дефекты глаза. Сферическая линза обладает свойством большего преломления периферических лучей, чем центральных. В результате неодинакового преломления параллельных лучей, падающих на центральную и периферическую зоны линзы, они фокусируются не в одной точке. Это явление носит название *сферической аберрации* (рис. 1-10,*а*). При отклонении преломляющих поверхностей от сферического профиля, а также при комбинации нескольких линз с различными радиусами кривизны и различными показателями преломления возможно возникновение *отрицательной сферической аберрации* (сферической аберрации «против правила»), когда центральные лучи пересекаются в более близкой точке (рис. 1-10,*б*). Продольное сечение пучка параллельных лучей после его преломления носит название *каустики* оптической системы (рис. 1-10,*в*). Каустику принято строить для участка оптической оси вблизи места изображения. Сечение каустики плоскостью, перпендикулярной оптической оси, характеризующее качество оптического изображения светящей точки[1] в секущей плоскости, принято называть кружком рассеяния (рис. 1-10,*в*). Диаметр кружка рассеяния в результате сферической аберрации на одной поверхности определяется как

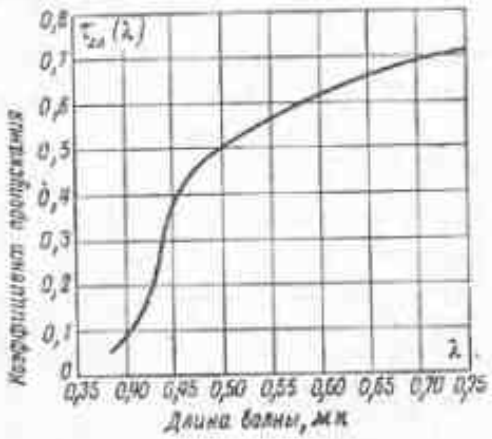


Рис. 1-9.

$$D_s = \frac{r^3}{2\,[2\ln(n-1)\,R - r^2]}, \qquad (1\text{-}11)$$

где R — радиус кривизны преломляющей поверхности;
n — показатель преломления второй среды;
r — радиус входного зрачка.

Мерой сферической аберрации может служить также наибольшая разность расстояний по оптической оси между фокусами отдельных зон оптики. Это расстояние между наиболее удаленными друг от друга фокусами, называемое *продольной аберрацией*, принято измерять оптической силой линзы, обеспечивающей коррекцию наблюдаемого расхождения фокусных расстояний.

Сферическая аберрация оптической системы глаза частично компенсируется меньшим значением показателя преломления периферических зон хрусталика по сравнению с его ядром, а также некоторым увеличением радиуса кривизны периферической части роговой оболочки. Несмотря на это, сферическая аберрация оптики глаза играет заметную роль в зрительном процессе, в особенности при диаметре зрачка, большем 3—4 *мм*. Сферическая аберрация оптики глаза зависит от аккомодации, как правило, увеличиваясь с ростом аккомодационного напряжения. На рис. 1-11 приведен график, характеризующий сферическую аберрацию правого и левого глаза для различных уровней аккомодации [Л. 13]. По оси абсцисс графиков даны значения продольной аберрации в диоптриях, а по оси ординат — линейные отклонения зоны зрачка от оптической оси глаза. Каждая кривая, нанесенная на график, соответствует постоянной аккомодации, выраженной также в диоптриях. Из приведенных графиков следует, что сферическая аберрация переходит из положительной в отрицательную по мере увеличения аккомодационного напряжения. Эти графики показывают индивидуальное различие правого и левого глаза, а также носовой и височной половины каждого глаза.

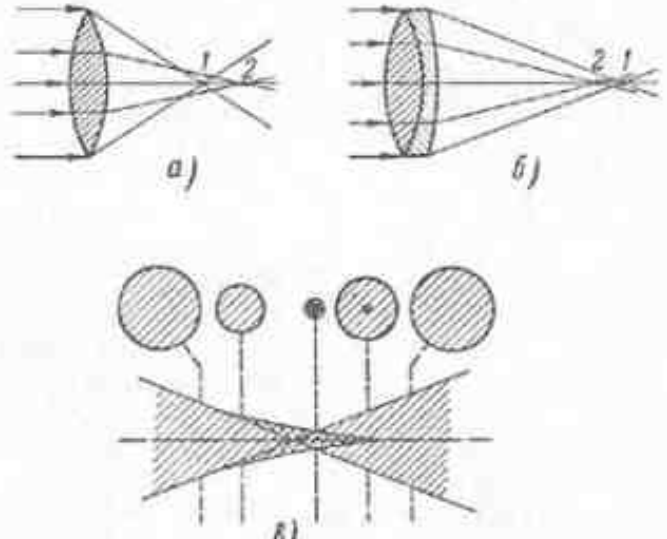


Рис. 1-10.

Второй причиной несовершенства оптического изображения на сетчатой оболочке глаза является *хроматическая аберрация*, определяемая дисперсией света в глазных средах. Наличие хро-

[1] Параллельный пучок лучей, падающий на оптическую систему, свойственен бесконечно удаленному излучателю.

матической аберрации обнаруживается при наблюдении точечного источника белого света через пурпурный светофильтр, пропускающий только крайние сине-фиолетовые и красные лучи. При отсутствии аккомодации, когда наблюдаемый источник находится вблизи дальней точки ясного видения, наблюдатель видит светящую точку красной с сине-фиолетовым ореолом. При максимальном напряжении аккомодации светящая точка видна сине-фиолетовой с красным ореолом.

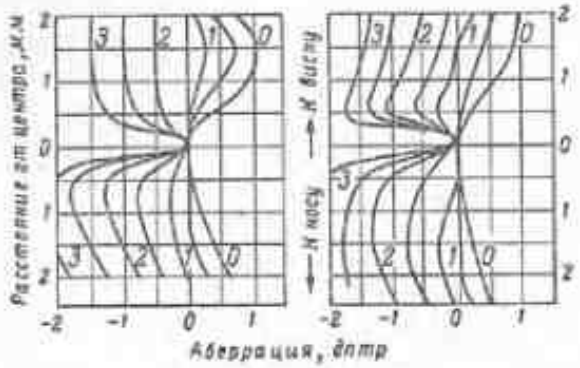


Рис. 1-11.

Как показывает опыт (Л. 14], в нормальных условиях глаз фокусирует на сетчатую оболочку желтую часть спектра, вследствие чего крайние части спектра — красно-оранжевая и сине-зеленая — изображаются недостаточно четко. Величина хроматической аберрации глаза человека для крайних однородных видимых излучений равна около 2 *дптр* (рис. 1-12). В обычных условиях освещения белым светом со сплошным спектром мы не замечаем цветных кругов светорассеяния, возникающих в результате хроматической аберрации, что объясняется наложением цветных ореолов один на другой. В результате такого наложения цветных ореолов хроматическая аберрация, так же как и сферическая, в основном сводится к некоторой нечеткости изображения. Красные и фиолетовые ореолы, появляющиеся на границах изображения, как правило, не видны вследствие малой видности крайних коротко- и длинноволновых излучений.

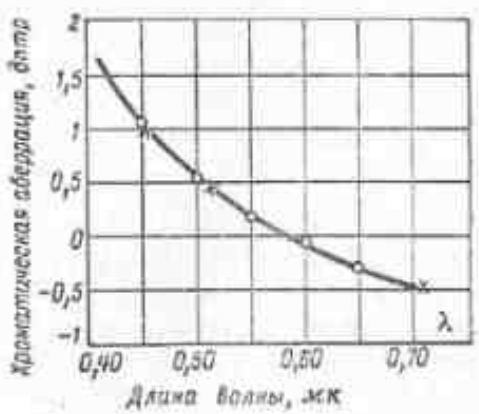


Рис. 1-12.

Третьей причиной недостаточного качества оптического изображения является *дифракция на зрачке*. Диаметр i-го темного дифракционного кольца для однородного излучения с длиной волны λ, как известно, зависит от диаметра зрачка d и заднего фокусного расстояния f_2:

$$D_i = 2k_i \frac{\lambda f_2}{nd}, \qquad (1\text{-}12)$$

где $k_1 = 1{,}22$; $k_2 = 2{,}23$; $k_3 = 3{,}24$ и т. д.;

n — показатель преломления второй среды (для редуцированного глаза $n = 1{,}4$).

Принимая по Вербицкому $f_2 = 23{,}4$ *мм* и считая границу кружка дифракционного рассеяния по первому кольцу дифракционной картины ($k_1 = 1{,}22$), получим:

$$D_д = 41 \frac{\lambda}{d}, \qquad (1\text{-}12а)$$

где $D_д$ — диаметр кружка дифракционного рассеяния, *мм*.

Дифракция через зрачок играет решающую роль в формировании оптического изображения при малых размерах зрачка ($d \leqslant 3$ *мм*). Как показали расчеты распределения яркости пучка лучей в каустике [Л. 15], максимум яркости лежит в плоскости сетчатой оболочки при $d = 4$—6 *мм*, что вполне рационально, так как размер зрачка соответствует относительно небольшим значениям яркости $B \leqslant 5$ *нт*. При диаметре зрачка до 3—5 *мм* (яркости поля зрения $B \geqslant 100$ *нт*) максимум яркости лежит за сетчаткой, однако при этом имеется наименьшая размытость изображения вследствие равенства

$$D_д \approx D_п.$$

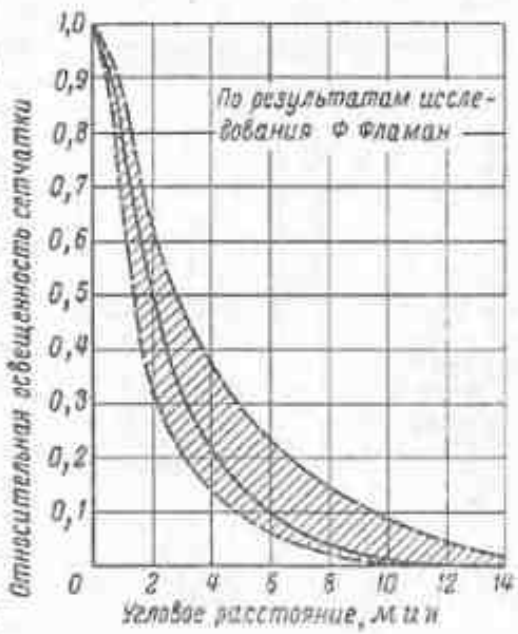


Рис. 1-13.

На качестве оптического изображения также сказывается рассеяние света в глазных средах. Согласно исследованиям Г. И. Покровского [Л. 16], рассеяние света имеет практическое значение лишь при наличии в поле зрения источников большой яркости, в особенности в тех случаях, когда общая яркость адаптации невелика. Вокруг таких слепящих источников обычно наблюдаются светлые ореолы, возникновение которых следует в основном объяснить рассеянием света в глазных средах. На рис. 1-13 приведена кривая распределения освещенности сетчатой оболочки в зоне изображения светящей линии, построенная по результатам измерения семью наблюдателями. На рисунке даны средняя кривая и пределы рассеяния результатов эксперимента. С достаточной для практики точностью отно-

сительное распределение освещенности сетчатки на границе изображения описывается уравнением

$$E_c = e^{-0{,}7\alpha}, \qquad (1\text{-}13)$$

где α — угловое смещение от границы изображения, *мин.*

1-3. Световоспринимающая система глаз

Строение сетчатой оболочки. Зрительными рецепторами являются (ч. 1, § 1-27) светочувствительные клетки, расположенные в *сетчатой оболочке (сетчатке)* глаза. Сетчатая оболочка, выстилающая дно глазного яблока, состоит из переплетения волокон зрительного нерва, заканчивающихся светочувствительными клетками двух разновидностей: *палочками и колбочками*. Толщина сетчатки, имеющей структуру, аналогичную структуре коры головного мозга, не превышает 0,4 *мм*. Схематически сетчатку можно разделить на два основных слоя (рис. 1-14):

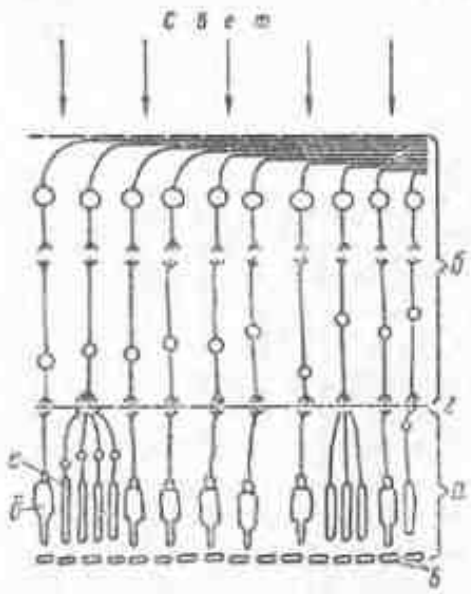


Рис. 1-14.

а — светочувствительный слой; *б* — мозговой слой; *в* — слой пигментного эпителия; *г* — синапсы; *д* — колбочки; *е* — палочки.

а) светочувствительный, обращенный к сосудистой оболочке глаза;

б) мозговой, обращенный к стекловидному телу глазного яблока.

Светочувствительный слой сетчатки содержит слой клеток пигментного эпителия и слой светочувствительных клеток. Световой поток, проникающий внутрь глаза через зрачок, попадает на светочувствительный слой, пройдя мозговой слой сетчатой оболочки. Слой пигментного эпителия содержит в себе темный пигмент — *фусцин*, перемещающийся по направлению к светочувствительным клеткам по мере увеличения освещенности сетчатки в зоне изображения. Фусцин, заполняя пространство между светочувствительными клетками, поглощает часть потока, падающего на сетчатку, и этим предохраняет палочки и колбочки от чрезмерного возбуждения излучением большой яркости. Светочувствительные клетки расположены по поверхности сетчатой оболочки неравномерно. Колбочки, являющиеся рецепторами дневного зрения, расположены наиболее плотно в центральной части сетчатки, называемой *желтым пятном* (macula lutea). Это пятно овальной формы несколько смещено к виску и находится выше места вхождения зрительного нерва в зону сетчатой оболочки. Центральная часть желтого пятна, в которой сетчатка обладает наименьшей толщиной, представляет некоторое углубление диаметром около 0,4 *мм*, что соответствует около 1,5°. Это углубление, расположенное приблизительно на расстоянии 1,25 *мм* (около 4,5°) от точки пересечения сетчатки оптической осью глаза, носит название *центральной ямки* (fovea centralis).

Центральная ямка сетчатки, образованная в результате значительного уменьшения в этой зоне толщины мозгового слоя, заполнена исключительно колбочками. В центре этой ямки поверхностная концентрация светочувствительных клеток достигает до $150 \cdot 10^3$ *мм*$^{-2}$. Колбочки центральной ямки имеют максимальную длину и минимальный диаметр (2,5—3 *мк*), что способствует уменьшению дискретности световоспринимающего аппарата в центре. Концентрация колбочек резко снижается по мере удаления от центра желтого пятна, достигая $75 \cdot 10^3$ *мм*$^{-2}$ на расстоянии 0,13 *мм* от центра ямки и $6 \cdot 10^3$ *мм*$^{-2}$ на расстоянии 3 *мм*. Наименьшая концентрация колбочек, равная $3{,}3 \cdot 10^3$ *мм*$^{-2}$, обнаружена в височной части на расстоянии 10 *мм* от центра. По мере удаления от центра несколько видоизменяются форма и размеры колбочек (рис. 1-15), диаметр которых на границе желтого пятна достигает 5—6 *мк*.

Наибольшая концентрация палочек, достигающая $170 \cdot 10^3$ *мм*$^{-2}$, наблюдается на расстоянии 10—12° от центра, уменьшаясь к центру и периферии. Общее число палочек сетчатой оболочки глаза человека равно приблизительно 130 млн. и колбочек — около 7 млн.

Светочувствительные клетки соединены с корой головного мозга нервными волокнами. Зрительный нерв, состоящий из $7 \cdot 10^5$—$8 \cdot 10^5$ отдельных нервных волокон, входит в сетчатую оболочку на расстоянии 15° от центральной ямки по направлению к носу. Место входа зрительного нерва в сетчатую оболочку лишено светочувствительных клеток, вследствие чего в этой зоне сетчатка нечувствительна к свету. Это место, носящее название *слепого пятна*, имеет размеры по горизонтали около 6° и по вертикали около 8°. Волокна зрительного нерва в сетчатой оболочке разделяются на три последовательно связанных нейрона (рис. 1-14). Смежные последовательно расположенные нейроны связаны через *синапсы*, обеспечивающие одностороннюю проводимость сигналов от светочувствительных клеток к коре головного мозга и возможность суммации состояния возбужденности нервного волокна (§ 1-4). Состояние возбуждения первых нейронов волокон зрительного нерва, как известно (ч. 1, § 3-22), определяется концентрацией в первых синапсах отрицательных ионов, возникающих в результате дис-

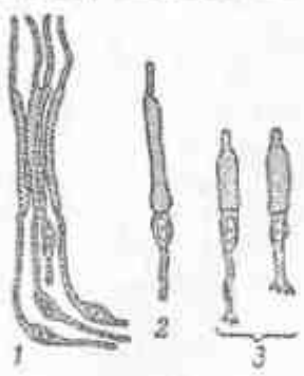


Рис. 1-15.

1 — колбочки зон центральной ямки; *2* — колбочки периферии желтого пятна; *3* — колбочки периферии сетчатой оболочки.

социации молекул светочувствительного вещества (фотореагента). Разность потенциалов между первыми и вторыми нейронами сетчатой оболочки, устанавливающаяся за счет концентрации ионов в первом синапсе, создает возбуждение второго нейрона возникающим в нем электрическим разрядом. Возбужденное состояние второго синапса передается третьему нейрону сетчатой оболочки глаза, состоящему из ганглиозных клеток, соединенных волокнами зрительного нерва с корой головного мозга. Импульсы тока действия, распространяющиеся от второго синапса к клеткам коры головного мозга, вызывают возникновение зрительного ощущения.

Гистологические исследования сетчатой оболочки [Л. 17] показывают, что каждая биполярная клетка второго нейрона соединяется в первом синапсе со многими палочками, а несколько биполярных клеток соединяются во втором синапсе с одной ганглиозной. Такая структура светочувствительного аппарата ночного зрения приводит к тому, что одному волокну зрительного нерва соответствует около 100—200 палочек. Связь колбочек с корой головного мозга значительно более индивидуализирована. В пределах центральной ямки желтого пятна сетчатки каждая колбочка связана с биполярной клеткой, имеющей, как правило, индивидуальную связь с ганглиозной клеткой третьего нейрона. Следовательно, в центральной ямке минимальна дискретность структуры световоспринимающей системы глаза, что приводит к максимально возможной разрешающей способности глаза в центральной части поля зрения. По мере удаления от центра индивидуализация обслуживания колбочек нервными связями уменьшается, достигая на периферии нескольких десятков колбочек на одно волокно зрительного нерва.

Участки сетчатки, обслуживаемые одним волокном зрительного нерва, в общем случае содержащие несколько светочувствительных клеток, принято называть *рецепторным полем*. Размеры рецепторных полей минимальны в центральной части сетчатой оболочки и растут к ее периферии. Конечные размеры рецепторных полей, даже в центральной ямке, не позволяют обнаружить некоторых дефектов оптики глаза (аберрация, дифракция и пр.). Наличие поперечных (горизонтальных) нервных связей во втором и третьем нейронах палочкового аппарата дополнительно увеличивают размеры периферических рецепторных полей, что способствует повышению световой чувствительности рецепторов ночного зрения.

Пространство, в пределах которого наблюдатель может видеть при фиксированной оси зрения, принято называть *полем зрения*. Как показывает опыт, размеры поля зрения, обычно выражаемые в угловой мере, неодинаковы для различных меридиональных сечений (рис. 1-16).

Двойственность световоспринимающей си-

стемы. Как известно (ч. 1, § 1-27 и 3-22), начальной стадией зрительного процесса является фотодиссоциация молекул светочувствительных веществ, заполняющих наружные (обращенные к пигментному слою) членики палочек и колбочек. Наиболее изучены схемы диссоциации и регенерации молекул *родопсина*— светочувствительного вещества палочек. В результате поглощения фотонов видимого излучения молекулы родопсина диссоциируют на ионы *ретинена* и *протеина*. Наибольшая вероятность диссоциации наблюдается при поглощении фотонов излучения с длиной волны $\lambda=0{,}51$ *мк*, что соответствует максимуму спектральной чувствительности темноадаптированного глаза.

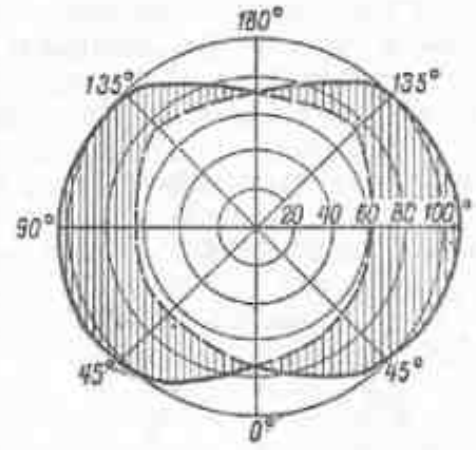


Рис. 1-16.

Ретинен—белковое вещество, являющееся производным витамина А, имеет светло-оранжевую окраску, вследствие чего его иногда называют *зрительным желтым веществом*. Ретинен может быть получен окислением витамина А или расщеплением молекул каротина. Протеины — простейшие белковые вещества, обладающие большой способностью к химическому взаимодействию с другими веществами. Протеины активно участвуют в обмене веществ живых организмов. Фотохимическая реакция преобразования родопсина в протеин завершается дальнейшим темновым (без участия фотонов) химическим преобразованием протеина в витамин А. В процессе этой второй фазы диссоциации молекул родопсина продукт распада обесцвечивается. Регенерация молекул родопсина происходит из молекул витамина А или протеина при содействии клеток пигментного эпителия, вследствие чего восстановление работоспособности палочек требует их контакта со слоем пигментного эпителия.

Как было показано ранее (ч. 1, § 3-22), при малых уровнях яркости $B \leqslant 0{,}01$ *нт* случаи диссоциации молекул родопсина в колбочках редки, вследствие чего их концентрация близка к максимальной. Увеличение яркости сверх $B=0{,}1$ *нт* приводит к резкому снижению концентрации молекул родопсина в палочках, в особенности для яркостей $B \geqslant 10$ *нт*, что происходит в результате значительного отставания процесса регенерации от бурно протекающего при большой яркости адаптации процесса распада молекул светочувствительного вещества. В силу этой особенности родопсин является светочувствительным веществом, активно участвующим в зрительном процессе в условиях сумеречного зрения ($0{,}01$ *нт* $\leqslant B \leqslant 10$ *нт*) и особенно ночного ($B \leqslant 0{,}01$ *нт*).

Хромофорной группой молекулы родопсина также является ретинен. Молекулы родопсина диссоциируют при воздействии с фотонами светового

излучения аналогично молекулам родопсина. Выцветание иодопсина под действием света, связанное с диссоциацией его молекул, происходит наиболее активно при освещении глаза излучением с длиной волны $\lambda = 0{,}555$ *мк*.

Светочувствительное вещество, заполняющее наружные членики колбочек, окрашено в фиолетовый цвет и называется *иодопсином*.

Резкое увеличение концентрации молекул родопсина в палочках при малых значениях яркости поля зрения $B \leqslant 0{,}01$ *нт* приводит к многократному росту чувствительности палочкового световоспринимающего аппарата. Повышению роли палочек в зрительном процессе способствует групповое их обслуживание волокнами зрительного нерва, а также наличие тормозного индуктивного влияния палочкового аппарата на колбочковый при $B \leqslant 0{,}01$ *нт*. Заметная роль колбочек в зрительном процессе сказывается лишь при яркостях $B \geqslant 0{,}1$ *нт* и особенно при $B \geqslant 10$ *нт*.

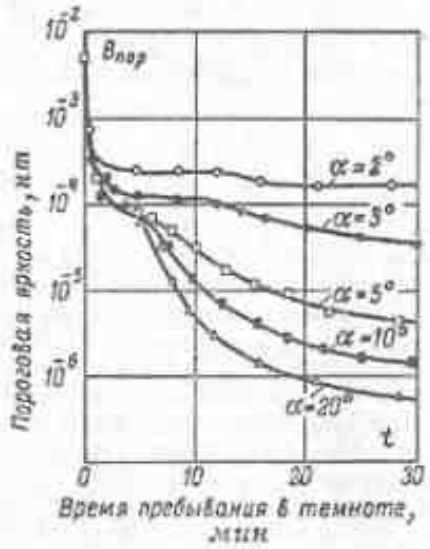


Рис. 1-17.

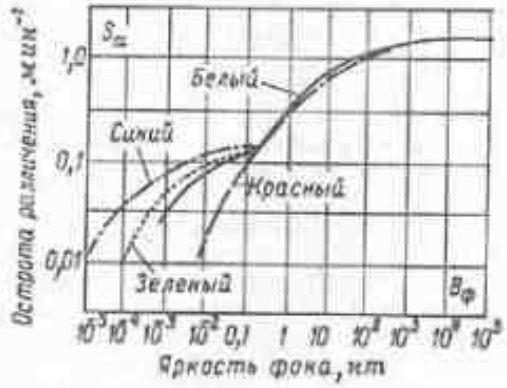


Рис. 1-18.

Ярким доказательством двойственности световоспринимающей системы глаза человека может служить наличие двух ветвей кривых, характеризующих различные функции зрения. Так, например, на кривых, характеризующих темновую адаптацию (рис. 1-17) для центрального расположения объекта наблюдения, наиболее рельефно видны две ветви для пятен большого углового размера ($\alpha \geqslant 5°$). Из этого вывода следует, что кривые темновой адаптации имеют явно выраженные две ветви для тех участков сетчатой оболочки, которые содержат и палочки и колбочки. Начальная ветвь адаптационной кривой со сравнительно небольшим уменьшением пороговой яркости в процессе адаптации, характеризует адаптационный процесс в колбочковом аппарате, так как она свойственна центральной ямке сетчатки, практически не содержащей палочек. Вторая ветвь адаптационной кривой, характеризуемая бо́льшим диапазоном изменения пороговой яркости, соответствует адаптации палочкового аппарата ночного зрения, так как эта ветвь кривой наблюдается лишь при больших размерах объекта, изображение которого на сетчатой оболочке охватывает зону максимальной концентрации палочек. Эти выводы, вытекающие из анализа хода кривых темновой адаптации, полностью подтверждаются сопоставлением результатов исследования темновой адаптации лиц, страдающих ночной слепотой[1], и лиц с нормальным зрением. Это сопоставление наглядно показывает несравненно меньшие изменения чувствительности зрительного анализатора у лиц с ночной слепотой.

Характерное различие палочкового и колбочкового аппаратов наглядно видно из графиков остроты различения в функции яркости поля зрения для разноцветных излучений (рис. 1-18). Совпадение кривых остроты различения в области больших яркостей характерно для колбочкового аппарата, так как его спектральная чувствительность положена в основу построения световых величин. Наглядное влияние эффекта Пуркинье (ч. 1, § 1-38) в области малых яркостей характеризует принадлежность серии кривых в зоне малых яркостей палочковому аппарату.

Приведенные примеры достоверно подтверждают наличие двух световоспринимающих аппаратов зрительного анализатора, первый из которых — колбочковый функционирует преимущественно при дневном освещении $B \geqslant 10$ *нт* и второй — палочковый, функционирующий преимущественно при ночном освещении $B \leqslant 0{,}01$ *нт*. Различные диапазоны яркости, в которых преимущественно работают палочки и колбочки, определяют их различие по чувствительности, которая у палочкового аппарата на 2—3 порядка выше чувствительности колбочкового аппарата (рис. 1-17), а также по способности различать детали в условиях дневного зрения, в сотни раз более мелкие, чем в условиях палочкового зрения. Значительно бо́льшая разрешающая способность колбочкового зрения по сравнению с палочковым определяется главным образом значительно меньшими размерами рецепторных полей колбочкового световоспринимающего аппарата, в особенности в центральной ямке сетчатой оболочки.

Иррадиация. При рассмотрении светлых предметов на темном фоне, так же как и темных на светлом фоне, зрительная оценка размеров рассматриваемых предметов бывает несколько преувеличена или преуменьшена. Предметы, яркость поверхности которых значительно больше яркости фона, всегда воспринимаются зрительно несколько большими. Наоборот, черные предметы на светлом фоне кажутся меньше своих действи-

[1] Ночная (куриная) слепота объясняется отсутствием палочкового аппарата или резким ослаблением его деятельности, например при авитаминозе.

тельных размеров. Явление зрительного преувеличения размеров ярких предметов на темном фоне и преуменьшения размеров темных предметов на светлом фоне принято называть *иррадиацией*. Основной причиной иррадиации является размытость границ изображения объектов наблюдения на сетчатой оболочке. Границы изображения не бывают резкими вследствие наличия аберрации, дифракции и рассеяния в глазных средах. Ширина полосы перехода от большей освещенности сетчатки в зоне изображения светлого объекта к меньшей освещенности в зоне темного фона зависит от яркостного контраста объекта наблюдения с фоном.

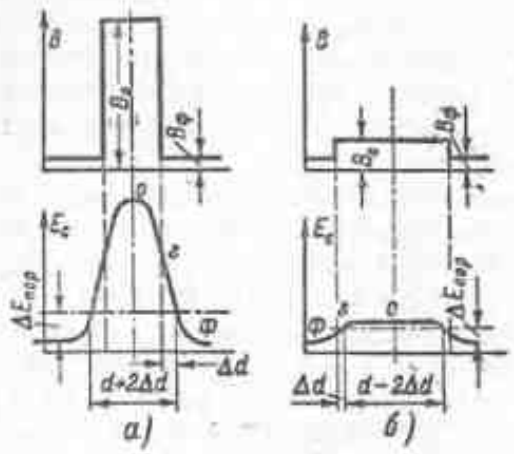


Рис. 1-19.

Для установления закономерностей явления иррадиации рассмотрим схему этого процесса на примере различения светлого объекта на темном фоне при большом и малом контрастах (рис. 1-19). При большом контрасте яркости (рис. 1-19,*а*) кривая *огф*, изображающая распределение освещенности по сетчатой оболочке глаза вблизи границы оптического изображения *г*, характеризуется широкой полосой перехода от $E_ф$ до $E_о$. При

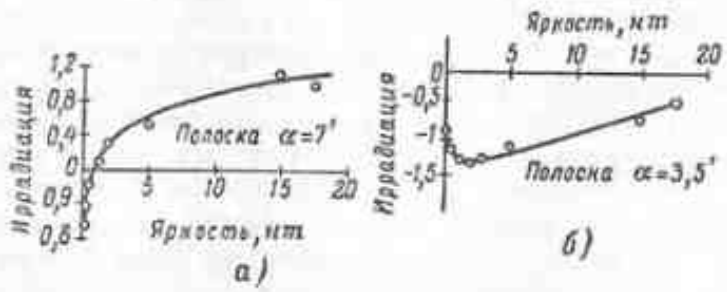


Рис. 1-20.

таких условиях распределения освещенности по сетчатой оболочке граница светлого объекта смещается в сторону фона *ф*, так как ордината кривой, отличающаяся от освещенности в зоне фона на пороговую величину $\Delta E_{пор}$ расположена за пределами оптического изображения объекта. В этом случае, называемом *положительной иррадиацией*, зрительно кажущаяся ширина светлого прямоугольника увеличится на $2\Delta d$. В том случае, когда ордината кривой освещенности $E_г = E_ф + \Delta E_{пор}$ будет расположена внутри контура изображения, зрительно оцениваемый размер объекта будет меньше действительного (рис. 1-19,*б*), что обычно имеет место при малом контрасте объекта с фоном. Такой случай иррадиации, когда светлый объект зрительно воспринимается с меньшими размерами, назван *отрицательной иррадиацией*.

Рассмотренные примеры иррадиации позволяют сделать вывод о росте иррадиации при увеличении яркости светлого объекта на черном фоне, что вполне подтверждается [Л. 9] результатами эксперимента (рис. 1-20,*а* и *б*). Иррадиация светлых объектов с малыми размерами при увеличении яркости объекта проходит через минимум (рис. 1-20,*б*), чем следует объяснить уменьшение кажущегося контраста объекта с фоном для некоторого соотношения яркостей объекта и фона.

В заключение следует указать, что в основе процесса иррадиации лежат не только оптические несовершенства глаза, но также и индукция возбуждения смежных рецепторных полей (§ 1-13).

1-4. Биоэлектрические процессы

Биотоки. Возникновение электрических процессов в живых тканях было впервые обнаружено итальянским ученым Л. Гальвани (1737—1798), изучавшим электрические явления в организме животных [Л. 20]. Опыты Гальвани показали наличие в живых тканях разности потенциалов, определяющей реакцию мышечных и нервных волокон.

Работами русского физиолога В. Ю. Чаговца (1873—1941), американского физиолога Д. Лёбба (1864—1924) и немецкого физика В. Нернста (1864—1941) было установлено, что причиной возникновения биоэлектрических потенциалов является концентрация ионов, обусловленная процессами обмена веществ в живом организме [Л. 21]. Ионная теория возбуждения получила свое завершение в работах акад. П. П. Лазарева (1878—1942), впервые применившего ее к анализу процессов, протекающих в органах чувств, в частности к анализу зрительных процессов [Л. 22].

Согласно ионной теории возбуждения действие излучения начинается с фотодиссоциации молекул фотореагентов (ч. 1, § 3-22). Концентрация отрицательных ионов продуктов распада молекул фотореагента в первом синапсе волокна зрительного нерва, связанного с реагирующей светочувствительной клеткой, приводит к перераспределению биопотенциалов сетчатой оболочки. При достижении пороговой концентрации ионов возбуждение волокна зрительного нерва распространяется со скоростью до 100 $м \cdot сек^{-1}$ по направлению к коре головного мозга.

Экспериментальное определение пороговой концентрации ионов впервые было осуществлено акад. С. И. Вавиловым мето-

дом зрительной регистрации квантовой флуктуации излучения (ч. 1, § 2-16). Исследования зрительных порогов методом флуктуации, проведенные Н. И. Пинегиным [Л. 23], показали зависимость (рис. 1-21) порогового числа фотонов от углового размера объекта наблюдения (вспышки). Рост порогового числа фотонов при увеличении углового размера вспышки более заметен для колбочкового зрения, что следует объяснить большей индивидуализацией связи колбочек с центральным звеном зрительного анализатора.

Исследования Н. И. Пинегина показали, что пороговое число фотонов для палочкового и колбочкового световоспринимающих аппаратов одинаково $n_{пор}=2$ при возбуждении анализатора вспышками с угловыми размерами $\alpha=0{,}5'$. Сопоставление порогового числа фотонов однородных излучений с различными длинами волн показали, что оно не зависит от длины волны на участке спектра 0,405—0,700 *мк* ни для палочкового, ни для колбочкового аппаратов.

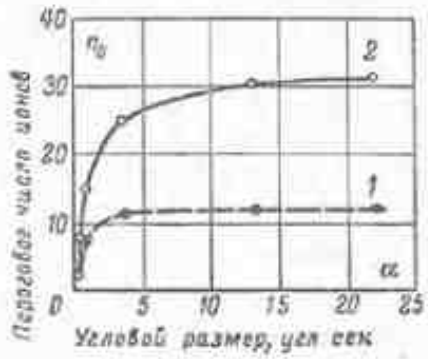


Рис. 1-21.

1 — периферическое палочковое зрение; *2* — колбочковое центральное зрение.

Распространение возбуждения по волокнам зрительного нерва осуществляется в виде электрической волны. Эту волну возбуждения следует рассматривать как некоторый электрический разряд, часто называемый *импульсом тока действия*[1]. Амплитуда импульсов тока действия, как показывает опыт, не зависит от уровня возбуждения, определяющего лишь частоту импульсов. Как было показано ранее (ч. 1, § 3-22), частота импульсов тока действия определяется освещенностью сетчатки, концентрацией молекул фотореагента и чувствительностью центрального звена анализатора. Возникновение импульсов и распространение их по волокнам зрительного нерва, как было показано ранее (ч. 1, § 3-22), отстает от момента появления света в поле зрения наблюдателя (*латентный период*). Длительность латентного периода, определяемая лабильностью центральной части зрительного анализатора, зависит от уровня возбуждения, сокращаясь с ростом яркости.

Исследования частоты импульсов тока действия в отдельных волокнах зрительного нерва лягушки, проведенные Хартлайном [Л. 24], позволили установить наличие трех типов реакции:

а) реакция типа А (рис. 1-22,*а*), возникающая после латентного периода и продолжающаяся в течение всего времени действия излучения на зрительные рецепторы;

б) реакция типа В (рис. 1-22,*b*), возникающая лишь после включения и выключения света;

в) реакция типа С (рис. 1-22,*c*), возникающая лишь после выключения света.

Эти исследования позволили Хартлайну высказать соображения о наличии трех разновидностей зрительных рецепторов, реагирующих по типовым схемам А, В и С. Совокупность реакций рецепторов всех трех разновидностей определяет общую картину распространения возбуждения по зрительному нерву.

Вследствие того, что увеличение частоты импульсов определяется ростом числа ионов распада молекул фотореагентов в единицу времени, следует ожидать изменения потенциала сетчатой оболочки в процессе зрительной работы. Опытом установлена характерная форма кривой изменения потенциала сетчатки, называемой *электроретинограммой* — ЭРГ [Л. 25, 26]. ЭРГ, возникающая в результате возбуждения глаза вспышкой света любой длительности и яркости, имеет четыре характерных зубца: *a*, *b*, *c* и *d* (рис. 1-23). В настоящее время имеется несколько гипотез, объясняющих происхождение зубцов ЭРГ. Наиболее достоверной является гипотеза проф. А. В. Лебединского, рассматривающего ЭРГ состоящей из трех компонентов (рис. 1-24). Каждый компонент ЭРГ, по гипотезе Лебединского, выражает процессы возбуждения и торможения[1] трех разновидностей систем зрительных рецепторов: системы А, реагирующей в течение всего времени зрительного возбуждения; системы В, реагирующей лишь на появление и исчезновение световой вспышки; а также системы С, положительно реагирующей лишь только на исчезновение и тормозящейся во время действия света на глаз.

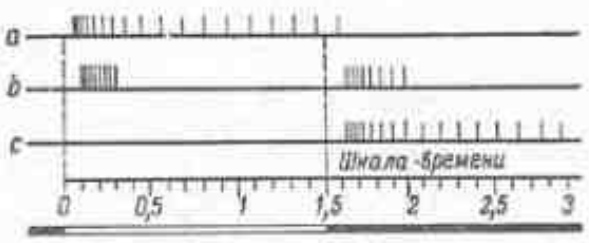


Рис. 1-22.

Опыты над лицами, у которых искусственно понижена лабильность центров или нарушены нервные связи между центром и периферией, показывают существенное изменение формы и масштаба ЭРГ. Это позволяет сделать вывод, что ЭРГ, так же как и частота импульсов тока действия, определяется не только процессами, протекающими в сетчатке, но также и процессами жизнедеятельности центров. Из этого вывода следует, что зри-

[1] Импульс тока действия некоторые исследователи [Л. 10] называют *нейроквантом*.

[1] Процессы торможения изображены на графике каждого компонента ЭРГ (рис. 1-24) волнами в отрицательной области координат.

тельный процесс необходимо рассматривать с обязательным учетом взаимодействия центра и периферии зрительного анализатора, даже в начальной фазе, развивающейся в зрительных рецепторах. Это взаимодействие определяется процессами обмена веществ, неизменно проходящими в любом живом организме. Следует предполагать, что энергия обмена веществ, выделяющаяся дополнительно к энергии поглощенного излучения, принимает существенное участие в процессе возникновения биопотенциалов сетчатой оболочки глаза.

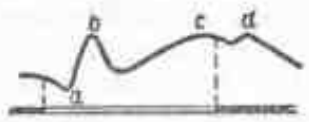


Рис. 1-23.

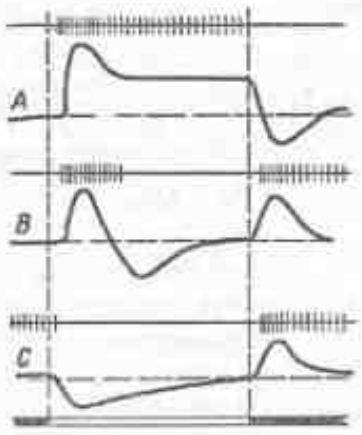


Рис. 1-24.

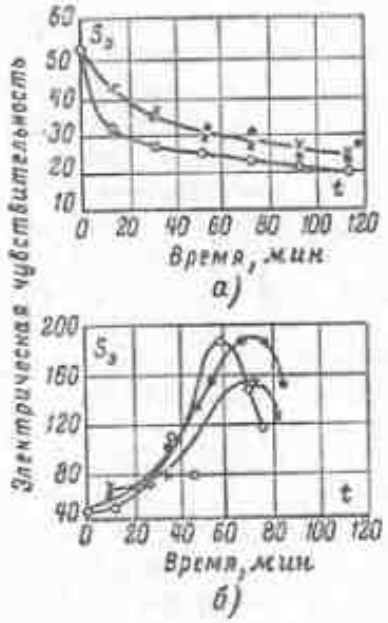


Рис. 1-25.
а—темновая адаптация; *б*—световая адаптация.

Электрическая чувствительность анализатора. Так как возникновение возбуждения в любом нервном волокне связано с распространением вдоль него электрического импульса, следует предполагать возможность возбуждения любого анализатора, в том числе и зрительного, электрическим током. Впервые возбуждение зрительного анализатора электрическим током разряда конденсатора наблюдал в 1755 г. французский физиолог Леруа. Возбуждение зрительного анализатора электрическим током осуществляется с помощью двух электродов, один из которых накладывается на висок или веко, а второй на шею или запястье руки. При пропускании через эти электроды постоянного электрического тока возникает ощущение света при замыкании и размыкании цепи. Ощущение света возникает лишь в том случае, когда ток, протекающий по волокнам зрительного нерва, будет превышать пороговое значение.

Величина, обратная пороговому значению тока, при котором наблюдатель впервые (с определенной вероятностью) обнаружит вспышку, называемую *электрическим фосфеном*, определяет *электрическую чувствительность зрительного анализатора*. Исследование электрического фосфена в условиях темновой и световой адаптации показывает снижение электрической чувствительности в темноте и повышение на свету (рис. 1-25).

Аналогичную картину изменения электрической чувствительности удалось наблюдать в условиях темновой и световой адаптации при наложении электродов на мозговое вещество или на грануляционную поверхность раны [Л. 28], что позволило сделать вывод о центральном происхождении процессов, определяющих изменение электрической чувствительности зрительного анализатора. Этот вывод подтверждается изменением электрической чувствительности одного глаза при световом воздействии на другой, а также качественно противоположным ходом изменения электрической и световой чувствительности в адаптационных процессах.

Прямым доказательством роли центров в электрической чувствительности зрительного анализатора является торможение рефлекторной деятельности человека и высших животных, наблюдаемое параллельно со снижением электрической чувствительности в процессе темновой адаптации. Центральное происхождение процессов, определяющих электрическую чувствительность, позволило использовать метод измерения ее порогов для контроля реакций центрального звена зрительного анализатора в различных условиях зрительной работы.

УСТАНОВИВШИЙСЯ ЗРИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

1-5. Характеристики зрительного процесса

Чувствительность зрительного анализатора. Зрительные ощущения, возникающие у человека в результате действия видимого излучения на его зрительный анализатор, позволяют судить о яркости и цветности излучения, о форме тел, излучающих или отражающих свет, о их движении и взаимном расположении. Большое количество функций зрительного анализатора заставляет подходить в оценке его работы с различных точек зрения. Для суждения о способности человека видеть излучения различного спектрального состава необходимо оценить чувствительность зрительного анализатора к однородным излучениям различных длин волн. Как известно (ч. 1, § 1-24), *спектральная чувствительность* любого приемника, в том числе и такого сложного, как зрительный анализатор человека, определяется отношением однородных потоков: эффективного и лучистого. Величина этого отношения зависит от выбора единиц эффективного потока. Принимая в соответствии с ГОСТ 7932-56 в качестве единицы светового потока люмен (*лм*), получим спектральную чувствительность для однородного излу-

чения с длиной волны $\lambda=0{,}555$ *мк*, равную 683 *лм·вт*$^{-1}$. Это условное значение спектральной чувствительности зрительного анализатора[1] является максимальным потому, что участок спектра равноинтенсивного излучения в зоне длины волны $\lambda=0{,}555$ *мк* имеет максимальную светлоту.

Вследствие условности численного значения $g_{\lambda=0{,}555}$ наибольший интерес представляет относительная спектральная чувствительность зрительного анализатора, определяемая отношением лучистых яркостей двух однородных излучений (с длиной волны $\lambda=0{,}555$ *мк* и исследуемого с длиной волны λ), обеспечивающих одинаковую светлоту:

$$K(\lambda)=\frac{B_{\lambda=0{,}555}}{B_\lambda}. \qquad (1\text{-}14)$$

Это условие, определяемое (1-14), положено в основу всех методов измерения спектральной чувствительности зрительного анализатора.

Не менее важной характеристикой зрительного анализатора является его *интегральная световая чувствительность*. Ранее было показано (ч. 1, § 1-34), что ощущение светлоты излучающей поверхности определяется ее яркостью по направлению к входному зрачку глаза наблюдателя. Это свойство яркости позволяет использозать яркость для определения светового порога и световой чувствительности. *Пороговой яркостью* (световым порогом) принято считать минимальную яркость светового пятна, обеспечивающую возможность впервые обнаружить с достаточной вероятностью это пятно на фоне с яркостью, практически равной нулю. Величина, обратная пороговой яркости светового пятна с угловым размером $\alpha\geqslant 50'$, определяет абсолютную световую чувствительность зрительного анализатора. Как показывают результаты исследования, увеличение размера тест-объекта сверх $\alpha=50'$ не приводит к снижению пороговой яркости (§ 1-7).

Из приведенного определения следует, что измерение абсолютной световой чувствительности зрительного анализатора сводится к измерению пороговой яркости пятна с угловым размером $\alpha\geqslant 50'$, называемой *абсолютным световым порогом*. Световой порог точечных излучателей с угловым размером $\alpha\leqslant 15'$ принято характеризовать *пороговой освещенностью зрачка* наблюдателя, создаваемой точечным источником света, впервые обнаруживаемым с достаточной вероятностью на фоне с яркостью, близкой к нулю. Пороговую освещенность зрачка

[1] Условность количественного значения $g_{\lambda=0{,}555}=683$ *лм·вт*$^{-1}$ определяется условностью выбора единицы светового потока. Принципы расчета максимального значения спектральной чувствительности зрительного анализатора приведены в § 1-6.

наблюдателя принято называть *пороговым блеском* точечного источника света. Вследствие того, что максимум световой чувствительности определяется наибольшей концентрацией молекул родопсина в палочках, измерение световых порогов следует производить в условиях полной темновой адаптации (§ 1-11).

Для возможности определения формы предметов, изображение которых падает на сетчатую оболочку глаза, а также определения их взаимного расположения в поле зрения зрительный анализатор должен обладать способностью обнаруживать различие яркостей и цветностей смежных участков поля зрения, различать отдельные детали предмета, определяющие его форму, а также устанавливать разницу расстояний между двумя смежными предметами.

Для характеристики способности зрительного анализатора различать два участка поля зрения по яркости вводят понятие о *пороговой разности яркости*, определяемой минимальной разностью яркости двух смежных участков поля зрения наблюдателя, обеспечивающей в условиях оптического контакта обнаружение неравенства яркостей с достаточной (заданной) вероятностью. Отношение пороговой разности яркости к яркости фона называют *пороговым контрастом яркости* объекта наблюдения с фоном.

Величину, обратную минимальному пороговому контрасту яркости, численно равному пороговому контрасту пятна с угловым размером 50°*, принято называть *контрастной чувствительностью*. Контрастная чувствительность, характеризующая способность зрительного анализатора обнаруживать малые различия яркости, определяется

$$S_к=\frac{1}{\xi}, \qquad (1\text{-}15)$$

где $\xi=(k_{пор})_{мин}=\left(\frac{\Delta B_{пор}}{B}\right)_{\alpha\geqslant 50'}$ — минимальный для заданной яркости пороговый контраст;

$\Delta B_{пор}$ — пороговая разность яркости двух смежных полей.

Способность зрительного анализатора различать форму предмета или его деталей, называемая *остротой различения*, численно выражается величиной, обратной *минимальному разрешаемому углу*:

$$S_\alpha=\frac{1}{\alpha_{пор}}, \qquad (1\text{-}16)$$

* Угловой размер объекта наблюдения, определяющий минимум порогового контраста яркости, зависит от уровня яркости адаптации. Он максимален для малых уровней яркости $B_\Phi\approx 0$ и равен примерно 50°. Для яркости $B_\Phi\geqslant 10$ *нт* угловой размер пятна с минимальным пороговым контрастом уменьшается до 1—2°.

где $\alpha_{пор}$ — минимальный разрешаемый угол, определяемый наименьшим угловым размером деталей объекта наблюдения, раздельно различаемых с достаточной (заданной) вероятностью, *угл. мин.*

Способность зрительного опознавания цветности в пороговых условиях принято характеризовать *порогом цветоощущения.* Порог цветоощущения точечных излучателей определяется минимальной освещенностью зрачка глаза, при которой наблюдатель опознает с достаточной вероятностью цветность излучения на фоне $B \approx 0$. Для тест-объектов конечных размеров порог цветоощущения определяется яркостью, обеспечивающей заданный уровень вероятности опознавания цветности.

Способность зрительного различения цветовых оттенков двух смежных участков поля зрения характеризуется *цветоразличительной чувствительностью*[1] зрительного анализатора, определяемой величиной, обратной *порогу цветоразличения (цветовому порогу).* Цветовой порог принято оценивать наименьшей, впервые различаемой с достаточной заданной вероятностью разностью цветности оптически смежных участков центральной части поля зрения наблюдателя.

Для характеристики точности зрительного обнаружения разноудаленности двух предметов, наблюдаемых бинокулярно, пользуются понятием *порога глубинного (стереоскопического) зрения.*

Этот порог принято определять разностью $\Delta\theta_{пор}$ параллактических углов переднего θ_1 и заднего θ_2 предметов, наблюдаемых с достаточной (заданной) достоверностью разноудаленными (рис. 1-26). С достаточной для практики точностью

$$\theta_1 = \frac{b}{2L} \text{ и } \theta_2 = \frac{b}{2(L+\Delta L)},$$

следовательно,

$$\Delta\theta_{пор} = \frac{b\Delta L_{пор}}{2(L^2 + L\Delta L_{пор})} \approx \frac{b\Delta L_{пор}}{2L^2}. \qquad (1\text{-}17)$$

Переводя из радианного исчисления в секундное угловое, получим:

$$\delta_{пор} \approx \frac{b\Delta L_{пор}}{L^2} \cdot 10^5, \qquad (1\text{-}17а)$$

где $\delta_{пор}$ — порог глубинного зрения, *угл. сек.*

[1] Цветоразличительную чувствительность зрительного анализатора иногда называют *остротой цветоразличения* [Л. 99].

Величину, обратную порогу, принято называть остротой глубинного (стереоскопического) зрения:

$$S_\delta = \frac{1}{\delta_{пор}} \ [угл.\ сек^{-1}]. \qquad (1\text{-}18)$$

Для оценки скорости реакции зрительного анализатора вводят понятие о *быстроте различения,* определяемой величиной, обратной минимальному времени различения, обеспечивающему достаточную (заданную) вероятность различения формы предмета или его деталей.

Все перечисленные характеристики предназначены для оценки основных функций деятельности зрительного анализатора, вследствие чего их часто называют *основными функциями зрения.*

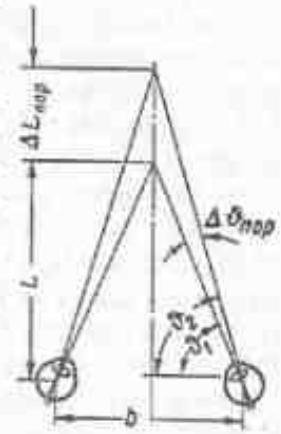


Рис. 1-26.

Установившиеся и неустановившиеся состояния зрительного анализатора. Преобразование излучения в зрительное ощущение является сложным процессом, протекающим в живом организме с высокоорганизованной нервной системой, которой свойственны взаимосвязи между отдельными ее звеньями. Этот сложный процесс состоит из ряда этапов (ч. 1, § 1-27), каждый из которых обладает конечной длительностью. Так, например, конечна скорость распространения возбуждения по волокну зрительного нерва; конечно время, необходимое для концентрации порогового числа ионов в светочувствительной клетке; очень мало, но конечно время пребывания в возбужденном состоянии молекулы фотореагента и т. д. Конечная длительность элементарных актов преобразования излучения в ощущение определяет *инерционность зрительного анализатора.*

Инерционность анализатора во всех его звеньях приводит к некоторому запаздыванию возникновения ощущения, постепенному его развитию и затуханию. Длительность промежутка времени от начала действия излучения до момента возникновения зрительного ощущения — *латентный период* — зависит от уровня возбуждения зрительного анализатора, следовательно, от яркости действующего на глаз излучения. Уровень возбуждения также определяет длительность и ход затухания зрительного ощущения после прекращения действия излучения на глаз. Все это позволяет сделать вывод, что временные характеристики зрительного процесса определяются не только конечной длительностью всех звеньев преобразования и ходом их развития во времени, но также и изменением чувствительности

анализатора при переходе с одного уровня возбуждения на другой.

Изменение чувствительности периферии и центра зрительного анализатора в процессе перехода от одного уровня его возбуждения на другой принято называть *адаптацией*. Инерционные свойства зрительного анализатора и его способность к адаптации приводят к неустановившимся состояниям анализатора, возникающим при изменении уровня его возбуждения. Неустановившиеся состояния зрительного анализатора характеризуются непрерывным изменением соотношения между яркостью B_i излучения, действующего на глаз, в исследуемый момент времени и уровнем зрительного ощущения — светлотой S_i.

Светлота, количественно характеризующая зрительное ощущение заданного излучения, определяется его яркостью, так как освещенность сетчатки в зоне изображения зависит от яркости зрительно оцениваемого излучения (§ 1-2). В условиях сумеречного и ночного зрения светлота излучения любого спектрального состава однозначно определяется эквивалентной яркостью согласно ее определению (ч. 1, § 1-38). Сложность взаимосвязи всех звеньев зрительного анализатора в процессе преобразования излучения в зрительное ощущение приводит к сложной нелинейной зависимости между светлотой и яркостью даже в условиях установившегося зрительного процесса. Особенно сложна эта зависимость в неустановившихся процессах. Непрерывное изменение соотношения между яркостью и светлотой в неустановившихся фазах зрительного процесса происходит в результате возникновения и развития следующих переходных явлений:

а) постепенного развития зрительного ощущения яркости B_a в результате конечной длительности всех этапов его возникновения (диссоциация молекул фотореагента, концентрация отрицательных ионов, распространение возбуждения по волокну зрительного нерва и пр.);

б) последействия ионов распада молекул фотореагента, находящихся в зрительных клетках в момент окончания действия предшествующего раздражителя;

в) изменения чувствительности зрительного анализатора при смене уровня возбуждения от $B_{п.а}$ до B_a.

Стабильное соотношение между уровнями возбуждения и ощущения, определяемое однозначным соответствием яркости B_a и вызываемой ею светлоты S_a, устанавливается лишь после стабилизации зрительного процесса. Из этого следует, что *установившийся зрительный процесс*, характеризуемый соответствием яркости адаптации B_a и вызываемого ею ощущения

светлоты S_a определяется полным завершением всех трех разновидностей переходных процессов. Неустановившийся зрительный процесс определяется переменным соотношением яркости и светлоты вследствие непрерывных изменений фаз переходных процессов зрительного ощущения. Длительность переходных процессов зависит в основном от соотношений уровней яркости предшествующего $B_{п.а}$ и последующего B_a излучений, а также временем действия предадаптационного излучения с яркостью $B_{п.в}$.

Вследствие того что в обычных условиях работы зрительного анализатора при наличии неравномерного распределения яркости, а также при кратковременных появлениях объектов различения в поле зрения наблюдателя неизбежны достаточно частые смены уровней возбуждения, изучение закономерностей неустановившегося зрительного процесса представляет большой практический интерес. Вполне понятно, что эти закономерности значительно сложнее закономерностей установившихся зрительных процессов.

Методы измерения зрительных порогов. Вследствие возможности индивидуального различия зрительных порогов у разных людей определение средних значений пороговых величин принято проводить несколькими наблюдателями. Число наблюдателей должно быть не менее двух-трех, достигая в отдельных наиболее ответственных измерениях нескольких десятков человек.

Измерительная установка должна обеспечивать возможность широкой, плавной вариации параметра, пороговая величина которого измеряется, а также тех переменных параметров (яркость, контраст яркости, цветность, размер объекта наблюдения и пр.), в функции которых измеряется зрительный порог. Дискретная вариация измеряемого параметра допустима лишь при применении *статистических методов определения* порога. Кроме статистических методов измерения зрительных порогов, определяющих вероятность обнаружения или различения *тест-объектов*[1], существует группа методов непосредственного измерения.

Вероятностью зрительного обнаружения или различения принято считать числовую характеристику, определяющую степень возможности обнаружить предъявляемый наблюдателю тест-объект или различить его форму. Вероятность p равна отношению n — числа случаев обнаружения или различения объ-

[1] Тест-объектами принято называть предметы или искусственные, обычно плоские, равнояркие пятна (диск, прямоугольник, две полоски, кольцо с разрывом и пр.), используемые в качестве объектов наблюдения при пороговых измерениях.

екта к общему N — числу попыток различить или обнаружить предъявляемый наблюдателю объект:

$$p = \frac{n}{N}. \tag{1-19}$$

Из приведенного (1-19) следует:

а) обнаружение или различение является полностью достоверным при $n=N$, следовательно, при $p=1$;

б) обнаружение или различение является невозможным при $n=0$, следовательно, при $p=0$;

в) обнаружение или различение является возможным, когда оно частично достоверно, т. е. при $0<p<1$, следовательно, при $0<n<N$.

Обнаружение или различение принято считать практически достоверным при $p \geqslant 0{,}99$ и практически невозможным при $p \leqslant 0{,}01$.

Для уменьшения роли случайностей при измерениях необходимо принимать для каждого наблюдателя N достаточно большим, так как его увеличение приближает среднее значение результатов измерений к наиболее вероятному значению измеряемой величины.

Все попытки различения или обнаружения должны быть равновозможными, следовательно, одинаковыми по светотехническим критериям и состоянию наблюдателей. При измерении порогов зрительного обнаружения или различения неизбежны отклонения от наиболее вероятного значения измеряемой величины. Эти отклонения определяются случайными погрешностями измерения, флуктуациями излучения (ч. 1, § 2-16), флуктуациями поглощения фотонов молекулами фотореагента и другими случайными явлениями.

Несмотря на неизбежность случайных отклонений при измерениях, приводящих в нашем случае к различным результатам определения зрительных порогов одним и тем же наблюдателем в совершенно одинаковых условиях, можно предполагать, что существуют практически достоверное B' и практически невозможное B'' значения измеряемого порога [1]. Все результаты непосредственного измерения исследуемой величины должны лежать в интервале между B' и B''.

Непосредственные измерения зрительных порогов можно проводить различными способами, плавно увеличивая или уменьшая измеряемую величину:

а) непрерывно увеличивая от B'' до момента обнаружения или различения объекта наблюдения (*порог на появление* $B_п$);

[1] Дальнейшая математическая запись основных положений методики пороговых измерений ведется применительно к измерению пороговой яркости.

б) непрерывно уменьшая от B' до момента исчезновения объекта наблюдения или потери возможности различения его деталей и формы (*порог на исчезновение* $B_и$);

в) непрерывно увеличивая от B'' до момента обнаружения или различения, затем уменьшая от порога на появление $B_п$ до порога на исчезновение $B_и$ [*средний порог* $B_с = 0{,}5(B_п + B_и)$].

Значение зрительного порога можно получить как некоторое среднее из N измерений. Обычно среднее значение зрительного порога принято рассчитывать как одну из следующих средних величин:

а) средняя арифметическая

$$\overline{B}_{пор} = \frac{B_1 + B_2 + \ldots + B_N}{N} = \sum_1^N p_i B_i; \tag{1-20}$$

а) средняя квадратичная

$$\overline{B}_{пор} = \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2 + \ldots + B_N^2}{N}} = \sqrt{\sum_1^N p_i B_i^2}; \tag{1-20а}$$

в) средняя геометрическая

$$\overline{B}_{пор} = \sqrt[N]{B_1 B_2 \ldots B_N} = B_1^{p_1} B_2^{p_2} \ldots B_N^{p_n}, \tag{1-20б}$$

где $B_1 \ldots B_N$ — результаты измерения пороговой величины;

$p_i = \frac{n_i}{N}$ — вероятность отклонения измеряемой величины от среднего порогового ее значения на величину $B_i - B_{пор}$;

n_i — число повторяющихся результатов измерения B_i из общего числа N измерений.

Среднее значение из всех результатов измерения зрительного порога определяет его лишь в первом приближении, так как при одинаковых средних значениях измеряемой величины возможны различные пределы $B' - B''$, следовательно, различные вероятности определения одних и тех же величин. Для более точного измерения порогов следует пользоваться статистическими методами, позволяющими определить зрительный порог с гарантированной вероятностью обнаружения или различения определяемой пороговой величины. Обычно зрительные пороги определяются из условий обеспечения вероятности обнаружения или различения $p = 0{,}5$ или $p = 0{,}75$. Определение зрительного порога с гарантированной вероятностью обнаружения или различения требует знания функции *распределения вероятности обнаружения* $p_i = f(B_i)$ в заданных условиях. Точное определение этой

функции по результатам эксперимента практически невыполнимо вследствие огромной трудоемкости, так как каждая точка кривой требует нескольких десятков единичных измерений. Для упрощения решения этой задачи принято пользоваться нормальной функцией распределения вероятностей любых случайных величин[1]. Нормальную функцию распределения вероятностей впервые сформулировал К. Гаусс (1777—1855):

$$p(B_i - \bar{B}_{пор}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(B_i - \bar{B}_{пор})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\vartheta B_i^2}{2\sigma^2}}, \quad (1\text{-}21)$$

где $\sigma^2 = (B_i - \bar{B}_{пор})^2$ — дисперсия измеряемой величины, численно равная ее квадратичной флуктуации (ч. 1, § 2-14);

p — вероятность обнаружения пороговой величины;

$\vartheta B_i = (B_i - \bar{B}_{пор})$ — величина отклонения измеряемой величины от среднего значения.

Согласно уравнению Гаусса (1-21) вероятность нулевой погрешности измерения $B_{пор}$, следовательно, и нулевого отклонения от среднего значения измеряемой величины $\delta = 0$ определится как

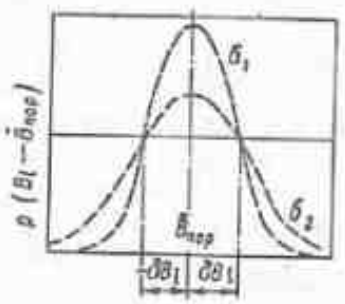


Рис. 1-27.



Рис. 1-28.

$$p_{\delta=0} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (1\text{-}22)$$

Нетрудно видеть (рис. 1-27), что это значение вероятности максимально из всех возможных, вследствие чего оно характеризует точность результатов измерения порога. Этот вывод показывает, что уменьшение дисперсии измеряемой величины приводит к сокращению ширины интервала $B'-B''$, определяющей форму кривой $p(B_i - \bar{B}_{пор})$. Следовательно, дисперсия определяет форму кривой интегральной вероятности обнаружения $p = f(B_{пор})$.

[1] Величин, при измерении которых различие результатов определяется неизбежным наличием случайных ошибок.

Для определения вероятности обнаружения любой заданной яркости B как пороговой необходимо суммировать значения вероятностей $p(B_i - \bar{B}_{пор})$ для всех значений яркости $B_i \leqslant B$. Это суммирование соответствует интегрированию функции Гаусса в пределах от 0 до заданного значения B:

$$p(\gamma) = \int_{B_i=0}^{B_i=B} p(B_i - \bar{B}_{пор})\, dB_i =$$

$$= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^B e^{-\frac{\vartheta B_i^2}{2\sigma^2}} dB = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^\gamma e^{-\gamma^2} d\gamma, \quad (1\text{-}23)$$

где $\gamma = \frac{\delta B}{\sigma\sqrt{2}}$ — показатель отклонения пороговой величины от среднего ее значения.

Графическое изображение (рис. 1-28) интегральной функции вероятности $p(\gamma)$ показывает ее симметричность относительно $\gamma = 0$. Этому значению показателя γ соответствует $p = 0{,}5$, что определяется симметрией функции Гаусса относительно среднего значения измеряемой величины, в частности, в нашем случае $\bar{B}_{пор}$ (рис. 1-27). Симметричность функции Гаусса характеризует равную вероятность одинаковых по величине и различных по знаку случайных ошибок измерения.

Определение зрительного порога по заданной вероятности обычно производится способом постоянных уровней возбуждения. Для этой цели выбирают четыре—шесть значений измеряемой величины (уровни возбуждения) вблизи ее предполагаемого порогового значения с положительными и отрицательными значениями δ. Выбранные значения измеряемой величины предъявляются наблюдателям по 50—100 раз каждая в случайном порядке. Наблюдатели фиксируют те предъявления, при которых объект был обнаружен или была определена его форма, цветность или различное удаление тест-объектов от наблюдателя.

По найденным четырем—шести значениям вероятности обнаружения, определяемой уравнением (1-19), подбирается наиболее подходящая по форме кривая интегральной вероятности из семейства кривых, подчиняющихся нормальному закону (1-23). По найденной кривой определяется пороговое значение измеряемой величины, соответствующее заданной вероятности обнаружения.

1-6. Спектральная чувствительность

Измерение спектральной чувствительности зрительного анализатора. В соответствии с (1-14) спектральная чувствительность определяется сравнением светлоты. Измерение спектральной чувствительности колбочкового аппарата (дневное зрение) должно проводиться в условиях достаточно высокой яркости адаптации наблюдения $B \geqslant 10$ *нт* и размера поля зрения, не превышающего 2°*.

Спектральную чувствительность палочкового аппарата (ночное зрение) следует измерять в условиях темновой адаптации $B < 10^{-4}$ *нт* и большого размера поля зрения $\alpha = 30°$, или периферического расположения тест-объекта. Непосредственное сравнение значений светлоты двух смежных участков поля зрения наблюдателя (полей сравнения) возможно производить следующими тремя способами:

а) *Способом постоянного поля сравнения*, осуществляемым в условиях постоянства яркости и спектрального состава одного из двух полей сравнения;

б) *Способом малых ступеней*, при котором длины волн сравниваемых однородных излучений подбираются достаточно близкими друг к другу;

в) *Способом мелькания*, при котором наблюдатель видит поочередно два сравниваемых по светлоте поля сравнения.

При измерении спектральной чувствительности первым способом целесообразно постоянное поле сравнения заполнять таким однородным излучением, чувствительность анализатора к которому близка максимальной. Можно также заполнять постоянное поле сравнения белым излучением с известным спектральным составом. Малая точность сравнения светлоты разноцветных полей в условиях дневного зрения определяет основной недостаток этого метода и позволяет рекомендовать его при измерениях палочковой спектральной чувствительности.

Для устранения этого недостатка в условиях дневного и сумеречного зрения пользуются вторым способом и производят последовательные сравнения светлот однородных излучений с длинами волн λ_1 и λ_2, λ_2 и $\lambda_3, \ldots, \lambda_{i-1}$ и λ_i при малых значениях $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_{\lambda-1}$. Вследствие малости $\Delta\lambda$ поля сравнения лишь незначительно разноцветны, что повышает точность измерения. В этом способе малых ступеней исходное поле сравнения на следующей ступени измерения становится полем измеряемого излучения. Недостаток этого способа заключается

* Решением XIII сессии МКО рекомендовано проводить измерение спектральной чувствительности трех *кэс*-приемников зрительного анализатора для полей размером 10°. Это решение принято для приближения условий измерений к реальным условиям работы глаза.

в возможности накопления ошибок измерения при переходе от одной ступени к другой.

Способ мелькания основан на различии критических частот мелькания цветности и яркости. Из опыта следует, что критическая частота мелькания цветности всегда меньше критической частоты мелькания яркости. Вследствие этого различия каждому уровню яркости полей сравнения соответствует такой интервал частот, при котором последовательное предъявление разноцветных и разноярких излучений зрительно воспринимается как мелькание яркости одноцветных полей сравнения. В этом интервале частот мелькание исчезает при уравнивании светлот полей сравнения.

Измерение спектральной чувствительности зрительного анализатора методом мельканий производится по схеме, приведен-

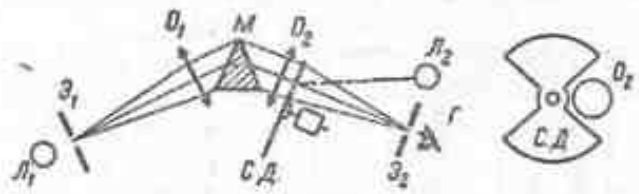


Рис. 1-29.

ной на рис. 1-29. На пути пучка однородных лучей, идущих от монохроматора M к глазу наблюдателя $Г$, устанавливается непрозрачный белый секторный диск $СД$. Число оборотов секторного диска, освещенного лампой сравнения $Л_2$, регулируется до исчезновения различия цветностей поля белого диска и поля исследуемого однородного излучения. Белое поле сравнения наблюдатель видит в те моменты, когда непрозрачная часть сектора пересекает пучок однородного излучения. При отсутствии мелькания цветности последовательно появляющихся полей сравнения мелькание продолжается вследствие различения их яркости. Регулируя яркость исследуемого однородного излучения при постоянстве яркости белого поля секторного диска, обеспечивают полное исчезновение мелькания. Полное отсутствие мелькания в поле зрения наблюдателя будет соответствовать равенству светлот полей сравнения.

Кроме метода непосредственного сравнения светлоты двух излучений, для измерения спектральной чувствительности возможно применение косвенных методов. К числу таких косвенных методов измерения спектральной чувствительности можно отнести:

а) метод светового порога;

б) метод зрительных функций.

Отношение значений спектральной чувствительности зрительного анализатора для двух однородных излучений с дли-

нами волн λ_1 и λ_2 определится по первому из указанных методов величиной обратного отношения пороговых значений лучистых яркостей сравниваемых излучений. Это правило определяется предположением о равенстве светлот пороговых разноспектральных световых раздражителей одинакового углового размера:

$$K_{\lambda_1}(B_{\lambda_1})_{пор} = K_{\lambda_2}(B_{\lambda_2})_{пор}, \qquad (1\text{-}24)$$

где $(B_{\lambda_1})_{пор}$ и $(B_{\lambda_2})_{пор}$ — пороговые лучистые яркости сравниваемых излучений.

Метод световых порогов успешно применяется для измерения спектральной чувствительности в условиях ночного зрения [Л. 28—30]. Измерение спектральной чувствительности колбочкового аппарата этим методом впервые было проведено [Л. 31] путем определения порогов кратковременных вспышек по схеме акад. С. И. Вавилова (часть 1, § 2-15).

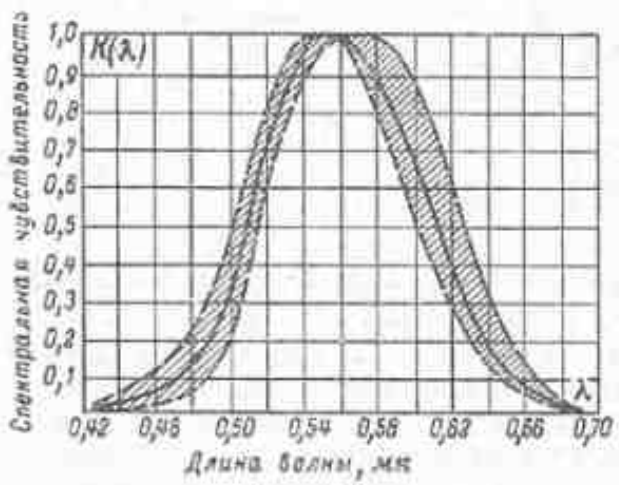


Рис. 1-30.

Второй косвенный метод измерения спектральной чувствительности анализатора основан на принципе измерения значений любой зрительной функции, для которой ясно выражена зависимость ее значения от уровня яркости. Этот метод заключается в определении соотношений лучистых яркостей двух однородных излучений, обеспечивающих одинаковый уровень исследуемой зрительной функции. В качестве исследуемых зрительных функций можно применять критическую частоту мельканий, контрастную чувствительность, остроту различения и др.

Колбочковая и палочковая спектральная чувствительность. Относительные значения колбочковой спектральной чувствительности, называемые *относительной видностью однородного излучения* (ч. 1, § 1-28), были приняты Международной комиссией по освещению (МКО) в 1924 г. В СССР значения относительной видности стандартизованы (ОСТ/ВКС 7637). Функция $K'(\lambda)$, принятая МКО, была получена в результате усреднения результатов измерения спектральной чувствительности Кобленцем и Эмерсоном в 1917 г. [Л. 32], Хэйдом, Форсайтом и Кэди в 1918 г. [Л. 33], а также Джибсоном и Тиндалем в 1923 г. [Л. 34].

Кобленц и Эмерсон проводили измерения спектральной чувствительности у 125 наблюдателей способом мельканий в условиях яркости полей сравнения $B \approx 13{,}5$ *нт*, имеющих размер 2°. Освещение постоянного поля сравнения осуществлялось лампой накаливания. Пределы экстремальных отклонений от среднего принятого МКО значения чувствительности приведены на кривой рис. 1-30.

Хэйд, Форсайт и Кэди измеряли спектральную чувствительность 29 наблюдателей способом малых ступеней. Джибсон и Тиндаль также применяли способ малых ступеней, сравнивая светлоты однородных излучений, отличающихся по длинам волн на 1 *мк* в синей части спектра и на 1,5 *мк* в красной части. Размер поля зрения равнялся 3° и яркость его в средней части спектра достигала 130 *нт*, снижаясь в синей части до 2—3 *нт*. В измерениях участвовали 52 наблюдателя. Средние значения этих трех наиболее полных измерений сопоставлены со значениями колбочковой и палочковой спектральной чувствительности, принятыми МКО в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Спектральная чувствительность зрительного анализатора

Длина волны, мк	Значения относительной спектральной чувствительности зрительного анализатора				
	по Кобленцу и Эмерсону [Л. 32]	по Хэйду, Форсайту и Кэди [Л. 33]	по Гибсону и Тиндалю [Л. 34]	принятые МКО	
				Колбочковая $K(\lambda)$	Палочковая $K'(\lambda)$
0,40	0,010	0,00009	0,0051	0,0004	0,00929
0,42	0,024	0,0041	0,022	0,004	0,0966
0,44	0,033	0,022	0,043	0,023	0,328
0,46	0,056	0,055	0,069	0,060	0,576
0,48	0,125	0,138	0,143	0,139	0,793
0,50	0,316	0,328	0,318	0,323	0,982
0,505	—	—	—	0,407	0,998
0,52	0,71	0,698	0,732	0,710	0,935
0,54	0,954	0,968	0,964	0,954	0,650
0,56	0,998	0,995	0,991	0,995	0,329
0,58	0,898	0,855	0,863	0,870	0,121
0,60	0,687	0,600	0,634	0,631	0,0332
0,62	0,427	0,341	0,389	0,381	0,00737
0,64	0,194	0,154	0,184	0,175	0,00150
0,66	0,0645	0,051	0,0642	0,061	0,000313
0,68	0,0178	0,0125	0,0178	0,017	0,000072
0,70	0,0040	0,0031	0,0045	0,0041	0,000018
0,72	0,00097	0,00074	0,00108	0,00105	0,000005
0,74	0,00028	0,00018	0,00026	0,00025	0,0000014
0,76	—	0,00005	0,00007	0,00006	0,0000004

Измерения колбочковой спектральной чувствительности, проведенные в последние годы [Л. 31, 34], показывают, что принятые

МКО значения видности несколько преуменьшены в коротковолновой части спектра.

Относительные значения видности в условиях ночного зрения были приняты МКО на двенадцатой сессии в 1951 г. Основой функции $K'(\lambda)$ послужили результаты измерения палочковой спектральной чувствительности, проведенные Уивером [Л. 36], Вальтером и Райтом [Л. 37]. Цифровые значения видности ночного зрения, принятые МКО, приведены на рис. 1-31 и в табл. 1. Уивер измерял спектральную чувствительность палочкового зрения у 14 наблюдателей в пределах поля зрения 14°. В опытах Вальтера и Райта принимали участие два наблюдателя. Исследования спектральной чувствительности палочкового зрения, проведенные Н. И. Пинегиным [Л. 38], позволили установить второй максимум кривой в коротковолновой части спектра.

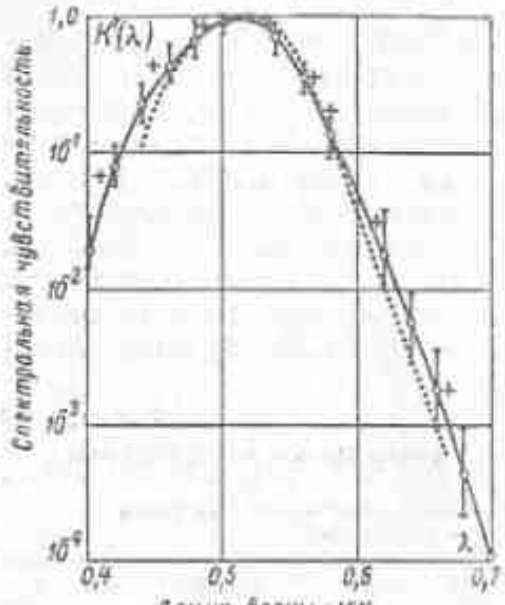


Рис. 1-31.

Этот второй максимум, составляющий 10^{-4} от основного максимума, приходится на область ближнего ультрафиолетового излучения 0,335—0,365 *мк*. Он подтверждается исследованиями Гудив, Литго и Шнейдера, обнаруживших второй максимум поглощения родопсином излучения в этой же области спектра. Существенное отличие кривых спектральной чувствительности палочкового и колбочкового аппаратов определяется различием спектральных функций поглощения молекулами родопсина и иодопсина, а также различием их энергии диссоциации, которая у молекул родопсина несколько больше.

Для удобства пользования стандартной кривой видности излучения в условиях дневного зрения были предложены уравнения, описывающие функцию $K(\lambda)$. Наиболее удачным следует признать уравнение, впервые предложенное в 1904 г. профессором Казанского университета Д. А. Гольдгаммером [Л. 38]:

$$K(\lambda) = A\lambda^{-m_e - n/\lambda}$$

или

$$\lg K(\lambda) = \lg A - m \lg \lambda - 0{,}4343 \frac{n}{\lambda}, \qquad (1\text{-}25)$$

где постоянные, по данным Муна и Спенсер [Л. 39]:

$$\lg A = 32{,}411;\ m = 182{,}191;\ n = 100{,}937.$$

Как уже указывалось ранее, абсолютные значения спектральной чувствительности зрительного анализатора определяются выбором единиц светового потока (ч. 1, § 1-30). Выбирая в качестве этой единицы люмен и определяя его как световой поток, излучаемый абсолютно черным телом с площадью выходного отверстия 0,5305 $мм^2$ при $T = 2042°$ К, можно рассчитать $(V_\lambda)_{макс}$ по уравнению Планка. Лучистый поток в этих условиях ($C = 3{,}74 \times 10^4$ *вт·мк⁴·мк* и $C = 1{,}438 \cdot 10^4$ *мк·град*), излучаемый государственным эталоном, будет равен 0,51 *вт*, что соответствует световой отдаче черного излучения с $T = 2042°$ К, $\eta_{св} = 1{,}96$ *лм·вт⁻¹* и значению $(V_\lambda)_{макс} = 683$ *лм·вт⁻¹*.

Спектральная чувствительность в условиях сумеречного зрения. Спектральная чувствительность зрительного анализатора в условиях совместной работы палочкового и колбочкового световоспринимающих аппаратов ($0{,}01\ нт \leqslant B \leqslant 10\ нт$) определяется совокупностью чувствительностей каждого аппарата, следовательно, зависит от доли участия в зрительном процессе палочек и колбочек. Как известно (ч. 1, § 1-38), равенство светлот в этих условиях определяется равенством эквивалентных яркостей. Широкое использование понятия эквивалентной яркости возможно лишь в том случае, если эта величина, так же как любая световая величина, аддитивна с той точностью, которая необходима для решения светотехнических задач. Аддитивность эквивалентной яркости должна определяться следующими условиями:

а) $kB'_э + kB''_э = kB_э$, если $B'_э + B''_э = B_э$ при любом k;

б) $nB'_э + mB''_э = (n+m)B_э$, если $B'_э = B''_э = B_э$ при любых значениях n и m,

где $B'_э$, $B''_э$ и $B_э$ — эквивалентные яркости излучения с произвольными спектральными составами.

Исследования этих условий, проведенные неоднократно разными авторами [Л. 40, 41], приводят к различным выводам, в основном определяемым принципиальными различиями методов измерения, а не существом исследуемого вопроса, который решается в пользу аддитивности эквивалентных яркостей. Этот вывод подтверждается также зарубежной практикой световых расчетов в условиях сумеречного зрения [Л. 10].

1-7. Абсолютная световая чувствительность

Измерение пороговой яркости. Пороговую яркость можно измерить с помощью *адаптометра*[1] — прибора, позволяющего в широких пределах варьировать яркость и

[1] Прибор для измерения пороговой яркости называется адаптометром потому, что исследование любого адаптационного процесса связано с изучением изменения пороговой яркости во времени (ч. 1, § 3-22).

угловой размер светового пятна. Форму и размер светового пятна, которое наблюдатель должен обнаружить на фоне нулевой яркости, можно изменять с помощью сменных диафрагм. Световое пятно появляется на поверхности глушеного стекла, освещаемого с внутренней стороны. Регулирование яркости в пределах до $1:10^8$ осуществляется с помощью сменных сетчатых экранов и диафрагм с плавно регулируемым раскрытием отверстия.

Стабильность результатов измерения требует жесткой фиксации линии зрения наблюдателя, что обеспечивает постоянство места расположения изображения светового пятна на сетчатке. Такая фиксация осуществляется непрерывным визированием во время измерения сверхпороговой красной светящей точки. Световое пятно, обнаруживаемое наблюдателем на пороге, расположено в стороне от фиксационной красной точки, вследствие чего его изображение расположено не в центре сетчатки.

Вследствие того, что пороговые уровни яркости очень незначительны, основную роль в пороговом зрительном процессе играет палочковый световоспринимающий аппарат. Следовательно, максимальное значение световой чувствительности должно определяться максимально возможной концентрацией молекул родопсина и наибольшей плотностью расположения палочек по площади сетчатки в зоне изображения тест-объекта. Для обеспечения максимальной концентрации молекул родопсина началу измерения абсолютной световой чувствительности анализатора должна предшествовать темновая адаптация наблюдателей в течение нескольких десятков минут. Для определения максимальной световой чувствительности глаза угловой размер пятна должен быть таким, чтобы его изображение охватывало с избытком зону максимальной концентрации палочек, расположенную в 12—15° от центра.

Определение световой чувствительности осуществляется, как правило, непосредственным измерением порога на появление. Наблюдатель, плавно вращая верньер диафрагмы, подает сигнал в момент обнаружения на периферии поля зрения впервые заметного светового пятна неопределенной формы. Возможно также измерение пороговой яркости на исчезновение. Порог на исчезновение обычно несколько ниже порога на появление. При статистическом методе измерения пороговой яркости наблюдателю многократно показывают пятна с яркостью, большей и меньшей предполагаемого порога. Наблюдатель должен лишь отвечать, видит ли он светлое пятно или не видит.

Пороговая яркость в функции размера и формы светового пятна. Увеличению углового размера тест-объекта соответствует рост числа светочувствительных клеток, расположенных в зоне изображения. Рост числа клеток, вступающих во взаимодействие с фотонами излучения тест-объекта, увеличивает вероятность концентрации порогового числа ионов в синапсах, следовательно, повышает вероятность возникновения импульсов тока действия. Согласно принятому определению пороговых величин, рост вероятности обнаружения светового пятна эквивалентен уменьшению пороговой яркости пятна, обнаруживаемого с прежней вероятностью, заданной условиями измерения, следовательно, увеличению световой чувствительности.

Теоретически предполагаемое уменьшение пороговой яркости при увеличении углового размера пятна полностью подтверждается результатами многих экспериментов [Л. 42—45]. Кривые $B_{пор} = f(\alpha)$, построенные по результатам экспериментальных исследований многих авторов (рис. 1-32), позволяют принять абсолютный световой порог $B_\infty = (B_{пор})_{\alpha=60'}$ численно равным $B_\infty = 1 \cdot 10^{-6}$ *нт* для белого излучения со сплошным спектром. Мун и Спенсер [Л. 45], обобщившие результаты измерения абсолютного светового порога, предложили эмпирическое уравнение, описывающее зависимость пороговой яркости от телесного угла светового круглого пятна,

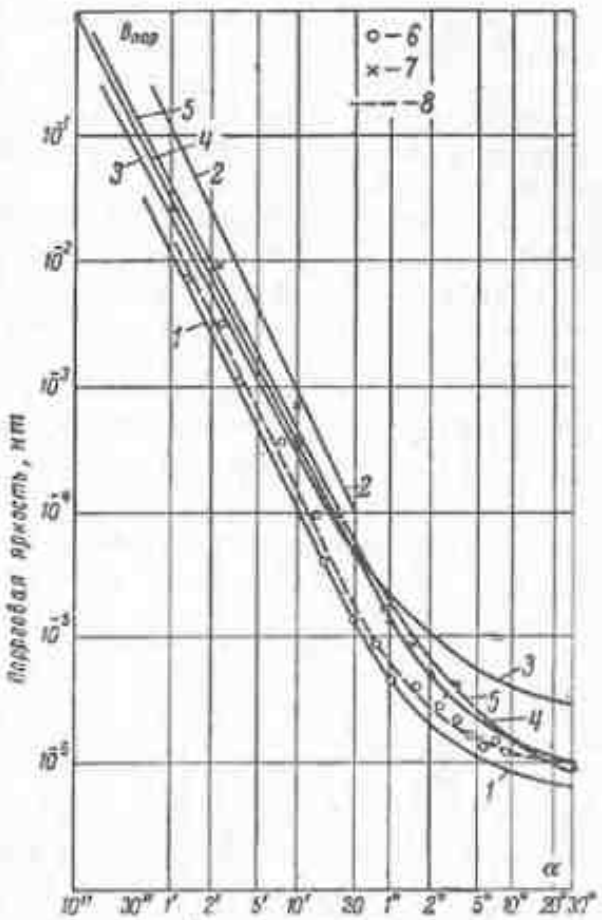


Рис. 1-32.

1—Арндт (1935—1939); *2*—Гельгоф и Шериг (1919); *3*—Боума (1939); *4*—Самсонова (1946); *5*—Вайгель (1910—1942); *6*—Аранульф и Вайнштейн (1946); *7*—Рив (1917); *8*—расчетная кривая по Муну и Спенсер [уравнение (1-26)].

$$B_{пор\omega} = B_\infty (0{,}047 + \sqrt{\omega})^2, \qquad (1\text{-}26)$$

где $B_{пор}$ — пороговая яркость для пятна, обладающего телесным углом ω *стер*;

B_∞ — абсолютный световой порог, численно равный пороговой яркости для $\omega \to \infty$.

Анализируя уравнение Муна и Спенсер, можно сделать следующие выводы:

1. Пороговая яркость практически (с погрешностью $\delta \leqslant 0{,}1$) не зависит от размера светового пятна при $\omega \geqslant 0{,}5$ *стер*, что соответствует угловому размеру дискового тест-объекта по диаметру $\alpha \geqslant 50'$.

2. Для пятен с малыми[1] угловыми размерами $\alpha \leqslant 15'$ пороговый блеск точечного источника света (с погрешностью $\delta \leqslant 0{,}08$) не зависит от размера пятна (рис. 1-33):

$$(E_{эр})_{пор} = B_{пор}\omega \approx 2{,}2 \cdot 10^{-3} B_{\infty}. \qquad (1\text{-}26а)$$

3. Величину порогового блеска, создаваемую точечным ($\alpha \leqslant 15'$) излучателем белого цвета, можно принять равной

$$(E_{эр})_{пор} \approx 2{,}1 \cdot 10^{-9} \text{ лк}.$$

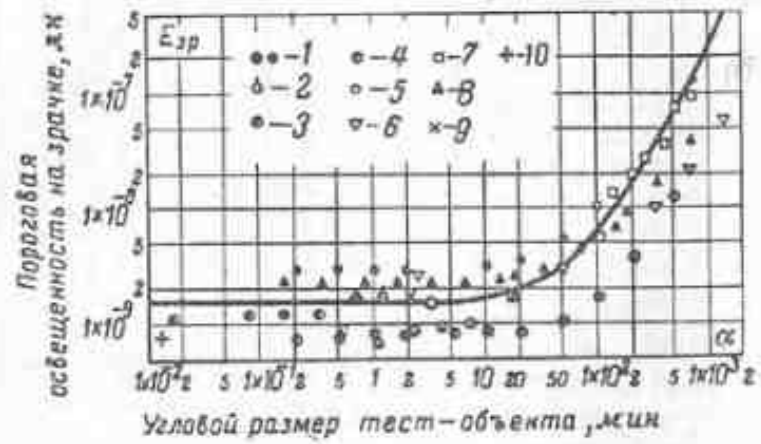


Рис. 1-33.

1—расчетные точки по (1-27); *2*—по Бюиссону; *3*—по Аркату; *4*—по Боума; *5*—по Лелс; *6*—по Равсу; *7*—по Борхардту; *8*—по Вейгелю; *9*—по Лангмюру; *10*—по Ресселю.

Значительно нагляднее и более точно в области малых ω эмпирическое уравнение, полученное автором на основе экспериментальных данных В. Г. Самсоновой [Л. 42]:

$$B_{пор}\,\alpha^{n} = C. \qquad (1\text{-}27)$$

Значения параметров n и C постоянны для определенных интервалов изменения α (табл. 2).

Из (1-27) следует, что значению $n = 2$ соответствует постоянство произведения пороговой яркости на телесный угол, под которым виден наблюдателю тест-объект,

$$B_{пор}\,\omega = 2{,}06 \cdot 10^{-3} \text{ лк}. \qquad (1\text{-}27а)$$

[1] Для малых круглых пятен $\alpha \leqslant 15'$ телесный угол пятна определяется простой зависимостью $\omega = 6{,}65 \cdot 10^{-8}\,\alpha^2$ [*стер*].

Это соотношение, показывающее постоянство порогового блеска точечных источников с угловым размером $\alpha \leqslant 15'$, принято называть *законом Рикко*.

Постоянство порогового блеска точечных источников с угловыми размерами менее 15′ определяется постоянством площади изображения светящей точки в пределах кружка рассеяния, возникающего вследствие оптических несовершенств глаза. Предельные угловые размеры тест-объектов, определяющие зону постоянства порогового блеска (зона действия закона Рикко $n = 2$) и зона постоянства пороговой яркости (зона абсолютного светового порога $n = 0$), наглядно иллюстрируются показателем степени n в (1-27).

Таблица 2

Значение параметров уравнения (1-27)

Угловой размер пятна α, *мин*	$\leqslant 15$	15 — 120	120 — 600	600 — 3 000	$\geqslant 3\,000$
Показатель степени n	2	1,6	1,25	0,54	0
Постоянный член C, *нт*	$3{,}1 \cdot 10^{-2}$	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	$2{,}47 \cdot 10^{-4}$	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}

Анализ хода кривой $(E_{эр})_{пор} = f(\alpha)$, приведенной на рис. 1-33, позволяет обнаружить рост порогового значения светового потока, попадающего на сетчатку, при увеличении углового размера тест-объекта,

$$F_{пор} = (E_{эр})_{пор} q,$$

где q — площадь входного зрачка глаза, практически постоянная в условиях измерения световых порогов.

Увеличение порогового значения светового потока при росте диаметра изображения светящего пятна на сетчатке определяется уменьшением квантового выхода процесса преобразования излучения в зрительное ощущение. Квантовый выход уменьшается в результате повышения вероятности рекомбинации ионов распада молекул фотореагента в связи с уменьшением освещенности сетчатки в зоне изображения (рис. 1-34). Уменьшение пороговой освещенности сетчатки, определяемое уменьшением пороговой яркости тест-объекта, вызывает увеличение времени накопления порогового числа отрицательных ионов в синапсах волокон зрительного нерва, что неизбежно должно приводить к росту вероятности их рекомбинации с положительными ионами. Как показывают ориентировочные расчеты (ч. I, § 3-22), при угловых размерах светящего пятна 30—50°

время концентрации порогового числа ионов в первом синапсе может достигать нескольких десятков секунд, в течение которых вполне вероятна рекомбинация.

Нетрудно видеть, что максимальное значение квантового выхода порогового зрительного процесса соответствует области действия закона Рикко ($\alpha \leqslant 15'$). В этой области угловых размеров текст-объекта пороговое значение светового потока, падающего на сетчатку, минимально.

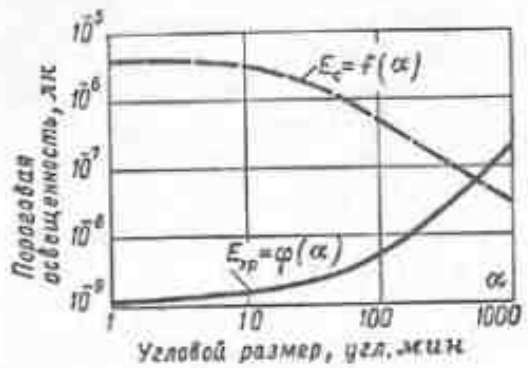


Рис. 1-34.

При определении пороговой яркости круглых световых пятен уравнение Муна и Спенсер (1-26) можно преобразовать:

$$B_{пор} = B_{\infty}\left(1 + \frac{182}{\alpha}\right)^2, \qquad (1\text{-}26б)$$

где α — угловой размер диаметра пятна, *мин*.

Уравнение (1-26б) соответствует закону Рикко в том случае, когда $\alpha \ll 182'$. При этом эмпирическое уравнение (1-26) примет следующий вид, соответствующий закону Рикко:

$$B_{пор}\alpha^2 \approx 3{,}33 \cdot 10^4 B_{\infty}. \qquad (1\text{-}26в)$$

Точность этого уравнения повышается с уменьшением углового размера светового пятна. При $\alpha \leqslant 10'$ погрешность уравнения (1-26в) примерно равна 0,05.

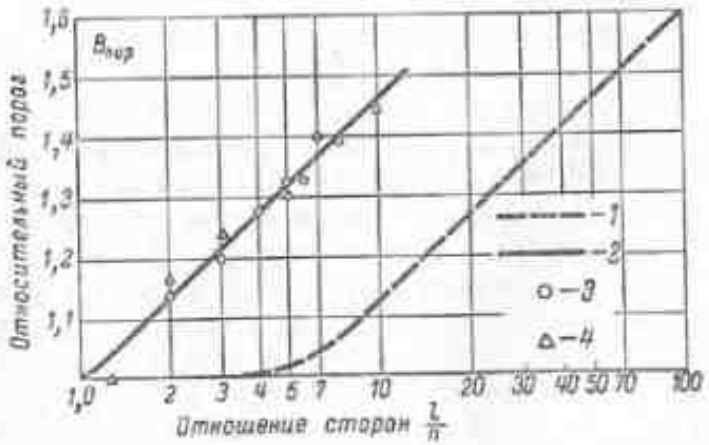


Рис. 1-35.

1 — по Янишеву [Л. 45]; *2* — по Мешкову [Л. 46]; *3* — $\omega = 0{,}1 \cdot 10^{-4}$ *стер*; *4* — $\omega = 1 \cdot 10^{-4}$ *стер*.

Уравнения (1-26) и (1-27) характеризуют зависимость пороговой яркости от размера тест-объекта, расположенного в центре поля зрения наблюдателя. При перемещении изображения

диска малого углового размера от центра к периферии сетчатки обнаруживается максимум световой чувствительности в зоне 10—12°, что следует объяснить максимальной концентрацией палочек в этой зоне.

Пороговая яркость прямоугольного пятна больше круглого при одинаковой площади пятен, причем их кратность растет с увеличением отношения размеров сторон прямоугольника. Как показывают экспериментальные данные [Л. 46], пороговая яркость квадрата практически равна пороговой яркости равновеликого по площади диска. Увеличение пороговой яркости прямоугольника постоянной площади в функции отношения его сторон (рис. 1-35) можно записать эмпирическим уравнением

$$B_{l,n} = B_a\left(c + b \lg \frac{l}{n}\right), \qquad (1\text{-}28)$$

где $B_{l,n}$ и B_a — пороговые яркости прямоугольника со сторонами l, n и квадрата со стороной $a = \sqrt{ln}$.

b и c — постоянные уравнения, зависящие от телесного угла светящего пятна.

Согласно результатам экспериментального исследования [Л. 45 и 46] значение b можно принять равным 0,45. Значение постоянной $c \approx 1$ для $\omega \geqslant 0{,}1 \cdot 10^{-4}$ *стер* [Л. 46] и $c = 0{,}65$ для $\omega = 0{,}35 \cdot 10^{-6}$ *стер* [Л. 45].

Рост пороговой яркости прямоугольного тест-объекта по мере увеличения отношения его сторон можно предположительно объяснить увеличением числа рецепторных полей в зоне изображения постоянной площади.

Пороговая яркость в функции спектрального состава. Различие спектральных чувствительностей палочкового и колбочкового световоспринимающих аппаратов определяет зависимость пороговой яркости от спектрального состава излучения. Эта зависимость характеризуется уменьшением пороговых значений для сине-голубых излучений и повышением — для оранжево-красных (рис. 1-36). Измерения пороговых значений освещенности на зрачке наблюдателя от точечных источников однородного излучения, проведенные Л. И. Демкиной [Л. 47], подтверждают наличие эффекта Пуркине (ч. 1, § 1-38). Результаты этих измерений (рис. 1-37) позво-

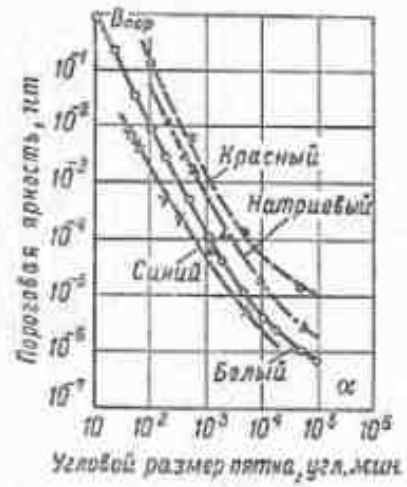


Рис. 1-36.

ляют рассчитать значения спектральной чувствительности палочкового аппарата:

$$K'_\lambda = \frac{(E_{\lambda=0,515})_{пор}}{(E_\lambda)_{пор}} = \frac{(E_{\lambda=0,515})_{пор} K_\lambda}{(E_\lambda)_{пор} K_{\lambda=0,515}}, \qquad (1\text{-}29)$$

где K'_λ и K_λ — значение спектральной чувствительности палочкового и колбочкового аппаратов;

$(E_{\lambda=0,515})_{пор}$ и $(E_\lambda)_{пор}$ — пороговые значения плотности облучения зрачка наблюдателя: минимальная и любым однородным излучением λ;

$(E'_{\lambda=0,515})_{пор}$ и $(E'_\lambda)_{пор}$ — пороговые значения освещенности зрачка наблюдателя однородными излучениями с длинами волн 0,515 *мк* и λ.

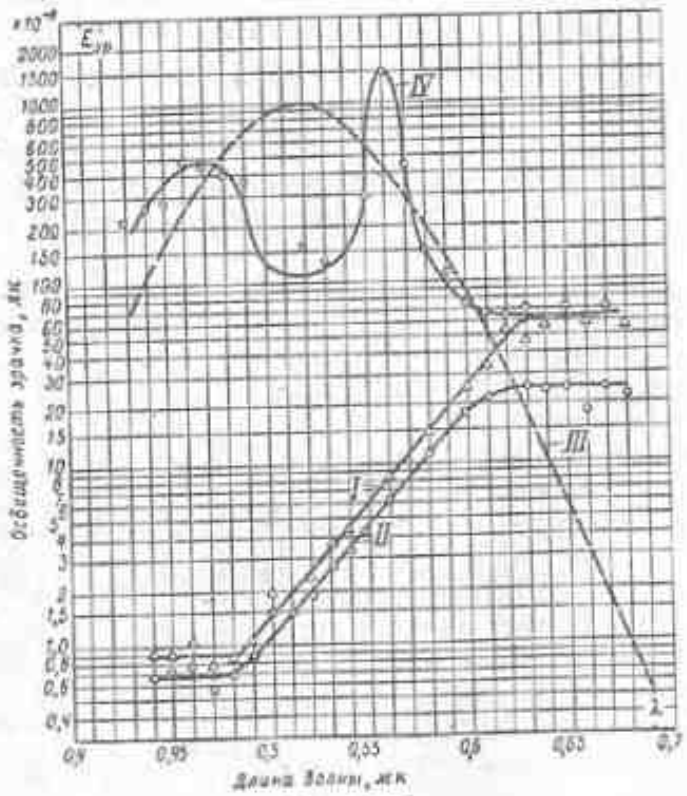


Рис. 1-37.

Световые пороги: *I* — на появление; *II* — на исчезновение; *III* — спектральная чувствительность палочкового аппарата; *IV* — пороги цветоощущения.

Уравнение (1-29) позволяет рассчитать пороговую яркость однородного излучения, если известно значение пороговой яркости образцового излучения, в качестве которого можно

принять однородное с длиной волны $\lambda = 0{,}515$ *мк*, для которого $K'_{\lambda=0,515} = 1$,

$$(B_\lambda)_{пор} = \frac{K'_{\lambda=0,515} K(\lambda)}{K'(\lambda) K_{\lambda=0,515}} (B_{\lambda=0,515})_{пор}. \qquad (1\text{-}30)$$

Нетрудно видеть, что дробный сомножитель правой части (1-30) определяет величину, обратную относительной актиничности a исследуемого однородного излучения с длиной волны λ для палочковой чувствительности, если эталонным излучением является однородное излучение с длиной волны $\lambda = 0{,}515$ *мк* и образцовым приемником — стандартный глаз в условиях дневного зрения:

$$(B_\lambda)_{пор} = \frac{(B_{\lambda=0,515})_{пор}}{a}. \qquad (1\text{-}30а)$$

Уравнение (1-30а) можно применить для расчета пороговой яркости любого спектрального состава, если в качестве эталонного излучения принято белое, для которого пороговая яркость определяется графиком $B_{пор} = f(\alpha)$ или его эмпирическим уравнением (1-26) или (1-27):

$$B_{пор} = \frac{(B_б)_{пор}}{a}, \qquad (1\text{-}31)$$

где $(B_б)_{пор}$ — пороговая яркость белого излучения с цветовой температурой $T_ц = 3\,050°$ К*,

$\frac{1}{a} = \frac{A_б}{A} = \frac{\int b(\lambda) K(\lambda) d\lambda \int b_б(\lambda) K'(\lambda) d\lambda}{\int b(\lambda) K'(\lambda) d\lambda \int b_б(\lambda) K(\lambda) d\lambda}$ — величина, обратная относительной актиничности заданного излучения со спектральным распределением излучения $b(\lambda)$ и эталонного белого $b_б(\lambda)$;

где $A_б$ и A — актиничности белого излучения $T_ц = 3\,050°$ К и исследуемого с заданным спектральным составом $b(\lambda)$.

Выражая $(B_б)_{пор}$ согласно (1-26) через угловой размер пятна и заменяя $A_б = 0{,}6$ для излучения $T_ц = 3\,050°$ К, получим:

$$B_{пор} = \frac{0{,}6C}{\alpha^n} \frac{\int b(\lambda) K(\lambda) d\lambda}{\int b(\lambda) K'(\lambda) d\lambda}, \qquad (1\text{-}32)$$

где C и n — параметры уравнения (1-26), значения которых даны в табл. 2.

---

* Основные исследования пороговой яркости проведены с излучением $T_ц = 3\,050°$ К.

Уравнение (1-32) можно использовать для расчета пороговой яркости любого спектрального состава в тех случаях, когда основным световоспринимающим аппаратом является палочковый аппарат. Этому условию соответствуют темновая адаптация и расположение светового сигнала на периферии поля зре-

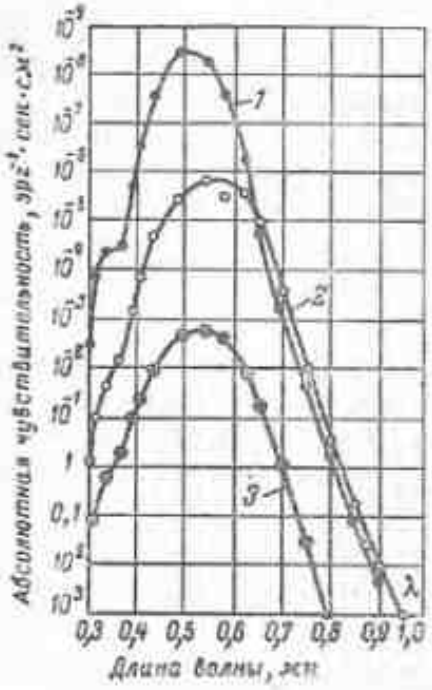


Рис. 1-38.

1 — периферический палочковый аппарат; 2 — фовеальный колбочковый аппарат; 3 — периферический колбочковый аппарат.

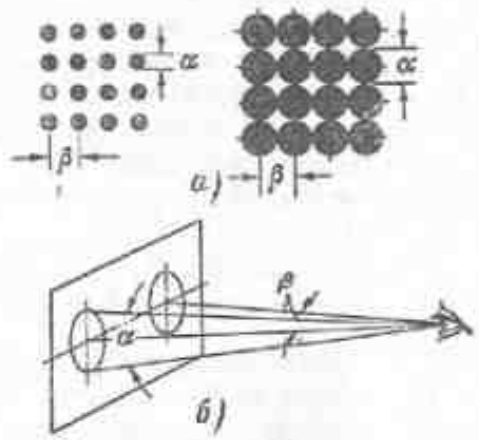


Рис. 1-39.

ния. Применение (1-32) для случая центрального расположения тест-объекта возможно лишь при больших его размерах, когда изображение занимает не только центр, но также и периферию сетчатки. Указанные условия возможности использования расчетного уравнения (1-32) определяются существенным отличием кривой спектральной чувствительности центрального пятна сетчатки от кривой видности ночного зрения даже в условиях полной темновой адаптации. Это различие функций спектральной чувствительности по Н. И. Пинегину [Л. 101] приведено в графиках $V(\lambda)$ для различных световоспринимающих аппаратов в условиях темновой адаптации (рис. 1-38).

Пороговая яркость нескольких пятен. Результаты исследования показывают, что пороговая яркость уменьшается не только при увеличении размера светящего пятна, но также и при появлении в поле зрения наблюдателя нескольких световых пятен [Л. 46, 48 и 49]. Пороговая яркость n пятен с площадью каждого σ лежит в следующих пределах:

$$B_S \frac{S}{n\sigma} \leqslant B_{n\sigma} \leqslant B_\sigma, \qquad (1\text{-}33)$$

где B_S, B_σ — пороговые яркости пятен площадью S и σ;

$B_{n\sigma}$ — пороговая яркость n пятен с площадью σ каждого;

S — площадь фиктивного пятна внутри которого расположены все n пятен[1];

$n\sigma$ — суммарная площадь всех n пятен.

Из приведенного неравенства следует, что максимально возможное значение пороговой яркости n пятен $B_{n\sigma}$ равно пороговой яркости одного пятна B_σ. Это максимальное значение $B_{n\sigma} = B_\sigma$ наблюдается при больших угловых расстояниях β между центрами смежных пятен, а также при максимально возможном сближении их $\beta = 0$, когда все пятна сольются в одно [Л.45]. Минимальное значение пороговой яркости нескольких пятен наблюдается в тех случаях, когда совокупность всех n пятен воспринимается наблюдателем как большое сплошное пятно достаточно равномерной яркости. Это имеет место при небольших расстояниях между границами смежных пятен или даже при их оптическом контакте (рис. 1-39,*а*).

Исследования, проведенные в последние годы [Л. 45], позволили установить зависимость углового расстояния между центрами смежных пятен $\beta_{мин}$ (рис. 1-39,*б*), при котором все пятна воспринимаются слитно, от углового размера каждого светового пятна α. Эта зависимость, представленная графиком $\frac{\beta_{мин}}{\alpha} = f(\alpha)$, показывает, что $\beta_{мин} > \alpha$ для малых пятен с угловым размером $\alpha \leqslant 30'$ (рис. 1-40). Слитное восприятие нескольких пятен бо́льших размеров наблюдается лишь при их соприкосновении или частичном наложении $\beta \leqslant \alpha$. Слитное восприятие смежных пятен следует объяснить возникновением иррадиации, что подтверждается относительно бо́льшим размытием границ малых пятен по сравнению с пятнами $\alpha \geqslant 30'$.

Для расчета пороговой яркости n пятен можно применить эмпирическое уравнение [Л. 46]:

$$B_{n\sigma} = B_S \frac{S}{n\sigma} + a\left(B_\sigma - B_S \frac{S}{n\sigma}\right) \lg \frac{\beta}{\beta_{мин}}. \qquad (1\text{-}34)$$

Согласно этому уравнению минимальное значение пороговой яркости n пятен получается при $\beta = \beta_{мин}$, когда второй член уравнения (1-33) равен нулю,

$$(B_{n\sigma})_{мин} = B_S \frac{S}{n\sigma}. \qquad (1\text{-}34,\text{а})$$

[1] Площадь фиктивного пятна определяется контуром, касательным к границам наружных световых пятен.

Пороговые значения яркости одного пятна B_ε с угловым размером диаметра α и фиктивного пятна B_S определяются по графикам (рис. 1-32) или с помощью (1-26) и (1-27). Сопоставление расчетных данных [Л. 46] с результатами эксперимента [Л. 45] дает достаточно удовлетворительное совпадение (рис. 1-41).

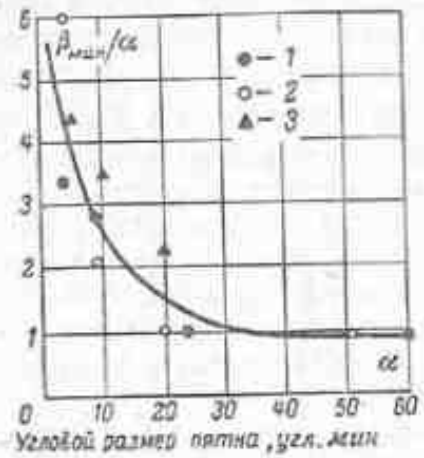


Рис. 1-40.
1—n=2; 2—n=4; 3—n=16.



Рис. 1-41.
Общее число пятен $n = 16$.
1—результаты эксперимента П. Яновского; 2—расчет по (1-34).

Уменьшение пороговой яркости при увеличении числа пятен, появляющихся в поле зрения наблюдателя, следует объяснить в основном, так же как и при увеличении углового размера одного пятна, ростом числа светочувствительных клеток в зоне изображения.

Наряду с этой основной причиной следует предполагать наличие некоторой *индукции возбуждения*, под которой принято понимать изменение уровня основного зрительного ощущения при действии на глаз непрямых световых раздражителей (§ 1-13).

1-8. Контрастная чувствительность

Пороговая разность яркости. Зрительное обнаружение объекта наблюдения, одноцветного с фоном, возможно лишь в том случае, когда разность яркости объекта и фона равна или больше пороговой разности яркости (§ 1-5). В простейшем случае, когда тест-объект разнояркий, его можно рассматривать как некоторое пятно большей или меньшей яркости по сравнению с яркостью фона. Отношение разности яркости пятна (объекта) и фона к яркости фона принято называть *яркостным контрастом*:

$$k = \frac{B_o - B_\Phi}{B_\Phi} = \frac{\Delta B}{B_\Phi}, \qquad (1\text{-}35)$$

где B_o и B_Φ — яркости объекта и фона;
ΔB — разность яркости объекта и фона.

Из (1-35) следует, что положительным контрастом обладают объекты светлее фона, а отрицательным — темнее фона. Условия обнаружения объекта, одноцветного с фоном, можно записать следующими неравенствами:

$$\Delta B \geqslant \Delta B_{пор} \text{ или } k \geqslant k_{пор},$$

где $\Delta B_{пор}$ и $k_{пор} = \frac{\Delta B_{пор}}{B_\Phi}$ — пороговые значения разности яркости и яркостного контраста.

Экспериментальные исследования показывают, что пороговая разность яркости зависит от углового размера объекта наблюдения и яркости фона, на которую адаптирован наблюдатель.

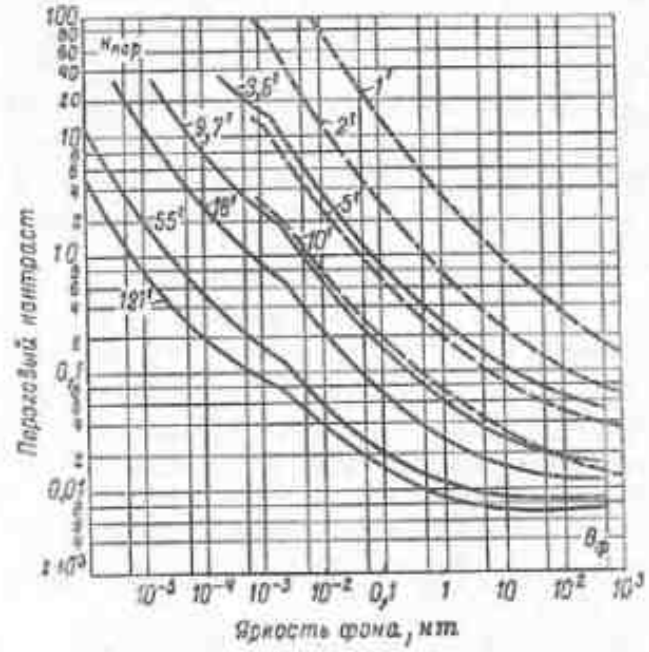


Рис. 1-42.
1—по Блэкуэллу; 2—по Зидентопфу.

На рис. 1-42 приведены графики зависимости пороговых контрастов круглого равнояркого пятна от яркости фона для различных угловых размеров диаметра пятна по результатам исследований Блэкуэлла [Л. 50] и Зидентопфа [Л. 51]. Исследования Блэкуэлла проведены с девятью наблюдателями статистическим методом. Пороговая разность яркости в этих исследованиях определена из условий 50-процентной вероятности обнаружения круглого пятна с положительным контрастом относительно фона. В исследованиях Зидентопфа тест-объектом также служил светлый диск на темном фоне. Достаточно удовлетво-

рительное совпадение результатов исследований Блэкуэлла и Зидентопфа $k_{пор}=f(B_ф, \alpha)$ позволяют рекомендовать их для практики расчетов $\Delta B_{пор}$.

Анализ кривых $k_{пор}=f(B_ф)$ позволяет сделать следующие выводы:

1. Пороговый уровень установившегося зрительного процесса определяется совокупностью трех параметров: яркости адаптации $B_ф$, углового размера α тест-объекта и его яркостного контраста k с фоном.

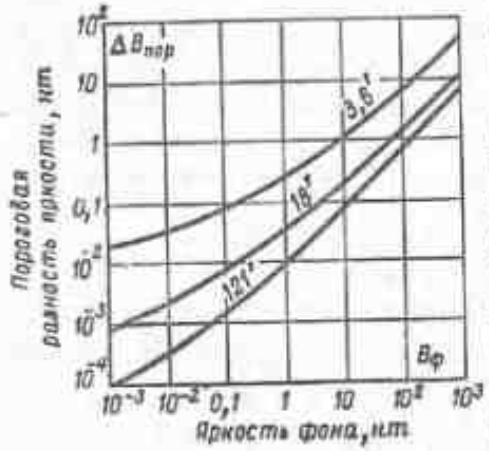


Рис. 1-43.

2. Пороговая разность яркости, определяющая величину порогового контраста, увеличивается с ростом $B_ф$ (рис. 1-43) и уменьшением углового размера тест-объекта. Более медленное увеличение $\Delta B_{пор}$ по сравнению с $B_ф$ приводит к снижению значений порогового контраста по мере увеличения яркости адаптации.

3. Каждому угловому размеру тест-объекта соответствует некоторое минимальное значение порогового контраста $k_{пор}=\xi_\alpha$, меньше которого тест-объект не может быть обнаружен при любом как угодно большом значении яркости (рис. 1-44).

4. Каждому значению яркости адаптации также соответствует некоторое минимальное значение порогового контраста $k_{пор}=\xi_B$, меньше которого тест-объект не может быть обнаружен при любом как угодно большом значении его углового размера (рис. 1-44).

5. Величина, обратная минимальному значению порогового контраста по яркости, определяет контрастную чувствительность

$$S_k=\frac{1}{\xi_B},$$

которая растет с увеличением яркости адаптации.

6. Максимальное значение контрастной чувствительности зрительного анализатора определяется предельно минимальным пороговым контрастом $\xi_{\alpha B}=\xi_{мин}$ (рис. 1-44) с неограниченным угловым размером тест-объекта в условиях оптимальной яркости $B_ф \geqslant 350$ *нт*:

$$(S_k)_{макс}=\frac{1}{\xi_{мин}}\approx 145.$$

7. Любой произвольно выбранной паре параметров из трех $B_ф$, k и α соответствует некоторое значение третьего, определяющего пороговый уровень зрения, если $k \geqslant \xi_B$ при определении $\alpha_{пор}$ по заданным значениям k и $B_ф$ или $k \geqslant \xi_\alpha$ при определении $(B_ф)_{пор}$ по k и α (рис. 1-44).

Наличие двух ветвей кривых $k_{пор}=f(B_ф)$, наиболее заметное для тест-объектов с большими угловыми размерами, позволяет предполагать природу процессов, определяющих контрастную чувствительность, в основном периферической аналогично процессам, регулирующим световую чувствительность анализатора. Согласно этому предположению уменьшение пороговой разности яркости при увеличении углового размера тест-объекта можно объяснить увеличением числа светочувствительных клеток в зоне изображения тест-объекта (§ 1-7). Бо́льшую роль углового размера тест-объекта в условиях малой яркости $B_ф \leqslant 0{,}1$ *нт* можно объяснить решающим значением палочек в процессе ночного зрения и малой концентрацией их в центральной зоне сетчатки.

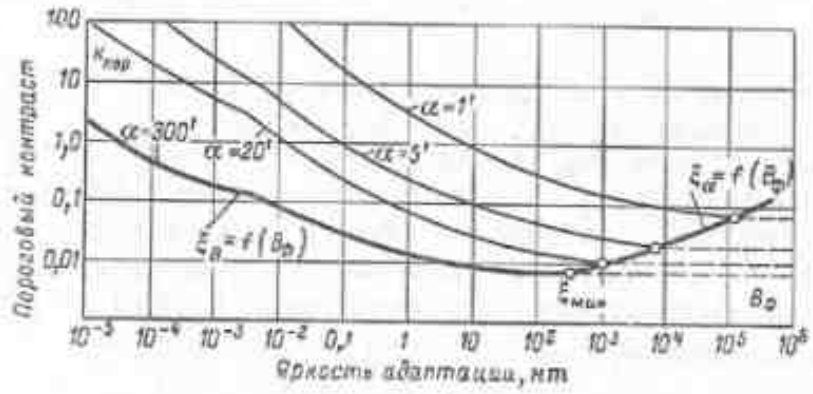


Рис. 1-44.

Рост пороговой разности яркости при увеличении яркости фона (рис. 1-43) определяется уменьшением концентрации молекул фотореагентов, уменьшением диаметра зрачка глаза и увеличением поглощения фотонов клетками пигментного эпителия в результате адаптации на бо́льшую яркость поля зрения. Понижение световой чувствительности зрительного анализатора в результате уменьшения концентрации молекул фотореагента лишь частично компенсируется повышением чувствительности центров.

Вуалирующая роль собственного света сетчатки. Соотношение пороговой разности яркости с яркостью фона в значительной мере определяется вуалирующим действием (шумовым эффектом) *собственного света сетчатки* (ч. 1,

§ 3-22). Этот эффект наиболее заметен при малых яркостях адаптации, в результате чего в области малых яркостей фона наблюдается наиболее резкий рост порогового контраста тест-объекта с фоном.

Вуалирующее действие собственного света сетчатки, возникающего в результате спонтанного распада молекул второго рода, Г. Гельмгольц считал основной причиной роста порогового контраста при уменьшении яркости. Согласно этому предположению, равномерная пелена собственного света вуалирует изображение тест-объекта и этим уменьшает воспринимаемый контраст

$$k' = \frac{B_o - B_\phi}{B_\phi + \beta} = \frac{k}{1 + \frac{\beta}{B_\phi}}, \qquad (1\text{-}36)$$

где k — контраст объекта с яркостью B_o и фона B_ϕ, *нт*;

β — собственный свет сетчатки, *нт*;

k' — воспринимаемый глазом контраст.

Из (1-36) следует, что уменьшение контраста за счет вуалирования будет тем сильнее, чем больше относительная величина яркости вуали β/B_ϕ, следовательно, чем меньше яркость фона B_ϕ. Согласно уравнению (1-36) пороговый контраст тест-объекта неограниченного размера определится как

$$(k)_{пор} = \xi_B \left(1 + \frac{\beta}{B_\phi}\right). \qquad (1\text{-}37)$$

Для тест-объекта любого углового размера пороговый контраст определится в функции яркости аналогичным уравнением:

$$k_{пор} = \xi_\alpha \left(1 + \frac{\beta}{B_\phi}\right). \qquad (1\text{-}37а)$$

Графическая интерпретация (1-36а) и (1-36б) в координатной системе ΔB и B_ϕ изображается прямой:

$$\Delta B = \xi_\alpha (B_\phi + \beta). \qquad (1\text{-}38)$$

В действительности рост пороговой разности яркости несколько более сложен. Более сложная нелинейная зависимость $\Delta B_{пор} = f(B_\phi)$, установленная опытами (рис. 1-43), вызвана тем, что пороговый контраст объекта с фоном неодинаков для различных значений B_ϕ не только вследствие „шумового эффекта" собственного света сетчатки, но также и вследствие увеличения пороговой разности яркости из-за снижения концентрации фотореагентов, уменьшения площади входного зрачка и других причин. В эквивалентной схеме решения этой зависимости

можно заменить все причины одной — „шумовым эффектом". В такой схеме яркость собственного света сетчатки должна быть заменена яркостью эквивалентной вуалирующей пелены $\beta_э$. Вследствие того, что все причины изменения $\Delta B_{пор}$ определяются яркостью, эквивалентная вуалирующая пелена должна зависеть от яркости поля зрения наблюдателя:

$$\beta_э = f(B_\phi).$$

Эта зависимость отчетливо видна из результатов экспериментального исследования зависимости $\Delta B_{пор} = f(B_\phi)$ или $k_{пор} = f(B_\phi)$, а также из более точных эмпирических уравнений, описывающих эти функции. Так например, эмпирическое уравнение

$$\Delta B_{пор} = \xi_{мин} (a + \sqrt{B_\phi})^2, \qquad (1\text{-}39)$$

предложенное Муном и Спенсер для характеристики пороговой видимости светлого круглого пятна большого диаметра $\alpha \geqslant 2°$ в условиях дневного зрения ($B_\phi \geqslant 10$ *нт*), позволяет подтвердить этот вывод:

$$\beta_э = a^2 + 2a\sqrt{B_\phi}. \qquad (1\text{-}39а)$$

Эмпирические уравнения $\Delta B_{пор} = f(B_\phi)$. Для малых значений яркости $B_\phi = 2 \cdot 10^{-3}$ *нт* результаты исследования Блэкуэлла с достаточной точностью можно описать следующим эмпирическим уравнением для вероятности обнаружения $p = 0{,}5$ [Л. 10]:

$$\Delta B_{пор} = B_{пор} \left[1 + \left(\frac{B_\phi}{b}\right)^{0{,}63}\right], \qquad (1\text{-}40)$$

где $B_{пор}$ — пороговая яркость пятна заданного размера и формы;

b — параметр уравнения, зависящий от углового размера светлого пятна ($b = 4 \cdot 10^{-2}$ для $\alpha = 1'$ и $b = 1{,}3 \cdot 10^{-1}$ для $\alpha = 2°$).

Уравнение (1-40) интересно тем, что оно позволяет установить корреляцию между пороговой яркостью и пороговой разностью яркости светлого пятна одинаковых формы и размера. Как можно видеть из этого уравнения, пороговая разность яркости во всех случаях больше пороговой яркости, причем это различие растет с увеличением яркости. Это уравнение показывает также, что математическую запись зависимости $\Delta B_{пор} = f(B_\phi)$ в условиях малых значений яркости более точно можно осуществить, записывая соотношение между $\Delta B_{пор}$ и $B_{пор}$, а не между $\Delta B_{пор}$ и $(\Delta B_{пор})_{мин} = \xi_\alpha B_\phi$, как это сделано в эмпирическом уравнении (1-39) для $B_\phi \geqslant 10$ *нт*.

Результаты расчета при помощи (1-40) пороговой разности яркости круглых тест-объектов с угловыми размерами $\alpha = 1'$ и $\alpha = 2°$ в условиях изменения яркости фона в пределах от 10^{-5} до 10^{-3} *нт* показывает, что отношение $\Delta B_{пор} : B_{пор}$ для пятна $\alpha = 2°$ увеличивается от 1,7 до 73, для $\alpha = 1'$ — лишь от 1,25 до 25. Более резкое изменение пороговой разности яркости пятна большего углового размера следует объяснить большей ролью в этом случае палочкового аппарата, чувствительность которого подвержена более резким изменениям в зависимости от яркости адаптации.

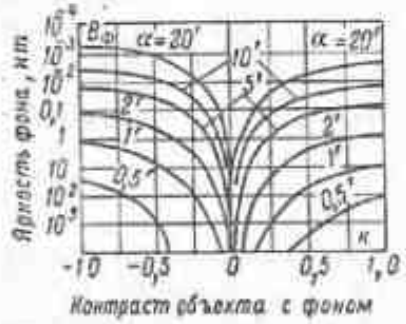


Рис. 1-45.

Изменения зрительных порогов, в частности порогового контраста яркости, принято объяснять флуктуацией излучения. Согласно этой гипотезе пороговый контраст яркости тест-объекта определяется флуктуацией излучения системы объект — фон (ч. 1, § 2-16). Как показал Е. С. Ратнер [Л. 52], при малых уровнях яркости фона решающую роль играют собственные «шумы» приемника.

Значение пороговой разности яркости темных тест-объектов на светлом фоне $B_ф > B_0$ несколько отличается от положительных значений пороговой разности яркости при $B_ф < B_0$. Исследования Зидентопфа [Л. 51] показывают, что абсолютные значения положительных пороговых контрастов при обнаружении простых по форме (диск) светлых объектов на темном фоне больше значений отрицательных контрастов (рис. 1-45). По данным Ле Грана [Л. 10] для темных тест-объектов на светлом фоне при $\alpha \geqslant 1°$ пороговая разность яркости примерно на 15% меньше, чем для светлого тест-объекта на темном фоне. Это следует объяснить явлением иррадиации, вызывающей зрительное увеличение размера светлого пятна на темном фоне, следовательно, уменьшение эффективности использования светового потока светлого тест-объекта. Как можно видеть из графиков на рис. 1-45, наибольшее различие пороговых контрастов светлого и темного тестовых пятен имеет место при малых значениях яркости и малых угловых размерах объекта, что следует объяснить большим значением иррадиации в этих случаях.

Обобщение результатов исследования Блэкуэлла, Зидентопфа, Вейгеля и Кнолля позволили автору [Л. 46] выразить кривые $k_{пор} = f(B_ф)$ следующим эмпирическим уравнением:

$$\Delta B_{пор} = \frac{b_ф^a}{b} \qquad (1\text{-}41)$$

или

$$k_{пор} = \frac{1}{b b_ф^{1-a}}, \qquad (1\text{-}41а)$$

где a и b — параметры, зависящие от α, $B_ф$ и знака контраста. Параметры уравнений (1-41) и (1-41а) для темного тест-объекта простейшей формы (диск) на светлом фоне приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры a и b уравнения (1-41)

Угловой размер тест-объекта α, *мин*	Яркость фона $B_ф$, *нт*					
	$B_ф \leqslant 10^{-4}$		$10^{-2} \leqslant B_ф \leqslant 10$		$B_ф \geqslant 10$	
0,5	0,88	0,22	0,65	0,08	0,34	0,16
1,0	0,86	1,44	0,60	0,40	0,32	0,73
2,0	0,84	4,4	0,57	1,4	0,27	2,8
5,0	0,80	18	0,53	5,5	0,22	11,5
10	0,76	40	0,48	11,5	0,17	23
20	0,69	87	0,44	22	0,13	45
50	0,58	100	0,40	40	0,07	70
200	0,50	200	0,35	71	0,03	120
⩾ 1 500	0,50	400	0,3	120	0,02	120
	$1-a$	b	$1-a$	b	$1-a$	b

Измерение пороговой разности яркости было проведено Блэкуэллом для вероятности обнаружения $p = 0{,}5$. Для расчетного определения пороговой разности яркости при любом другом значении вероятности обнаружения $\Delta B_{пор}$ необходимо воспользоваться нормальной функцией распределения вероятности (уравнение 1-22). Согласно исследованиям Блэкуэлла

$$(\Delta B_{пор})_p = (\Delta B_{пор})_{0,5}(1 + 0{,}68\gamma), \qquad (1\text{-}42)$$

где $(\Delta B_{пор})_p$ и $(\Delta B_{пор})_{0,5}$ — пороговые разности яркости для вероятности p и $p = 0{,}5$;

γ — показатель формы кривой.

Значения показателя γ согласно (1-23) определяются вероятностью обнаружения (табл. 4).

Согласно (1-42) можно рассчитать вероятность обнаружения $\Delta B_p = 0$. Этому соответствует $\gamma = -\frac{1}{0{,}68} = -1{,}47$, следовательно, вероятность $p \approx 0{,}02$.

Энергетические соотношения между $B_ф$, $\alpha_{пор}$ и $k_{пор}$.

Для описания взаимосвязи трех основных параметров

Таблица 4

Значения показателя формы кривой $p(\Delta B_i - \Delta B_{пор})$

P	τ	P	τ	P	τ
0,01	−1,65	0,25	−0,48	0,75	0,48
0,02	−1,45	0,40	−0,18	0,875	0,81
0,05	−1,16	0,50	0,00	0,95	1,16
0,125	−0,81	0,60	0,18	0,99	1,65

порогового уровня зрительного процесса проф. Н. Г. Болдыревым [Л. 53, 54] были предложены энергетические соотношения. Эти соотношения были им получены из условий соответствия зрительного ощущения и мощности эффективно используемого излучения в процессе его преобразования. Мощность эффективно используемого излучения Н. Г. Болдырев характеризует эффективной плотностью светового потока на входном зрачке глаза наблюдателя. Эту величину можно определить произведением разности пороговых разностей яркости заданной и минимальной на величину телесного угла ω, под которым наблюдатель видит тест-объект:

$$e = [\Delta B_{пор} - (\Delta B_{пор})_{мин}]\,\omega = (\Delta B_{пор} - \xi_B B_\Phi)\,\omega, \qquad (1\text{-}43)$$

где ξ_B — минимальное значение порогового контраста по яркости;
ω — телесный угол объекта наблюдения, *стер*.

Нетрудно видеть, что величина e имеет размерность освещенности и с достаточной точностью определяет освещенность на зрачке наблюдателя для малых значений ω ($\omega \leqslant 0{,}05$ *стер*).

Как показывают результаты измерений порогового значения углового размера тест-объекта при заданных B_Φ и k, проведенных Е. Н. Раутианом и Н. И. Пинегиным [Л. 55], а также Коннером и Геноунгом [Л. 56], вероятность различения формы объекта однозначно определяется относительным значением e (рис. 1-46). Это позволяет принять величину e в качестве некоторого общего критерия уровня порогового ощущения. Пороговые условия обнаружения точечных излучателей на фоне яркости B_Φ, так же как и на фоне нулевой яркости $B_\Phi = 0$, принято определять пороговой освещенностью на зрачке глаза наблюдателя, создаваемой наблюдаемым точечным источником. Выражение этой пороговой величины можно получить простейшим преобразованием уравнения (1-43):

$$(E_{зр})_{пор} = e + \omega B_\Phi (1 + \xi_B) \qquad (1\text{-}44)$$

так как

$$\Delta B_{пор} = (B_0)_{пор} - B_\Phi$$

и

$$\omega (B_0)_{пор} = (E_{зр})_{пор},$$

где $(E_{зр})_{пор}$ — пороговая освещенность на зрачке наблюдателя, создаваемая точечным излучателем;
$(B_0)_{пор}$ — пороговая яркость точечного излучателя.

Выражая величину телесного угла точечного излучателя через его угловой размер α, *мин*, получим:

$$(E_{зр})_{пор} = e + 6{,}65 \cdot 10^{-8} (1 + \xi_B)\,\alpha^2 B_\Phi. \qquad (1\text{-}44а)$$

Исследование параметров, входящих в (1-44а), начнем с величины e. В условиях темновой адаптации ($B_\Phi = 0$) величина e численно равна пороговой освещенности зрачка наблюдателя $e_0 = 2{,}1 \cdot 10^{-9}$ *лк*. Так как эта величина определяет эффективно преобразованную мощность порогового излучения, следует предполагать ее зависимость от яркости фона. Эта зависимость определяется уменьшением эффективности светового потока, падающего на зрачок наблюдателя по мере роста яркости адаптации вследствие уменьшения концентрации молекул фотореагентов, а также увеличения поглощения фотонов клетками пигмента. Обе указанные причины, а также уменьшение площади зрачка глаза вызывают увеличение e с ростом яркости. Для исследования этой зависимости рассмотрим (1-44) применительно к условиям обнаружения черного объекта ($B_0 = 0$) на светлом фоне. В этих условиях (1-44) примет следующий вид:

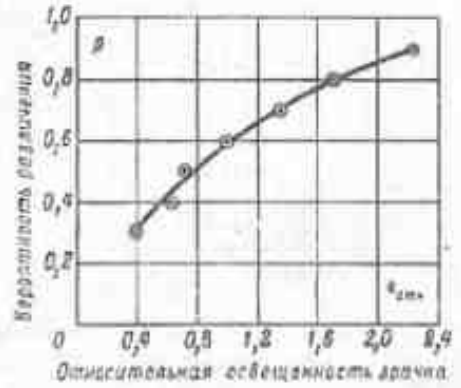


Рис. 1-46.

$$e = (1 - \xi_B)\,B_\Phi \omega = 6{,}65 \cdot 10^{-8} (1 - \xi_B)\,\alpha^2 B_\Phi, \qquad (1\text{-}44б)$$

так как при $B_0 = 0$ получим $\Delta B = B_\Phi$.

Вследствие того, что для $B_\Phi \geqslant 10^{-4}$ *нт* минимальное значение порогового контраста $\xi \ll 1$, можно считать отношение $\frac{e}{B_\Phi} = \omega$, где $\omega = 6{,}65 \cdot 10^{-8}\alpha^2$ — телесный угол черного пятна, обнаруживаемого с заданной вероятностью на белом фоне с яркостью B_Φ.

Пользуясь средними данными зависимости разрешаемого угла от яркости при $k = 1$, можно получить изменение e в зависимости от B_Φ (табл. 5).

Используя средние данные (рис. 1-44) зависимости $\xi_B = f(B_ф)$, можно исследовать с помощью (1-44а) зависимость порогового углового размера изображения точечного источника $\alpha_{с.т}$ на сетчатой оболочке глаза наблюдателя от яркости фона. Результаты расчета $\alpha_{с.т}$ (табл. 5) показывают рост размера изображения на сетчатке светящей точки при уменьшении яркости адаптации, что полностью координируется с экспериментальными данными увеличения зоны действия закона Рикко при уменьшении яркости адаптации (рис. 1-47).

Таблица 5

Параметры порогового уровня зрения

$B_ф$, *нт*	ξ_B	$(E_{зр})_{пор}$, *лк*	$\alpha_{с.т}$, *мин*	c, *лк*
10^{-5}	0,8	$1{,}8\cdot10^{-9}$	10	$2{,}4\cdot10^{-9}$
10^{-4}	0,2	$3{,}5\cdot10^{-9}$	10	$2{,}9\cdot10^{-9}$
10^{-3}	0,09	$1\cdot10^{-8}$	8	$4\cdot10^{-9}$
10^{-2}	0,04	$6{,}4\cdot10^{-8}$	3,5	$7{,}5\cdot10^{-8}$
10^{-1}	0,015	$1\cdot10^{-7}$	1,3	$2{,}1\cdot10^{-8}$
1	0,01	$2\cdot10^{-7}$	0,5	$8\cdot10^{-8}$
10	0,008	$6\cdot10^{-7}$	0,45	$4{,}4\cdot10^{-7}$
100	0,0075	$4\cdot10^{-6}$	0,4	$2{,}8\cdot10^{-6}$
1 000	0,007	$3\cdot10^{-5}$	0,4	$2{,}2\cdot10^{-5}$

Расчет пороговой освещенности на зрачке наблюдателя $(E_{зр})_{пор}$, создаваемой точечным источником света, в практике светосигнальной техники производят, пользуясь эмпирическим уравнением Гехта. В этом уравнении пороговая освещенность зрачка определена с вероятностью обнаружения $p = 0{,}98$ для белого огня ($T_ц = 2360°$ К):

$$(E_{зр})_{пор} = a\,(1 + \sqrt{bB_ф})^2, \qquad (1\text{-}45)$$

где параметры уравнения a и b различны для колбочкового и палочкового аппаратов:

для колбочкового аппарата	для палочкового аппарата
для $B \leqslant 0{,}01$ *нт*	для $B \geqslant 0{,}1$ *нт*
$a = 1{,}5\cdot10^{-9}$ *лк*;	$a = 7\cdot10^{-4}$ *лк*;
$b = 4\,000$ *нт*$^{-1}$	$b = 0{,}4$ *нт*$^{-1}$

Кривая $(E_{зр})_{пор} = f(B_ф)$, построенная по точкам, рассчитанным с помощью (1-45), приведена на рис. 1-48. На этом графике приведены также результаты экспериментов Блэкуэлла, Грина и Лангмюра с Вестендорфом, а также нанесены точки, рассчитанные по (1-44а).

Достаточно удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и расчетных значений $(E_{зр})_{пор}$ по эмпири-

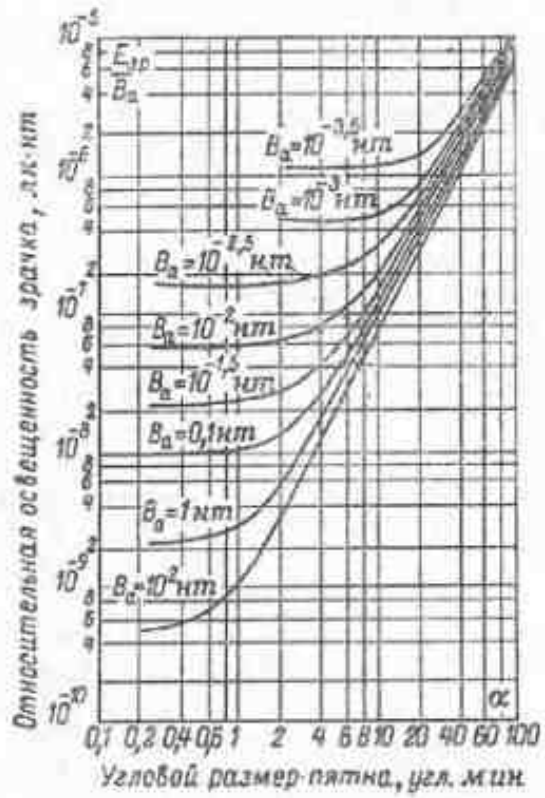


Рис. 1-47.

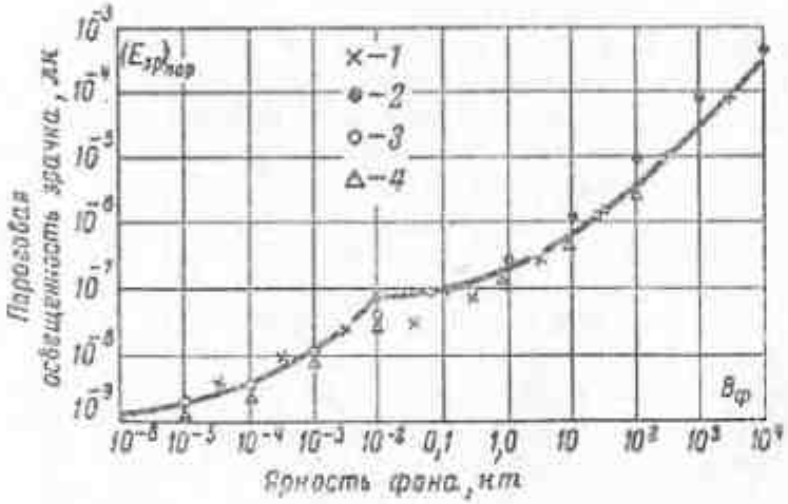


Рис. 1-48.

1—по Лэнгмюру и Вестендорфу; 2—по Грину; 3—по Блэкуэллу; 4—расчетные значения по уравнению (1-44а).

ческим уравнениям Болдырева и Гехта позволяет сделать вывод о достаточной для практики точности (1-44а) и (1-45). Наличие двух ветвей кривой $(E_{эф})_{пор} = f(B_ф)$ следует объяснить двойственностью световоспринимающего аппарата.

Методика измерения $\Delta B_{пор}$. Основная трудность измерения пороговой разности яркости заключается в необходимости определения величины, численно равной погрешности визуального светового измерения. Для избежания больших ошибок измерение величины ΔB осуществляется косвенными методами. Измерению подлежит некоторая величина, чаще всего механическая, однозначно определяющая переменную яркость одного из полей сравнения (тест-объект). Выбор этой величины зависит от принятого способа регулирования яркости тест-объекта. Регулирование яркости тест-объекта возможно:

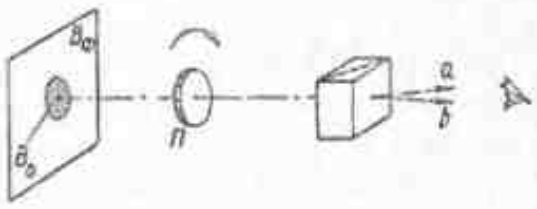


Рис. 1-49.

а) изменением расстояния от источника света до освещаемой поверхности теста;

б) изменением площади отверстия диафрагмы, расположенной между поверхностью теста и источником света больших размеров (рассеивающее стекло);

в) введением клинового фильтра по пути пучка лучей, освещающего поверхность теста;

г) поляризацией изображения теста;

д) изменением средней (эффективной) яркости тест-объекта периодически кратковременно с частотой выше критической, появляющегося в поле зрения наблюдателя.

Поляризационный способ изменения яркости тест-объекта основан на оптическом совмещении его с фоном при наблюдении через двупреломляющую призму и поляроид [Л. 60]. Наблюдатель видит два изображения объектов, образованные поляризованными пучками лучей a и b (рис. 1-49). Наблюдая эти два поляризованных изображения через поляроид, возможно поворотом поляроида $П$ ослаблять одно из них с одновременным усилением второго. Как известно, согласно закону Малюса (ч. 1, § 2-17) яркость фона, видимого через поляроид и двупреломляющую призму, не будет зависеть от взаимного расположения плоскостей поляризации поляроида и призмы:

$$B_ф' = B_ф \tau \cos^2 \varphi + B_ф \tau \sin^2 \varphi = \tau B_ф,$$

где φ — угол между плоскостями поляризации призмы и поляроида.

Яркость теста, изображение которого совместится с изображением фона, соответственно определится как

$$B_0' = B_ф \tau \sin^2 \varphi + B_0 \tau \cos^2 \varphi.$$

Контраст объекта наблюдения, видимого через поляроид и двупреломляющую призму, будет равен:

$$k' = \frac{B_0' - B_ф'}{B_ф'} = \frac{\tau B_ф \sin^2 \varphi + \tau B_0 \cos^2 \varphi - \tau B_ф}{\tau B_ф} = k \cos^2 \varphi. \quad (1\text{-}46)$$

Изменяя угол поворота поляроида φ, можно уменьшить значение контраста до порогового значения. Градуировка шкалы угла поворота поляроида определяется уравнением (1-46).

Изменение контраста тест-объекта с фоном методом регулирования средней яркости тест-объекта обычно осуществляется с помощью вращающегося диска, в плоскости которого имеется сектор с коэффициентом отражения, иным, чем у диска (рис. 1-50). Вращающийся со сверхкритическим числом оборотов сектор будет виден наблюдателю (§ 2-12) в виде диска меньшего радиуса, равного внешнему радиусу сектора (рис. 1-50,*а*), с яркостью, средней между значениями яркости диска $B_д$ и $B_с$ сектора:

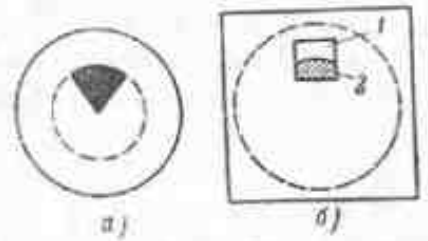


Рис. 1-50.

$$B_0 = \frac{\alpha B_с + (360 - \alpha) B_д}{360}, \quad (1\text{-}47)$$

где α — угол раскрытия сектора, *град*.

Располагая перед вращающимся диском непрозрачный экран с диафрагмой (рис. 1-50,*б*), будем видеть два поля сравнения *1* и *2* с яркостями $B_д$ и B_0. Контраст яркости этих полей определится согласно (1-47):

$$k = \frac{B_0 - B_д}{B_д} = \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{B_с - B_д}{B_д}. \quad (1\text{-}47а)$$

Как можно видеть из (1-47а), при измерении пороговой разности яркости непосредственному определению подлежит угол раскрытия сектора α, уменьшение которого приводит к снижению контраста полей сравнения [Л. 61].

В установках с регулированием яркости тест-объекта изменением расстояния источника света (рис. 1-51), раскрытия диафрагмы и положения клинового фильтра возможно измерение пороговой разности яркости в условиях положительного

($B_o > B_\phi$) и отрицательного ($B_o < B_\phi$) контрастов. Имея яркость одного из полей сравнения постоянной B_ϕ, можно установить четыре пороговых предела яркости тест-объекта (рис. 1-51), два из которых устанавливаются при увеличении B_o и два — при уменьшении. Начиная опыт с отчетливо заметной отрицательной разности яркости $B_o - B_\phi$, примем $B_o = B_2 \gg B_\phi$ и плавно увеличим B_o

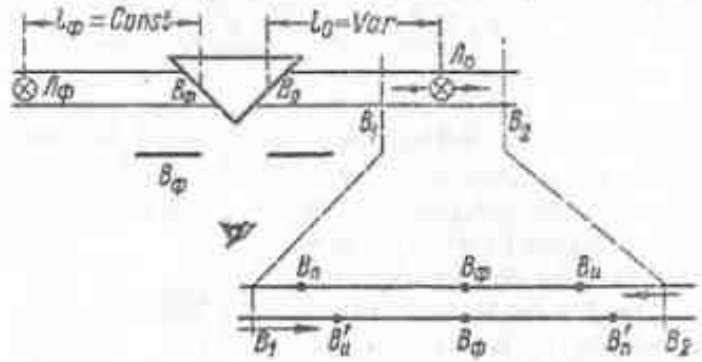


Рис. 1-51.

до некоторого значения B_u, при котором объект становится впервые незаметным. Продолжая дальнейшее увеличение яркости B_o, проходим положение равенства яркости $B_o = B_\phi$ (фотометрическое равновесие) и обнаруживаем объект более светлым по сравнению с фоном при яркости B_n. Установив порог на посветление и увеличив еще несколько яркость объекта сверх B_n до $B_o \geqslant B_1$, начнем уменьшать ее до момента исчезновения объекта, соответствующего яркости B_u'. Продолжая дальнейшее уменьшение яркости, вновь пройдем фотометрическое равновесие и, наконец, обнаружим появление объекта более темного, чем фон при B_n'.

Обычно имеет место (рис. 1-51) $B_u > B_n'$ и $B_n > B_u'$. Величина пороговой разности яркости для положительного контраста $B_o > B_\phi$ определится как

$$\Delta B_+ = \frac{\overline{B}_n + \overline{B}_u'}{2} - B_\phi \qquad (1\text{-}48а)$$

и для отрицательного контраста $B_o < B_\phi$

$$\Delta B_- = \frac{\overline{B}_u + \overline{B}_n'}{2} - B_\phi. \qquad (1\text{-}48б)$$

При необходимости можно отдельно определить значение пороговой яркости на появление и на исчезновение.

Используя метод постоянных стимулов, принимают n значений яркости объекта больших и меньших постоянной яркости фона и предъявляют их многократно в разбивку наблюдателю в оптическом контакте с полем фона. Наблюдатель, сопоставляя яркость смежных полей объекта и фона, может дать на каждое предъявление три ответа: больше, равно и меньше. На основе этих ответов подсчитывается вероятность правильного обнаружения объекта более светлым, более темным и одинаковым по сравнению с яркостью фона. На основе опытных значений вероятности обнаружения $B_o \neq B_\phi$ строят три кривые $p = f(B_i)$, из которых две S-образные (рис. 1-28) и одна колоколообразная (рис. 1-27). При отсутствии систематических ошибок измерения вероятность ответа „больше" и „меньше" одинакова для фотометрического равенства $B_o = B_\phi$, а вероятность обнаружения равенства яркостей объекта и фона при этом максимальна. Для яркостей $B_o < B_\phi$ растет вероятность ответов „больше", а для $B_o > B_\phi$ — наоборот. Построение трех кривых вероятности можно заменить подбором нормальных функций вероятности (1-21) по результатам эксперимента.

При подборе функции $p = f(B_i)$ из числа нормальных кривых вероятности для различных значений дисперсии измеряемой величины σ количество предъявляемых яркостей n должно быть ограничено семью—девятью (по три-четыре на положительный и отрицательный контрасты и одно для $B_\phi = B_o$).

Пользуясь этими кривыми, определяются пороговые разности яркости по заданным условиям вероятности обнаружения.

Светлота и яркость излучения. Участие в зрительном процессе центральной нервной системы, наличие в нем обратных связей между центральным и периферическим звеньями зрительного анализатора, а также многокомпонентность световоспринимающего аппарата приводят к зависимости функции видности однородных излучений от условий возбуждения. Эта зависимость обнаруживается при вариациях яркости и спектрального состава в широких диапазонах, а также во всех разновидностях неустановившихся зрительных процессов. Как показал многолетний опыт пользования световыми величинами, с некоторым приближением можно принять, что в установившихся процессах дневного зрения $B \geqslant 10$ *нт* любому значению яркости B_i излучения любого спектрального состава и любой цветности соответствует одно единственное значение светлоты S_i. Это положение о соответствии светлоты и яркости достоверно с той степенью точности, с какой мы определяем стандартную кривую видности излучения [Л. 62], считая ее неизменной на том диапазоне изменения яркости, на котором приняты однозначные соответствия между S_i и B_i. В условиях

установившегося сумеречного и ночного зрения светлота, вызываемая любым излучением, однозначно определяется эквивалентной яркостью (ч. 1, § 1-39) с аналогичной степенью точности. Соответствие светлоты и яркости позволило условно принять в качестве количественных характеристик зрительного ощущения световые величины излучения, причем эквивалентной заменой светлоты условно принята яркость. Условная эквивалентность яркости и светлоты принята потому, что яркость характеризует освещенность сетчатки в зоне изображения, определяющую интенсивность фотохимического этапа зрительного процесса (ч. 1, § 1-34). Однако уровень зрительного ощущения зависит не только от яркости поля зрения. Концентрация молекул фотореагентов, размер входного зрачка глаза, расположение зерен пигментного слоя сетчатки, уровень возбуждения и чувствительности центрального звена органа зрения и другие причины также влияют на светлоту. Все перечисленные причины, влияющие на светлоту, зависят от освещенности сетчатой оболочки в зоне изображения, в результате чего функция $S=f(B)$ сложна и нелинейна. Нелинейность зависимости светлоты от яркости действующего на глаз излучения определяет условность применения яркости в качестве количественной характеристики зрительного ощущения. В результате этого не отношение яркостей, а разность светлот, вызываемых ими, определяет характер и длительность большинства неустановившихся зрительных процессов, а также интенсивность индукции зрительных ощущений. Так же не отношение яркостей, а разность светлот объекта наблюдения и фона определяет их контраст, в особенности если объект отличается от фона не только яркостью, но и цветностью.

Невозможность непосредственного измерения зрительного ощущения заставляет применять косвенные методы количественной оценки светлоты. К числу таких методов в первую очередь следует отнести метод оценки светлоты частотой импульсов тока действия в волокнах зрительного нерва, предложенный С. О. Майзелем [Л. 63]. Как показывают современные электрофизиологические исследования [Л. 24] и косвенные эксперименты [Л. 63], частота импульсов тока действия характеризует уровень зрительного ощущения. Оценка светлоты частотой импульсов тока действия отражает непосредственную реакцию органа зрения на излучение, поглощенное сетчаткой, однако до настоящего времени не доказано, что частота импульсов достаточно полно характеризует все звенья сложного процесса преобразования излучения в зрительное ощущение.

К этому следует добавить, что в практических условиях этот критерий оценки светлоты неприемлем вследствие отсутствия методов непосредственного измерения частоты импульсов тока действия в волокнах зрительного нерва без введения в него микроэлектродов. Возможно, что достоверное установление роли отдельных волн электроретинограммы позволит в дальнейшем использовать электрофизиологические методы для количественной оценки зрительного ощущения.

Для разработки практически приемлемого критерия оценки светлоты был использован метод пороговых приращений [Л. 64].

В этом методе реакцию любого приемника излучения, неподдающуюся прямому измерению, принято оценивать числом пороговых приращений измеряемой эффективной величины от нуля до заданного ее значения. Согласно этому методу светлота определяется эффективной яркостью (ч. 1, § 1-39), оцениваемой числом пороговых разностей яркости от нулевого до заданного значения яркости:

$$S_i = \int_0^{B_i} \frac{dB}{\Delta B_{пор}}, \qquad (1\text{-}49)$$

где $\Delta B_{пор}$ — пороговая разность яркости;

S_i и B_i — светлота и яркость исследуемого излучения.

Решая (1-49) и (1-41) совместно, получим расчетное уравнение светлоты для различных диапазонов изменения яркости:

а) для ночного зрения

$$S_i = b_1 \int_0^{B_i} \frac{dB}{B^{a_1}} = \frac{b_1}{1-a_1} B_i^{1-a_1} = 800 B_i^{0,5}; \qquad (1\text{-}49а)$$

б) для сумеречного зрения

$$S_i = S_{B=0,01} + \frac{b_2}{1-a_2}(B_i^{1-a_2} - 0{,}01^{1-a_2}) =$$

$$= 26 + 400\,(B_i^{0,3} - 0{,}25); \qquad (1\text{-}49б)$$

в) для дневного зрения

$$S_i = S_{B=10} = \frac{b_3}{1-a_3}(B_i^{1-a_3} - 1) =$$

$$= 780 + 6\,000\,(B_i^{0,02} - 1{,}05), \qquad (1\text{-}49в)$$

где согласно табл. 3 значения параметров a и b (1-44) определяется: $a_1 = 0{,}5$ и $b_1 = 400$; $a_2 = 0{,}7$ и $b_2 = 120$; $a_3 = 0{,}98$ и $b_3 = 120$.

Ле Гран [Л. 10], аналогично определяя светлоту уравнением (1-49), пользуется для малых яркостей $B \leqslant 2 \cdot 10^{-3}$ *нт* (ночное зрение) эмпирическим уравнением Блэкуэлла [Л. 50].

Решая совместно уравнения (1-49) и (1-38), получим уравнение светлоты излучений малой яркости $B \leqslant 2 \cdot 10^{-3}$ *нт*:

$$S_i = 10^6 \int_0^{B_i} \frac{dB}{1 + (B/b)^{0,63}}. \qquad (1\text{-}50)$$

Вследствие трудности интегрирования (1-50) Ле Гран определяет число пороговых приращений яркости от абсолютного порога до $B=10^{-4}$ *нт* непосредственным расчетом ΔB с помощью (1-40). Согласно этому расчету светлота, соответствующая яркости $B=10^{-4}$ *нт*, равна 35 порогам. При этом (1-50) примет вид:

$$S_i=35+708\int_{10^{-4}}^{B_i}\frac{dB}{B^{0,63}}=35+910B^{0,37}. \qquad (1\text{-}50a)$$

Для расчета светлоты в условиях сумеречного и дневного зрения Ле Гран [Л. 11] пользуется эмпирическим уравнением (1-37) П. Муна и Д. Спенсер [Л. 45]. Согласно этому уравнению светлота в условиях сумеречного и дневного зрения по Ле Грану определится как

$$S_i=185+\frac{1}{\xi_{мин}}\int_{2\cdot10^{-3}}^{B_i}\frac{dB}{(a+\sqrt{B})^2}=$$

$$=185+\frac{2}{\xi_{мин}}\left[\frac{a}{a+\sqrt{B}}+\ln(a+\sqrt{B})\right]_{2\cdot10^{-3}}^{B_i}. \qquad (1\text{-}51)$$

Для больших значений яркости B_i, когда можно пренебречь величиной $a=0{,}456$ по сравнению с $\sqrt{B_i}$, уравнение (1-51) значительно упрощается[1]:

$$S_i=185+\frac{2}{\xi_{мин}}\left(\ln\frac{\sqrt{B_i}}{a}-1\right). \qquad (1\text{-}51a)$$

Приближенное и наиболее простое решение этого вопроса можно получить, принимая постоянным пороговый контраст на всем исследуемом диапазоне изменения яркости. Принят это приближение, напишем согласно (1-49) разность светлот, определяющую разницу уровней зрительного ощущения от излучения с яркостями B_1 и B_i:

$$\Delta S_i=S_i-S_1=\frac{1}{k_{пор}}\int_{B_1}^{B_i}\frac{dB}{B}=$$

$$=\frac{1}{k_{пор}}(\ln B_i-\ln B_1). \qquad (1\text{-}52)$$

Полученное выражение количественной характеристики ощущения от уровня сигнала, поступающего из внешнего мира, впер-

[1] Уравнение (1-51а) получено, принимая $a\ll\sqrt{B_i}$, а также $a\gg\sqrt{2\cdot10^{-3}}$.

вые было сформулировано Г. Фехнером (1801—1887) на основе результатов эксперимента Э. Вебера (1795—1878). Это выражение, определяющее пропорциональность между светлотой и логарифмом яркости, принято называть *законом Вебера—Фехнера* (ч. 1, § 1-39):

$$S_i=S_1+\frac{2{,}3}{k_{пор}}\lg\frac{B_i}{B_1}. \qquad (1\text{-}52a)$$

Закон Вебера — Фехнера приближенно описывает зависимость $S=f(B)$ с тем меньшей погрешностью, чем меньше изменяется пороговый контраст яркости на том диапазоне, на котором производится сравнение светлот. С достаточной для практики точностью закон Вебера — Фехнера можно применять для всего диапазона дневного зрения ($B\geqslant10$ *нт*).

Новый метод определения светлоты был предложен Р. Гопкинсоном [Л. 65]. Этот метод основан на непосредственном сопоставлении светлот двух разноярких излучений. Непосредственное сопоставление светлот производилось в опытах Гопкинсона по памяти двумя способами. В первой серии исследования зависимости $S_i=f(B_i)$ наблюдателю показывались два светлых пятна, отличающихся друг от друга на пять пороговых разностей яркости. Следовательно, светлоты этих пятен были S_1 и $S_2=S_1+5$.

После ознакомления с пятипороговой разностью яркости сравниваемых пятен наблюдателю предлагали увеличить светлоту первого пятна до величины, превышающей светлоту второго пятна на пять единиц. Следовательно, наблюдателю предлагалось по памяти установить яркость B_3, превышающую яркость B_2 на пять пороговых разностей ΔB. После этого наблюдателю предлагалось вновь повысить яркость более темного поля сравнения (второго) на десять пороговых разностей, добиваясь вновь различия светлот на пять единиц $S_4=S_2+5=S_2+10=S_1+15$. Продолжая попеременное увеличение яркости сравниваемых световых пятен на одинаковый прирост светлоты $\Delta S=10$, наблюдатели установили значения яркостей, соответствующие арифметическому ряду светлоты с разностью $\Delta S=5$.

Во второй серии исследований Гопкинсон предлагал наблюдателям производить непосредственное сравнение по памяти светлот разноярких поверхностей. Для этой цели было выбрано десять значений яркости в пределах от $9\cdot10^{-3}$ до $2\cdot10^{3}$ *нт*, одна из которых принималась за эталон светлоты, условно оцениваемый в 100 единиц. Наблюдатель должен был отвечать, скольким единицам светлоты соответствует любая из десяти яркостей, появившаяся в его поле зрения после предварительного визирования эталона (рис. 1-52). Таким образом, наблюдатель должен был определять по памяти, во сколько раз тем-

Таблица 6

Светлота в функции яркости

Яркость, нт	Значения светлоты S							
	по Майзелю [Л. 63]		по Ле Грану [Л. 10]		по Мешкову [Л. 45, 64]		по Гопкинсону [Л. 65]	
	абсолютное	относительное	абсолютное	относительное	абсолютное	относительное	абсолютное	относительное
10^{-3}	—	—	105	0,29	26	0,072	—	0,125
1	25	1,0	364	1,0	380	1,0	—	1
10^3	120	4,8	1 175	3,24	1 380	3,53	—	8,0

нее или светлее наблюдаемая им поверхность по сравнению с эталоном.

Статистическая обработка результатов этих исследований позволила Гопкинсону установить зависимость между светлотой и яркостью, аналогичную (1-49):

$$S_t = nB_t^m, \qquad (1\text{-}53)$$

где параметр m по Гопкинсону изменяется от 0,3 до 1,0. Для сравнения различных методов определения светлоты сопоставим результаты расчета и эксперимента по данным различных авторов (табл. 6). Сопоставляя данные табл. 6, можно сделать следующие выводы:

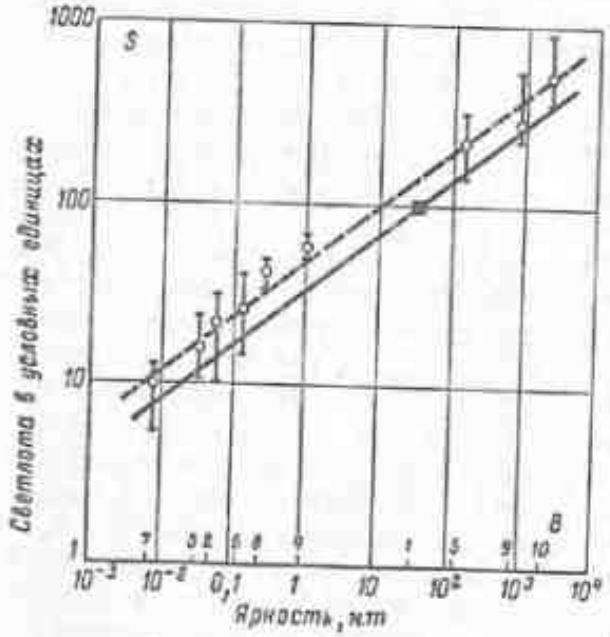


Рис. 1-52.

1. Рост светлоты происходит медленнее роста яркости. В среднем тысячекратному изменению яркости соответствует лишь 3,5—8-кратное увеличение светлоты.

2. Несмотря на различие методов определения светлоты, расчет светлоты с помощью уравнений, предложенных различными авторами, дает сопоставимые результаты.

1-9. Различимость формы и расстояния

Острота различения нее измерение. Обнаружение предмета в поле зрения является первым и простейшим этапом зрительного процесса. При зрительном опознавании

предмета наблюдатель не только выделяет предмет относительно фона, но также различает его форму. Определение формы объекта связано с различением его деталей. Как известно (§ 1-5), способность зрительного анализатора различать мелкие детали характеризуется разрешаемым углом и величиной, обратной этому углу, — остротой различения, определяемой (1-16). Наибольшей остротой различения зрительный анализатор обладает в центральной ямке сетчатки, где она достигает $S_\alpha = 2{,}5$ при наиболее благоприятных условиях ($B_\Phi = 10^4$ *нт* и $k = 1$). По мере удаления изображения объекта наблюдения от центральной ямки острота различения дневного зрения резко

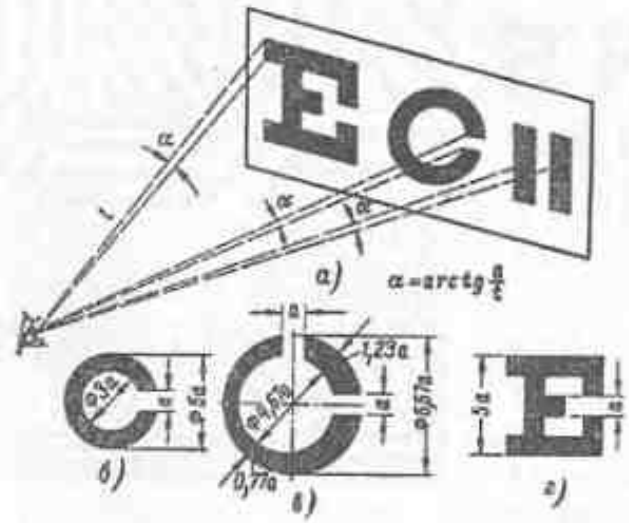


Рис. 1-53.

падает, достигая 0,1 максимального значения в зоне около 20°. Острота различения в условиях ночного зрения очень невелика, и максимум ее не превышает $S_\alpha = 0{,}05$ в зоне 10—20° от центральной ямки сетчатки. Обе указанные особенности следует объяснить максимальной индивидуализацией связей клеток коры головного мозга с колбочками, концентрация которых максимальна в центральной ямке сетчатки, и группировкой по 100—200 палочек на одном волокне зрительного нерва.

Тест-объектами для измерения разрешаемого угла могут служить различные фигуры и буквы, зрительное определение формы которых является задачей наблюдателя (рис. 1-53,*а*). Международным тестом является *кольцо Ландольта*, пропорции которого определяются стандартными соотношениями (рис. 1-53,*б*). Для контроля правильности ответа наблюдателей кольцо Ландольта следует показывать с различным направлением разрыва и требовать ответа, в какую сторону (вверх, вниз, вправо, влево) он обращен. Возможность «угадывания»

направления разрыва по косвенному признаку кажущегося утончения кольца в области разрыва заставили В. Б. Вейнберга [Л. 66] предложить двухразрывное кольцо с увеличенной толщиной в области разрыва (рис. 1-53,*в*).

Вследствие того, что плавное изменение углового размера объекта наблюдения требует применения дополнительной оптики с переменным коэффициентом увеличения, измерение разрешаемого угла чаще всего осуществляется статистическим методом. Для быстрого определения остроты различения пользуют-

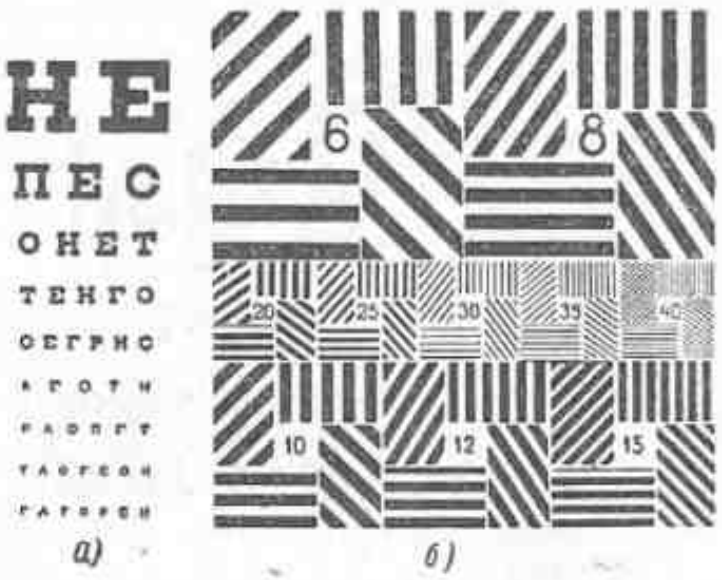


Рис. 1-54.

ся таблицами (рис. 1-54,*а*), каждая сторона которых содержит буквы или знаки определенного размера, или оптическими мирами (рис. 1-54,*б*), различение штрихов которых также позволяет определить разрешаемый угол.

Результаты измерения разрешаемого угла с помощью теста Ландольта, проведенные многими авторами[1] для различных уровней яркости фона, показали зависимость остроты различения от яркости. На рис. 1-55 приведены экспериментальные кривые $S_{\text{а}} = f(B_{\text{ф}})$ для максимального отрицательного контраста $k = 0{,}96$ (черный объект на белом фоне). Эти кривые показывают рост остроты различения пропорционально логарифму яр-

[1] Измерения разрешаемого угла в функции яркости проведены Кенигом (1897), Гехтом (1928), Коббом и Моссом (1928), Литто (1929—1932), Раутианом и Пинегиным 1934), Зидентопфом (1941), Муном и Спенсер (1944), Гассовским, Булановой и Эйно (1946) и др.

кости. Зависимость остроты различения от яркости записана Литто [Л. 10] эмпирическим уравнением

$$S_{\text{а}} = a + 0{,}49 \lg B_{\text{ф}}, \qquad (1\text{-}54)$$

где a — постоянная, зависящая от формы тест-объекта (для черного кольца Ландольта $a = 1{,}1$).

Муном и Спенсер [Л. 67] также было составлено эмпирическое уравнение, описывающее зависимость остроты различения кольца Ландольта с отрицательным контрастом, близким к единице,

$$S_{\text{а}} = (S_{\text{а}})_{\text{макс}} B_{\text{ф}} (0{,}28 + \sqrt[3]{B_{\text{ф}}})^{-3}, \qquad (1\text{-}55)$$

где $(S_{\text{а}})_{\text{макс}}$ — максимальное значение остроты различения для исследуемого тест-объекта.

Оба эмпирических уравнения $S_{\text{а}} = f(B_{\text{ф}})$ получены из условий измерения разрешаемого угла с вероятностью различения в пределах $p = 0{,}5 - 0{,}6$.

Расчетные значения остроты различения, найденные с помощью (1-54) и (1-55), изображены в тех же координатах (рис. 1-55). В пределах 0,1 — 100 *нт* оба уравнения достаточно хорошо описывают зависимость $S_{\text{а}} = f(B_{\text{ф}})$. В области больших яркостей $B_{\text{ф}} \geqslant 10^2$ *нт* более точные результаты обеспечивает уравнение Муна и Спенсер.

Как и следует ожидать, острота различения не одинакова для тест-объектов, обладающих различными контрастами (ч. I, § 3-22). Зависимость остроты различения от контраста объекта с фоном приведена на рис. 1-56 по данным Г. Н. Раутиана и Н. И. Пинегина [Л. 68]. Следует отметить близкую к линейной зависимость $S_{\text{а}} = f(\lg k_{\text{пор}})$ в области $k_{\text{пор}} \geqslant 0{,}15$.

Детальные измерения остроты различения на тест-объектах с различными отрицательными контрастами были проведены Фортэйном [Л. 69] с помощью 228 наблюдателей в области дневного зрения 1,3 *нт* $\leqslant B_{\text{ф}} \leqslant$ 1 300 *нт*. Результаты этих измерений достаточно точно описываются уравнением

$$\ln S_{\text{а}} = a + 2{,}17 \frac{\ln k - 1{,}57}{\ln B_{\text{ф}} + 3{,}96}, \qquad (1\text{-}56)$$

где a — постоянный коэффициент, варьировавший для различных наблюдателей в пределах 0,5 — 0,9.

Зависимость остроты от вероятности различения кольца Ландольта различного контраста с фоном детально исследована Г. Н. Раутианом и Н. И. Пинегиным. Согласно выводам из ре-

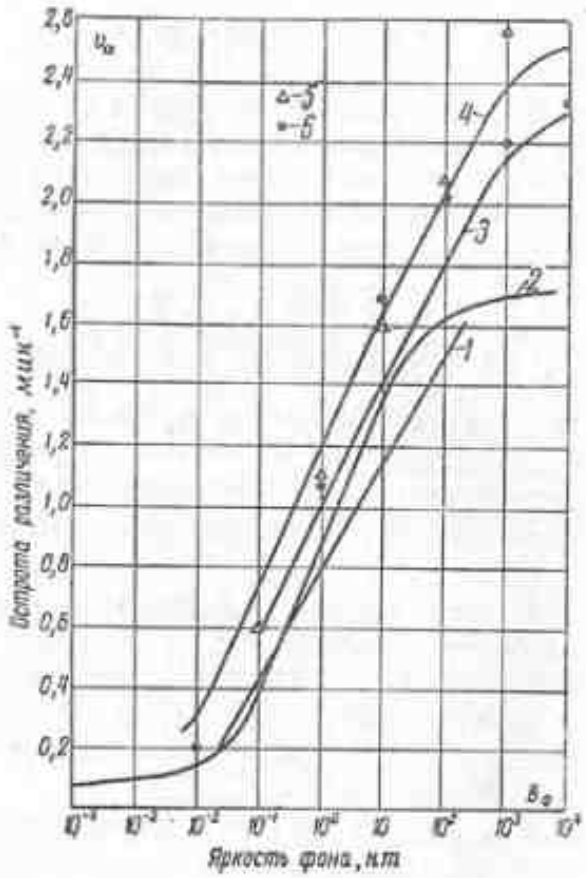


Рис. 1-55.

1—Кобб и Мосс (1928); *2*—Кенит—Гехт (1928); *3*—Литго (1929—1932); *4*—Зедентоф (1941). Расчетные данные: *5*—уравнение (1-54); *6*—уравнение (1-55).



Рис. 1-56.

зультатов этого исследования (рис. 1-57) повышение вероятности с 0,5 до практически полной достоверности $p = 0{,}98$ требует в среднем увеличения углового размера объекта наблюдения на 20—25%. Аналогичные результаты были получены Л. Н. Гассоаским [Л. 70] в области малых яркостей $B_ф \leqslant 0{,}1$ *нт*. В этой области яркости градиент роста остроты различения в зависимости от яркости значительно меньше, вследствие чего в эмпирических уравнениях (1-54) и (1-56) параметры должны быть изменены. Причиной этому является существенное увеличение роли палочкового аппарата в области $B_ф \leqslant 0{,}1$ *нт*. Этим выводам также вполне соответствуют результаты исследования остроты различения при малых уровнях яркости, полученные Коннером и Геноунгом [Л. 56].

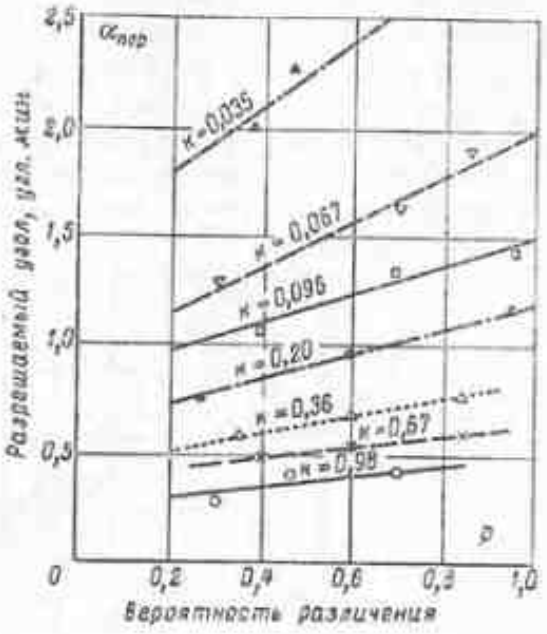


Рис. 1-57.

Закономерность изменения остроты различения светлых объектов на темном фоне в зависимости от его яркости по данным ряда исследователей (Вилькокс, Кленова, Музылев и др.) существенно отличается от ранее рассмотренной (рис. 1-58). По результатам исследования Ф. И. Музылева [Л. 73] форма кривых $S_α = f(B_ф)$ раздельного различения квадратов $α = 4'$ с контра-

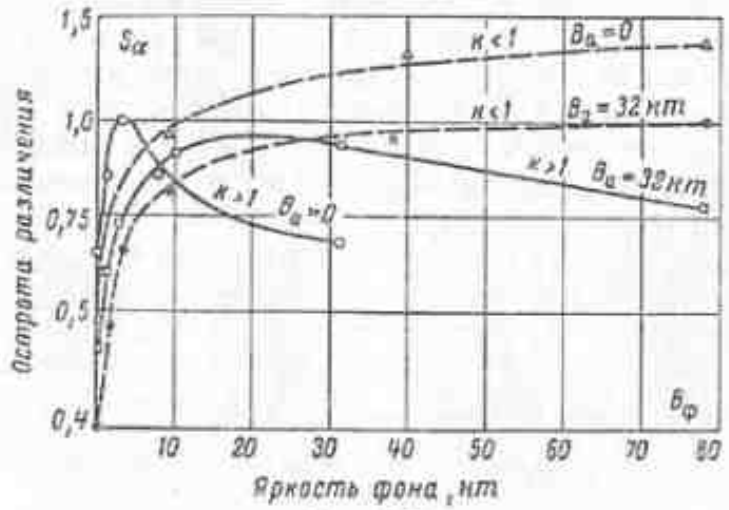


Рис. 1-58.

стом $k \approx 150$ не одинакова для разных условий адаптации (рис. 1-58). Различие формы кривой $S_\alpha = f(B_\Phi)$ для положительных и отрицательных контрастов следует объяснить иррадиацией, приводящей к кажущемуся уменьшению разрыва между двумя светлыми квадратами за счет кажущегося увеличения их размеров. Наиболее резкое отличие кривой $S_\alpha = f(B_\Phi)$ для раздельного различения светлых и черных квадратов наблюдается в условиях предварительной темновой адаптации (рис. 1-58), что подтверждает вывод о роли иррадиации.

Влияние формы теста на величину остроты различения видно из кривых $\alpha_{пор} = f(B_\Phi)$, построенных по результатам исследо-

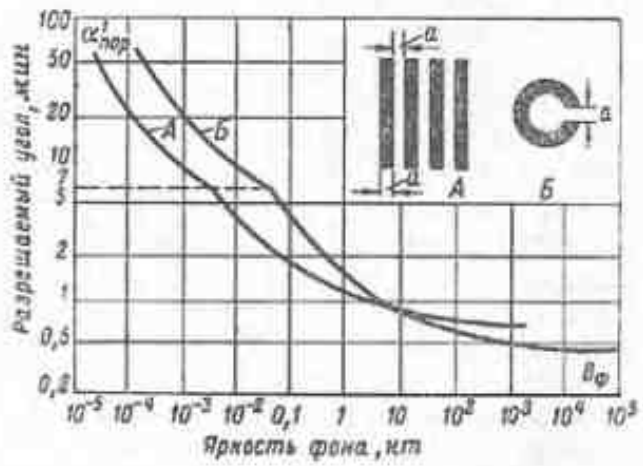


Рис. 1-59.

вания Шлаера и Кенига (рис. 1-59). По исследованиям Н. И. Пинегина и К. Н. Булановой [Л. 72] пороги обнаружения значительно отличаются от порогов различения. Для обнаружения теста простейшей формы (квадрат) с отрицательным контрастом в пределах 0,01—0,98 пороговый угловой размер в среднем в 3—4 раза меньше порогового размера того же квадрата при определении его расположения (рис. 1-60). Чем сложнее по форме тест, тем более высокими значениями параметров B_Φ, $\alpha_{пор}$ и $k_{пор}$ он должен обладать для обеспечения требуемой вероятности его различения.

Пороговое обнаружение светлых объектов сложной конфигурации (светлый силуэт самолета с различением направления полета) исследовано М. В. Румянцевым [Л. 59]. Соотношение пороговых параметров для этого случая в условиях $B_\Phi \leqslant 27$ *нт* описаны следующим эмпирическим уравнением:

$$(B_\Phi + \gamma)^n (\alpha - \alpha_{пред})^m (k_{пор} - \xi_{мин}) = c, \qquad (1\text{-}57)$$

где B_Φ и γ — яркость фона и собственного света сетчатки, *нт*;

α и $\alpha_{пред}$ — угловые размеры тест-объектов, определяемые размахом крыльев, и предельно минимальный $\alpha_{пред} = 0{,}29 \cdot 10^{-3}$ *рад*;

$k_{пор}$ и $\xi_{мин}$ — пороговые контрасты яркости: в заданных условиях и предельно минимальный;

n, m и c — параметры уравнения.

Для определения порога на появление по Румянцеву $n = 0{,}5$; $m = 1$ и $c = 0{,}084$ и для исчезновения — $n = 0{,}67$; $m = 0{,}5$ и $c = 0{,}068$.

Различие порогов на появление и исчезновение растет с уменьшением углового размера тест-объекта от 1,7 до 4,3-кратного.

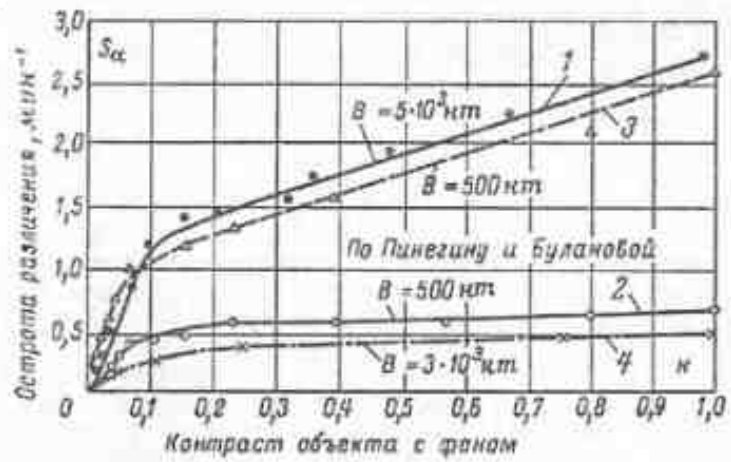


Рис. 1-60.

1 — различение колец Ландольта при $p = 0{,}1$; *2* — различение положения квадрата при повороте на 45; 22,5 и 67,5°; *3* — обнаружение квадрата; *4* — различение силуэта самолета с определением его „курса".

Многие исследователи (Кениг, Унтхоф, Лекиш, Корф-Петерсон, Боума, Арндт Дресслер, Нейштадт, Вейнберг, Лапинская и др.) изучали влияние спектрального состава на остроту различения. Исследования Боума [Л. 74] показали, что максимум остроты различения в условиях освещения объекта наблюдения однородным светом лежит в области желтого цвета с длиной волны 0,56—0,57 *мк*. Исследования Арндта и Дреслера [Л. 75, 76], проведенные в условиях дневного зрения, показали, что в свете ртутных и натриевых ламп острота различения выше, чем в свете ламп накаливания и неоновых ламп. Исследования остроты различения при цветном освещении в условиях малой яркости (рис. 1-61), проведенные В. Б. Вейнбергом и Е. А. Лапинской [Л. 77], наглядно демонстрируют необходимость пользования понятием эквивалентной яркости (ч. 1, § 1-38),

так как при малых уровнях яркости заметно увеличивается острота различения в синем свете — $\lambda=0{,}5$ *мк* и уменьшается в красном — $\lambda=0{,}65$ *мк*.

Механизм процесса различения. Экспериментальные данные показывают зависимость остроты различения не только от условий освещения (яркость фона, спектральный состав излучения) и характеристик тест-объекта (форма, яркостный контраст), но также и от степени дискретности световоспринимающего устройства глаза.

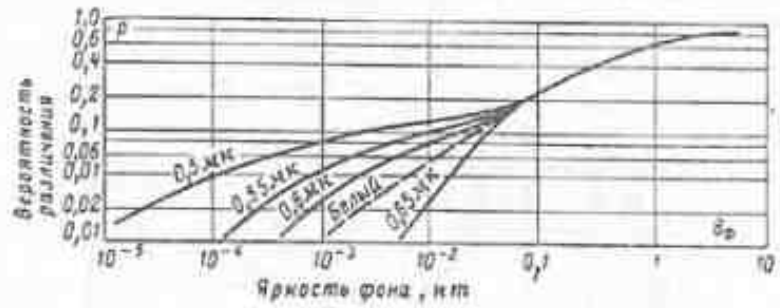


Рис. 1-61

Обнаружение зернистости сетчатки, определяемой конечными размерами ее светочувствительных клеток, послужило основой первого гипотетического обоснования механизма остроты различения. Согласно этой гипотезе раздельное видение двух черных точек (линий) на светлом фоне или двух светящихся точек на фоне меньшей яркости возможно лишь в тех случаях, когда их изображения на сетчатке разделены промежутком, содержащим не менее одного рецепторного поля (рис. 1-62). В центральной ямке сетчатки минимальное расстояние между раздельно воспринимаемыми изображениями определялось согласно этой гипотезе размером одной колбочки. Экспериментальным обоснованием этой геометрической гипотезы механизма остроты различения послужило численное совпадение разрешаемого угла двойной звезды и углового размера колбочки. Эта гипотеза не могла объяснить зависимости остроты различения от уровня яркости фона, от спектрального состава излучения и формы тест-объекта. В частности, измеренный Гехтом и Минцем [Л. 78] разрешаемый угол одиночной черной линии на светлом фоне в оптимальных условиях яркости $\alpha_{разр}=0{,}009'$ не соответствовал выводам из этой гипотезы.

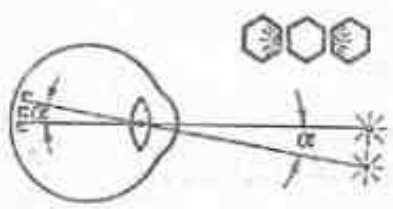


Рис. 1-62.

Все закономерности изменения остроты различения с успехом можно объяснить действительным распределением освещенности сетчатой оболочки глаза в зоне изображения тест-объектов. В отличие от рассмотренной геометрической гипотезы, предусматривающей равномерное распределение освещенности изображения равнояркого объекта, действительное распределение освещенности неравномерно вследствие дефектов оптической системы глаза (§ 1-2). Наличие дифракции и аберрации

излучения тест-объекта в виде двух светящих точек, изображения которых расположены на расстоянии a друг от друга (рис. 1-63), приводит к разности уровней возбуждения смежных рецепторных полей на величину

$$\Delta F = E_{макс}\sigma - E_{мин}\sigma = \sigma\Delta E, \qquad (1\text{-}58)$$

где σ — площадь рецепторного поля, равная в центральной ямке площади колбочки.

Как показывает опыт, разность уровней возбуждения становится пороговой при некотором значении отношения

$$\left(\frac{\Delta F}{F_\Phi}\right)_{пор} = \left(\frac{\Delta E}{E_\Phi}\right)_{пор} = c\left(\frac{\Delta B_{пор}}{B_\Phi}\right), \qquad (1\text{-}58а)$$

где F_Φ и E_Φ — световой поток, падающий на одно рецепторное поле, и освещенность сетчатки в зоне изображения фона;

c — коэффициент пропорциональности.

По данным проф. Г. Г. Слюсарева [Л. 79] при различении разрыва между темными полосками на светлом фоне относительная пороговая разность освещенности равна 0,1—0,15. Коэффициент пропорциональности c определяется формой кривых распределения освещенности сетчатки, следовательно, зависит от размера входного зрачка (§ 1-2). Вследствие того, что с ростом диаметра зрачка уменьшается дифракция и увеличивается аберрация, имеется оптимальное для остроты различения значение диаметра зрачка, равное 3—4 *мм*.

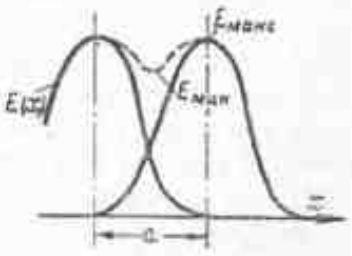


Рис. 1-63.

Изложенную теорию механизма остроты различения принято называть дифракционной потому, что при высоких уровнях яркости $B \geqslant 100$ *нт* и, следовательно, малом диаметре зрачка глаза $d \leqslant 4$ *мм* форма кривой освещенности сетчатки в основном определяется дифракцией.

Увеличение длины границы между раздельно воспринимаемыми тест-объектами, так же как и увеличение яркости фона, как известно, уменьшает пороговый контраст $k_{пор}$ и, следовательно, приводит к росту остроты различения при заданной форме и контрасте тест-объекта с фоном. Эти соображения, непосредственно вытекающие из (1-58), подчеркивают взаимосвязь остроты различения и контрастной чувствительности зрительного анализатора.

Согласно дифракционной теории механизма остроты различения уменьшение полихроматичности излучения, например переход от белого излучения лампы накаливания со сплошным

спектром к линейчатому излучению ртутной или натриевой газоразрядных ламп, должен приводить к увеличению остроты различения при одинаковой яркости фона. Это увеличение остроты различения определяется уменьшением хроматической аберрации.

Видимость через оптические приборы. Параметрами порогового различения предметов или тест-объектов, так же как и порогового обнаружения светлых или темных пятен, отличающихся от фона только яркостью, могут служить: яркость фона, угловой размер объекта наблюдения или его деталей и яркостный контраст с фоном. Улучшение условий видимости объекта наблюдения возможно путем увеличения любого из трех параметров зрительного процесса. Яркость фона и контраст объекта наблюдения с фоном определяются условиями освещения, которые следует выбирать оптимальными из всех возможных. При выбранных или заданных условиях освещения возможна вариация лишь углового размера объекта, осуществляемая приближением объекта к глазу наблюдателя или применением оптических приборов (лупы, микроскопы, зрительные трубы, бинокли и пр.). Применение оптических приборов для увеличения угловых размеров объектов наблюдения приводит к изменению освещенности сетчатки в зоне изображения и контраста объекта наблюдения с фоном.

Для исследования изменений, вносимых оптическим прибором, сопоставим параметры видения тест-объекта невооруженным глазом на расстоянии L и через оптический прибор с угловым увеличением γ на расстоянии γL. В сопоставляемых случаях размеры изображений тест-объекта на сетчатке будут одинаковы, однако условия видимости различными вследствие различия освещенности сетчатки в зоне изображения и контраста объекта с фоном. Освещенность сетчатки уменьшается вследствие ослабления излучения при прохождении через оптическую систему прибора и на большем пути от объекта до наблюдателя. Освещенность сетчатки может уменьшиться также вследствие неполного заполнения светом входного зрачка глаза при меньшем выходном зрачке оптического прибора:

$$E_{сн} = E_c \tau \varepsilon e^{-mcL(\gamma-1)}, \qquad (1\text{-}59)$$

где $E_{сн}$, E_c — освещенность сетчатки в зоне изображения с применением оптического прибора и при наблюдении невооруженным глазом;

τ — коэффициент пропускания оптического прибора;

m — молекулярный показатель ослабления среды;

c — объемная концентрация рассеивающих частиц;

$\varepsilon = \frac{s}{q}$ — отношение площадей выходного зрачка прибора и входного зрачка глаза наблюдателя[1].

Яркость изображения при этом изменяется соответственно

$$B_и = B \tau \varepsilon e^{-mcL(\gamma-1)}. \qquad (1\text{-}59а)$$

Контраст изображения объекта с фоном уменьшится в результате наложения на него равномерной яркости рассеянного средой излучения (ч. 1, § 2-28), а также яркости рассеянного в оптическом приборе излучения, возникающего в результате многократного отражения от преломляющих поверхностей линз и внутренней поверхности тубуса прибора:

$$k_и = k \frac{B'_ф \tau \varepsilon e^{-mcL(\gamma-1)}}{B'_ф \tau \varepsilon e^{-mcL(\gamma-1)} + B_р} = \alpha k, \qquad (1\text{-}60)$$

где k — контраст тест-объекта с фоном;

$k_и$ — контраст изображения;

$B_р = B_{р.с} + B_{р.п}$ — яркость рассеянного излучения средой $B_{р.с}$ и в приборе $B_{р.п}$.

В приборах с просветленной оптикой (ч. 1, § 2-21) яркость рассеянного в приборе излучения очень невелика и ее можно принять $B_{р.п} = 0$. Яркость рассеянного средой излучения следует учитывать лишь при больших значениях L (для чистого воздуха $L \geqslant 3$ *км*) или при высоких показателях рассеяния излучения средой.

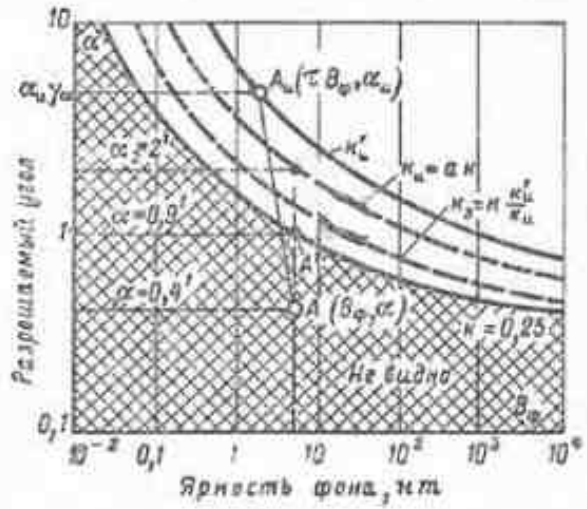


Рис. 1-64.

Эффект действия оптического прибора можно видеть на диаграмме семейства кривых $\alpha_{пор} = f(B_ф)$ для $k = \text{const}$ (рис. 1-64). Пусть заданный объект наблюдения и условия его освещения характеризуется следующими тремя параметрами $B_ф = 5$ *нт*, $\alpha = 0,4'$ и $k = 0,25$. Нанеся на диаграмму точку A (рис. 1-64) с координатами $\alpha = 0,4'$ и $B_ф = 5$ *нт*, увидим, что заданный объект не виден, так как точка A лежит ниже кривой $\alpha_{пор} = f(B_ф)$

[1] При $s \geqslant q$ величину отношения ε следует принимать равной единице, так как в этом случае световой поток, проникающий внутрь глаза, определяется площадью его входного зрачка.

для заданного контраста $k=0{,}25$. Для того чтобы впервые заметить или различить заданный объект без изменения его контраста и яркости, необходимо увеличить его угловой размер до значения, равного $\alpha_{пор}=0{,}9'$ (точка A'). Применяя оптический прибор с угловым увеличением $\gamma=12$, изменяющий яркость фона до $B_{фи}=\tau B_{ф}=1{,}7$ *нт* и угловой размер изображения объекта наблюдения до $\alpha_{и}=\gamma\alpha=4{,}8'$, получим на диаграмме новую точку $A_{и}$ с координатами $\alpha_{и}=4{,}8'$ и $B_{фи}=1{,}7$ *нт*. В том случае, если эта точка расположена над кривой $\alpha_{пор}=f(B_{ф})$, для значения контраста, равного согласно (1-60) $k_{и}=ak$, объект будет виден через оптический прибор (рис. 1-64). Вследствие того, что любой оптический прибор изменяет условия наблюдения ($B_{ф}$ и k), угловое увеличение γ не может полностью характеризовать эффективность его применения. В качестве характеристики эффективности оптического прибора проф. А. А. Гершун [Л. 80] ввел понятие о *физическом увеличении* прибора, показывающем, во сколько раз необходимо увеличить линейный размер объекта наблюдения, чтобы невооруженным глазом видеть его так же, как через оптический прибор. Принимая видимость объектов наблюдения одинаковой в том случае, когда для них одинаковы отношения контрастов к их пороговым значениям

$$V_{к}=\frac{k}{k_{пор}}=\frac{\Delta B}{\Delta B_{пор}}, \tag{1-61}$$

получим видимость заданного объекта через оптический прибор равной отношению контрастов $k_{и}$ и $k'_{и}$, где $k'_{и}$ — пороговый контраст изображения с угловым размером $\alpha_{и}$ и яркостью фона $B_{фи}=\tau B_{ф}$. Аналогичную видимость при наблюдении невооруженным глазом в условиях яркости $B_{ф}$ будем иметь для объекта с эквивалентным угловым размером $\alpha_{э}$, для которого пороговое значение контраста равно:

$$k_{пор}=\frac{k}{v_{к}}=\frac{kk'_{и}}{k_{и}}. \tag{1-61а}$$

Физическое увеличение определится отношением

$$a=\frac{\alpha_{э}}{\alpha},$$

всегда меньшим углового увеличения применяемого оптического прибора (в рассмотренном примере $a=5{,}0$). Из приведенного примера следует, что физическое увеличение определяется не только параметрами прибора, но также зависит от характеристик зрительной задачи и условий освещения. Для малых значений яркости физическое увеличение любого оптического прибора по А. А. Гершуну равно:

$$a=\gamma\sqrt{\tau e^{-mcL(\gamma-1)}}. \tag{1-62}$$

Это равенство определяется тем, что для яркостей $B_{ф}\leqslant 1$ *нт* с достаточной точностью при любых значениях контраста объекта наблюдения с фоном, согласно уравнению (1-57), разрешаемый угол обратно пропорционален $B_{ф}^{0,5}$.

Видимость сигнального точечного огня через оптический прибор определяется иными соотношениями. Как известно, пороговый режим видения точечного источника света определяется лишь двумя параметрами: пороговым блеском (§ 1-5) и яркостью фона. Блеск точечного источника увеличивается при рассматривании его через оптический прибор, так как величина блеска определяется полным световым потоком, проникающим внутрь глаза. Увеличение блеска определяется тем, что во всех оптических приборах площадь входного зрачка во много раз больше площади зрачка наблюдателя при любых условиях адаптации.

В качестве характеристики эффективности применения оптических приборов для обнаружения сигнальных точечных огней А. А. Гершун ввел понятие *оптического усиления*, определяемого отношением пороговых значений блеска при наблюдении сигнального огня невооруженным глазом и через прибор:

$$n=\frac{(E_{зр})_{пор}}{(E'_{зр})_{пор}}, \tag{1-63}$$

где $(E_{зр})_{пор}$ и $(E'_{зр})_{пор}$ — пороговые значения освещенности на зрачке глаза при наблюдении невооруженным глазом и на входном зрачке прибора при наблюдении через оптический прибор.

Подставляя значения порогового блеска, получим:

$$n=\frac{\tau_1^{L-L'}(L')^2}{L^2}, \tag{1-63а}$$

так как

$$(E_{зр})_{пор}=\frac{Ie^{-mcL}}{L^2} \text{ и } (E'_{зр})_{пор}=\frac{Ie^{-mcL'}}{(L')^2},$$

где I — значение силы света точечного источника по направлению к наблюдателю;

L и L' — расстояния от источника до наблюдателя, при которых источник виден на пороге невооруженным глазом и через оптический прибор;

m — молекулярный показатель ослабления излучения средой;

c — концентрация рассеивающих частиц;

$\tau_1 = e^{-mc}$ — прозрачность среды.

При известном оптическом усилении прибора можно определить предельную дальность видимости точечного огня через оптический прибор, пользуясь (1-63,а). Для этой цели необходимо знать прозрачность среды τ_1 и предельную дальность видимости огня невооруженным глазом. На рис. 1-65 приведены кривые $L'/L = f(n)$ для $\tau_1 = 0{,}8$ и двух значений L. Эти кривые показывают, что возможное увеличение дальности видения точечного огня при применении оптического прибора значительно меньше теоретического, которое при $\tau_1 = 1$ должно быть пропорциональным корню квадратному из величины оптического увеличения. Как и следует из (1-63a), действительное увеличение дальности видения тем меньше теоретического, чем больше L и чем меньше прозрачность τ_1.

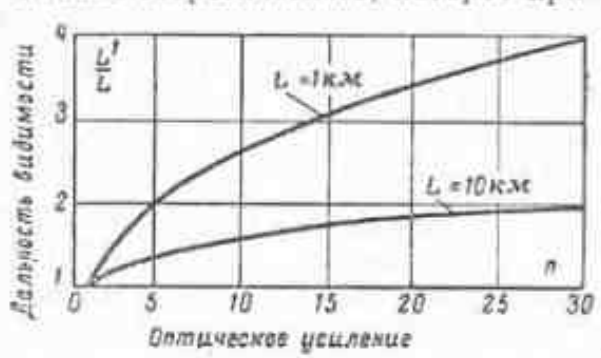


Рис. 1-65.

Острота стереоскопического зрения. Конечное расстояние между двумя глазами позволяет видеть наблюдаемый предмет с разных направлений, тем более различающихся, чем ближе к наблюдателю расположен предмет. Изображения наблюдаемого предмета на сетчатых оболочках каждого глаза получаются несколько различными. Это явление, называемое диспаратностью изображений, неодинаково для разноудаленных предметов.

Усилия, проявляемые организмом для слитного ощущения этих двух несколько различных изображений, не одинаковые для разноудаленных предметов, позволяют судить о расстоянии фиксируемого предмета от наблюдателя. Второе обстоятельство, позволяющее замечать разноудаленность предметов, являющееся также результатом согласованной работы двух глаз, заключается в конвергенции их оптических осей (§ 1-21), тем большей, чем ближе расположен наблюдаемый предмет.

Бинокулярное зрение, иначе называемое *стереоскопическим зрением*, позволяет судить не только о контуре наблюдаемого предмета, но и о его рельефе, что обеспечивает более полное его восприятие. Способность различать форму предмета не только

по контурам, но также и по рельефу его деталей является характерным свойством стереоскопического зрения. Стереоскопическое зрение позволяет производить оценку расстояний и размеров объектов наблюдения, следовательно, оно трехмерно.

Для выяснения роли конвергенции, аккомодации и диспаратности изображений на сетчатках двух глаз производились опыты различения рельефа предмета в течение короткого промежутка времени $t = 10^{-5} - 10^{-7}$ *сек*, значительно меньшего времени конвергенции [Л. 81]. Эти опыты показали способность бинокулярного различения рельефа предметов, следовательно, позволили считать наиболее существенным в механизме оценки третьего измерения диспаратность изображения. Роль конвергенции и аккомодации в этом процессе принято считать вспомогательной.

Порог глубинного зрения, называемый сокращенно *порогом глубины* (ч. 1, § 3-22), характеризуется минимальной разностью параллактических углов между двумя объектами наблюдения, воспринимаемыми с достаточной (заданной) вероятностью разноудаленными.

Величина порога глубины (рис. 1-26), выраженного в угловых секунд, определится (§ 1-5) как

$$\delta_{пор} \approx \frac{b\Delta L}{L^2} 10^5, \qquad (1\text{-}64)$$

где b — расстояние между двумя глазами наблюдателя (база стереоскопического зрения);

L — расстояние от ближайшего объекта наблюдения до фронта глаз;

ΔL — минимальное расстояние между двумя объектами наблюдения, различаемыми разноудаленными.

Порог глубины темных объектов на светлом фоне согласно результатам исследования Е. М. Белостоцкого [Л.82] возрастает до $\delta_{пор} = 108''$ при яркости $B_ф = 0{,}01$ *нт* по сравнению с $\delta_{пор} = 12 - 15''$ при яркости $0{,}5 - 5$ *нт*. При измерении порога глубины белых объектов на черном фоне по данным В. Г. Самсоновой [Л. 83] увеличение яркости объектов сверх $B = 8$ *нт* вновь приводит к росту порога (рис. 1-66), следовательно, к снижению остроты стереоскопического зрения. На величину порога глубины большое влияние оказывает форма объектов наблюдения и их контраст с фоном. Зависимость порога глубины от контраста приведены по данным В. Г. Самсоновой на кривых рис. 1-67 [Л. 83].

Все приведенные сведения об остроте стереоскопического зрения позволяют сделать вывод о различии зрительного восприятия объемного предмета и его пропорционального макета. Различие восприятия предмета и его макета возникает в результате изменения степени диспаратности изображений и величины конвергенции при постоянстве базы стереоскопического зрения

и при различных расстояниях от наблюдателя до предмета и его макета. Этот вывод необходимо учитывать при моделировании осветительных установок путем использования метода порогов при выборе закономерностей переменного масштаба моделирования.

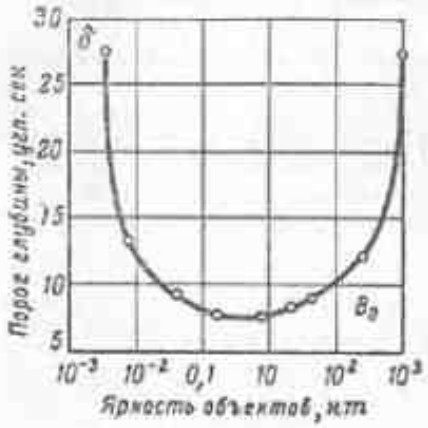


Рис. 1-66.

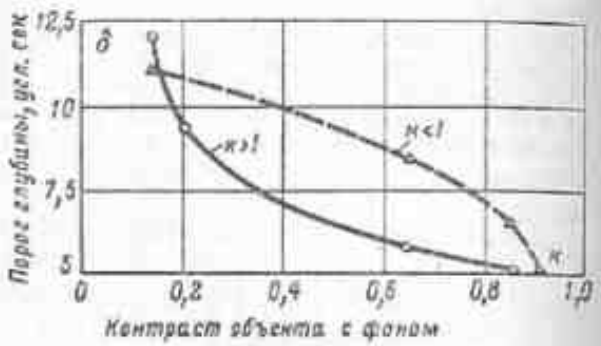


Рис. 1-67.

1-10. Цветовая чувствительность

Цвет и цветность. Человек, зрительно воспринимая окружающие его предметы, способен обнаружить их различия и сходство не только по форме, определяемой их контуром и рельефом, но также по их цвету. Зрительные ощущения цвета и формы предметов, а также их расстояния от наблюдателя отнюдь не следует считать независимо существующими друг от друга элементами зрительного восприятия наблюдаемого предмета. Эти элементы восприятия тесно связаны друг с другом, составляя общий образ наблюдаемого предмета. Взаимосвязаны не только отдельные элементы зрительного ощущения наблюдаемого предмета, в тесной связи находятся и различные ощущения, полученные от наблюдаемого предмета через различные органы чувств. Эта связь различных ощущений возникает в процессе повседневной практики активного общения человека с окружающим его миром.

Человек ощущает цвета (окраски) предметов качественно неодинаковыми лишь в тех случаях, когда различие спектрального состава излучений, создающих изображения этих предметов на сетчатке, будет вызывать цветовое различие, равное или большее порога цветоразличения (§ 1-5). Способность зрительного анализатора различать разноцветные излучения одинаковой яркости определяется наличием в нем нескольких рецептов, обладающих различными спектральными чувствительностями. Согласно большинству экспериментальных исследований цветового зрения число таких рецепторов равно трем [Л. 84, 85].

Впервые мысль о трехкомпонентности цветового зрения была высказана в 1756 г. М. В. Ломоносовым (ч. 1, § 3-22), который сформулировал положение о наличии на «дне ока» трех разновидностей частиц материи, взаимодействующих с тремя разновидностями частиц эфира, «зыблющееся» (колебательное) движение которых является причиной света. «Я приметил и через многие годы многими прежде догадками, а после доказательными опытами с довольной вероятностью утвердился,—пишет М. В. Ломоносов [Л. 86],—что три рода ефирных частиц имеют совмещение с тремя родами действующих первоначальных частиц, чувствительные тела составляющих... Наконец, нахожу, что от первого рода ефира происходит цвет красной, от второго желтый, от третьего голубой. Прочие цветы рождаются от смешения первых».

Гипотеза о трех рецепторах органа зрения человека была вновь высказана в 1802 г. английским ученым Т. Юнгом. Окончательная формулировка основных положений о трехкомпонентности цветового зрения принадлежит Г. Гельмгольцу. Гипотеза Ломоносова — Юнга — Гельмгольца о трехкомпонентности цветового зрения, подтвержденная в последующем многими экспериментами, принята в настоящее время как классическая теория цветового зрения.

В соответствии с трехкомпонентной теорией цветового зрения колбочки световоспринимающего аппарата зрительного анализатора бывают трех разновидностей: красноощущающие (*к*-рецепторы), зеленоощущающие (*з*-рецепторы) и синеощущающие (*с*-рецепторы). Согласно этой теории различие зрительных ощущений разноцветных излучений одинаковой яркости определяется различными соотношениями частот импульсов токов действия *кзс*-рецепторов.

Ощущения, возникающие в результате различия соотношения частот импульсов в *кзс*-волокнах зрительного нерва, будем называть *ощущениями цветности*. Ощущения цветности позволяют человеку с помощью зрительного анализатора различать разноспектральные излучения в условиях равенства их яркости. Такие излучения, вызывая одинаковые уровни суммы сигналов от сетчатки к коре головного мозга, как правило[1], создают различные соотношения сигналов *кзс*-рецепторов. Количественный уровень зрительного ощущения — светлота, однозначно определяемый в условиях дневного зрения яркостью зрительно оцениваемого излучения, характеризуется (§ 1-8) суммарной частотой токов действия всех трех *кзс*-рецепторов. Комплекс зрительного ощущения, определяемый общим уровнем возбуждения зрительного анализатора и соотношением уровней возбуждения трех его *кзс*-рецепторов, принято называть *ощущением цвета*. Из приведенных определений ощущения цвета и цветности следует, что возможна раздельная зрительная оценка количественной характеристики излучения — яркости и качественной — спектрального состава. Следовательно, ощущение цвета возможно условно делить на две составляющие: количественную — светлоту и качественную — ощущение цветности.

[1] Как будет показано далее, некоторые разноспектральные излучения вызывают одинаковое соотношение уровней возбуждения *кзс*-рецепторов, следовательно, зрительно воспринимаются одноцветными.

Условность этого деления заключается в том, что в действительности ощущение цвета любого излучения едино.

Деление на качественную и количественную составляющие ощущения цвета лежат в основе современной *колориметрии* — науки о количественных выражениях цветов и их измерении. Степень различия и условия равенства ощущений цветности устанавливаются экспериментально зрительным сопоставлением двух оптически смежных полей сравнения, заполненных равнояркими и разноспектральными излучениями. *Эксперименты*, целью которых является подбор различных по спектральному составу излучений, неразличимых в условиях оптического контакта, принято называть *колориметрическими* [Л. 87].

Примером возможности возникновения одинаковых ощущений цветности от разноспектральных излучений могут служить белые излучения: равноинтенсивные и состоящие из двух однородных излучений — дополнительных цветов. Таких белых излучений, полученных в результате смеси двух однородных излучений, может быть очень много. Тождественность ощущений цветности разноспектральных излучений возникает в результате одинакового соотношения уровней возбуждения *кэс*-рецепторов зрительного анализатора. Излучения, вызывающие одинаковые ощущения цветности, принято называть одноцветными. Качественную характеристику излучения, определяемую различием соотношения уровней реакции трех приемников среднего глаза, возникающим в результате различия спектрального состава, принято называть *цветностью*.

Средним глазом будем в дальнейшем называть некоторый гипотетический трехкомпонентный приемник, спектральная чувствительность каждого компонента которого зависит лишь только от длины волны и с достаточной точностью, воспроизводит стандартизованные средние значения спектральной чувствительности *кэс*-рецепторов зрительного анализатора человека (рис. 1-68). Следовательно, цветность является качественной характеристикой излучений, устанавливаемой по тождеству зрительного ощущения двух разноспектральных и равноярких излучений. Таким образом, излучения будут одноцветными, если их можно сделать тождественными по зрительному ощущению путем изменения их мощности без изменения их спектрального состава.

Из изложенного следует, что цветность излучения определяется его спектральным составом, причем одинаковой цветностью могут обладать излучения с различными спектральными составами, так как некоторые разноспектральные излучения могут вызывать одинаковое соотношение реакций *кэс*-рецепторов.

Наряду с этим заданному спектральному составу излучения соответствует единственно возможная цветность, так как

любой заданный спектральный состав однозначно определяет соотношение уровней реакции *кэс*-приемников среднего глаза.

Излучения, обладающие одинаковой цветностью и различной яркостью, зрительно воспринимаются как разносветлые, что определяется неодинаковыми уровнями возбуждения зрительного анализатора, создаваемыми разнояркими излучениями. Для комплексной качественной и количественной оценки

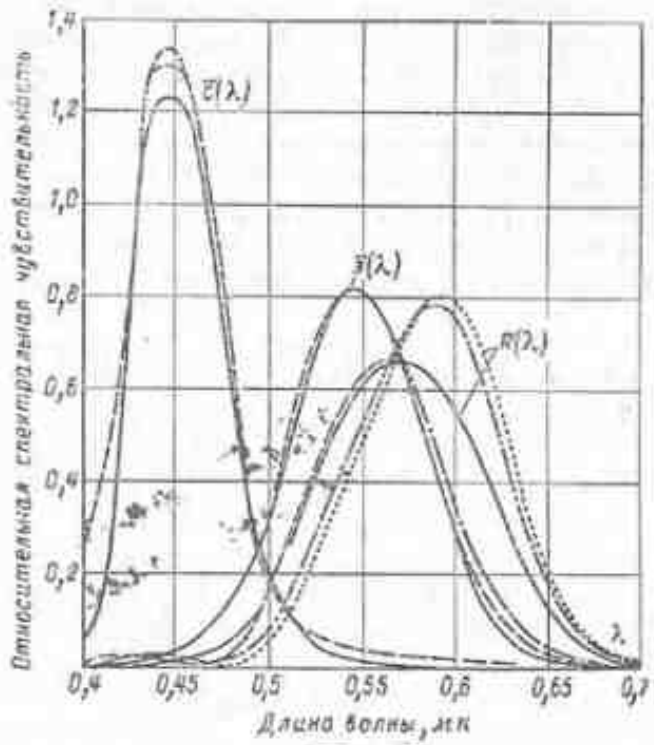


Рис. 1-68.

——— по Юстовой; — — — — по Кенагу и Айвсу; — · — · — по Федорову; ····· по Джаду.

излучения по аналогии с комплексной оценкой зрительного ощущения вводят понятие о *цвете излучения*. Цвет следует рассматривать как некоторое свойство излучения, определяющее результат его действия на средний глаз по ощущению цветности и светлоты. Следовательно, цвет излучения характеризуется его яркостью [1] и цветностью.

Из изложенного следует, что цвет излучения и ощущение цвета, так же как цветность излучения и ощущение цветности, являются величинами многомерными. Многомерность ощущения цветности характеризуется тем, что количественное ее вы-

[1] Количественной характеристикой цвета может являться любая световая величина, так как цвет определяется результатом действия излучения на средний глаз человека.

ражение можно однозначно определить двумя коэффициентами цветоощущения (ч. 1, § 3-22). Следовательно, ощущение цветности является двухмерной величиной. Коэффициенты цветоощущения должны однозначно определять ощущение цветности потому, что они однозначно определяют соотношения уровней возбуждения *кзс*-рецепторов зрительного анализатора.

Ощущение цвета, оцениваемое светлотой и двумя коэффициентами цветоощущения, так же как и цвет, оцениваемый яркостью и двухмерной величиной цветности, являются трехмерными величинами. Трехмерность цвета излучения и ощущения цвета определяется трехкомпонентностью зрительного анализатора как приемника излучения. Принимая светлоту излучения пропорциональной числу молекул иодопсина, диссоциирующих в единицу времени (ч. 1, § 3-22), и вводя понятие о *компонентах светлоты*, оцениваемых уровнем реакции каждого из трех *кзс*-рецепторов, напишем выражения коэффициентов цветоощущения:

$$\left.\begin{aligned} \mu_К &= \frac{M_К}{\Sigma M} = \frac{c_К B_К}{c_К B_К + c_З B_З + c_С B_С} = \frac{S_К}{S}; \\ \mu_З &= \frac{M_З}{\Sigma M} = \frac{C_З B_З}{c_К B_К + c_З B_З + c_С B_С} = \frac{S_З}{S} \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}65)$$

или

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{c_К B_К}{c_С B_С} = \frac{S_К}{S_С}; \\ \beta &= \frac{c_З B_З}{c_С B_С} = \frac{S_З}{S_С}, \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}65а)$$

так как

$$\alpha = (1+\beta)\frac{\mu_К}{1-\mu_К};$$

$$\beta = (1+\alpha)\frac{\mu_З}{1-\mu_З}, \qquad (1\text{-}65б)$$

где $M_К$, $M_З$ и $M_С$ — число молекул *кзс*-реагентов, диссоциирующих в единицу времени, $сек^{-1}$;

$\Sigma M = M_К + M_З + M_С$ — общее число диссоциирующих в 1 секунду молекул фотореагентов, определяющее светлоту;

$c_К$, $c_З$ и $c_С$ — мгновенные значения концентраций молекул *кзс*-реагентов в рецепторах зрительного анализатора;

$S_К$, $S_З$ и $S_С$ — *КЗС*-компоненты светлоты, определяемые частотами импульсов тока действия в *кзс*-волокнах зрительного нерва;

$B_К$, $B_З$ и $B_С$ — количественные выражения *КЗС*-компонентов цвета излучения, измеряемые эффективными величинами, оценивающими описываемое излучение уровнями реакций каждого из *кзс*-приемников среднего глаза (ч. 1, § 1-24, 25).

Согласно (1-65) и § 3-65, ч. 1 компоненты светлоты излучения, действующего на каждый из трех *кзс*-рецепторов анализатора, определяются произведением концентрации молекул *кзс*-фотореагента на эффективную величину, характеризующую действие исследуемого излучения на соответствующий рецептор анализатора [1]. В этом произведении концентрация молекул фотореагента определяет уровень чувствительности рецептора, а количественное значение соответствующего компонента цвета — уровень сигнала, поступающего к рецептору извне. Из (1-65) следует, что изменение ощущения цветности может происходить не только за счет изменения компонентов цвета в результате изменения спектрального состава, но также и за счет неодинакового изменения уровней чувствительности каждого из *кзс*-рецепторов в результате неодинакового изменения концентраций молекул *кзс*-фотореагентов. Так, например, причинами «покраснения» ощущения может быть как увеличение $B_К$, так и снижение $c_С$ и $c_З$ в результате предварительного освещения глаза наблюдателя мощным сине-зеленым излучением. Вследствие того, что изменение концентрации молекул *кзс*-фотореагентов не может изменить их молекулярных показателей поглощения, форма кривых спектральной чувствительности каждого рецептора остается неизменной в любом неустановившемся зрительном процессе. Следовательно, можно предполагать, что неодинаковое предшествующее возбуждение *кзс*-рецепторов приводит лишь к изменению уровня их чувствительности.

В соответствии со схемой построения любых эффективных величин (ч. 1, § 1-25) компоненты цвета излучения со спектральной интенсивностью яркости $b(\lambda)$ определятся как

$$\left.\begin{aligned} \Phi_К &= \int b(\lambda)\, g_К(\lambda)\, d\lambda; \\ \Phi_З &= \int b(\lambda)\, g_З(\lambda)\, d\lambda; \\ \Phi_С &= \int b(\lambda)\, g_С(\lambda)\, d\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}66)$$

Семейство уравнений (1-66) позволяет рассматривать цвет любого излучения как совокупность трех его компонентов — $\Phi_К$,

[1] Количественное значение компонентов цвета можно выражать в единицах яркости или любой другой световой величины.

$\Phi_З$ и $\Phi_С$, сумма количественных значений которых $B_К$, $B_З$ и $B_С$ равна яркости исследуемого излучения:

$$B = B_К + B_З + B_С. \qquad (1\text{-}66а)$$

Различное обозначение компонентов цвета и их количественных (яркостных) выражений необходимо для подчеркивания качественного их различия, определяемого тем, что каждый компонент цвета характеризует уровень действия исследуемого излучения на соответственный *кзс*-приемник.

Соответствие исследуемого цвета трем его компонентам принято записывать тождеством

$$\Phi \equiv \Phi_К + \Phi_З + \Phi_С. \qquad (1\text{-}66б)$$

Тождество исследуемого цвета Ф трем его *КЗС*-компонентам, подчеркивающее трехкомпонентность цвета, не следует рассматривать как алгебраическую сумму компонентов цвета вследствие их качественного различия. Тождественность исследуемого цвета трем его компонентам определяется не только равенством количественного выражения цвета сумме яркостных значений его компонентов, но также и соответствием пропорции $\Phi_К$, $\Phi_З$ и $\Phi_С$ цветности исследуемого цвета.

Это правило трехкомпонентности цвета свойственно и оценке ощущения цвета. В соответствии с этим зрительные ощущения двух сравниваемых цветов можно считать тождественными, следовательно, одинаковыми по качественной и количественной характеристикам, если вызвавшие их излучения обеспечивают возникновение соответственно одинаковых компонентов светлоты:

$$S_К = S'_К; \quad S_З = S'_З \quad \text{и} \quad S_С = S'_С. \qquad (1\text{-}67)$$

Требование соответственного равенства трех компонентов светлот сравниваемых излучений, обеспечивающее их полное зрительное соответствие, можно заменить равенством светлот сравниваемых излучений и двух коэффициентов цветоощущения, вызываемого этими излучениями:

$$\left.\begin{aligned} S &= \text{const}; \\ \mu_К &= \text{const}; \\ \mu_З &= \text{const}. \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}67а)$$

Как было сказано ранее, критерием тождественности зрительных ощущений следует считать неразличимость двух смежных участков поля зрения наблюдателя, заполненных двумя сравниваемыми излучениями. Из этого определения следует,

что зрительные ощущения будут безусловно тождественными[1], если поля сравнения излучения, заполняющие их, одинаковы по спектральному составу и яркости. Это условие тождественности зрительных ощущений является достаточным, но не необходимым, так как тождественными по зрительному ощущению могут быть равнояркие и разноспектральные излучения, обеспечивающие одинаковые соотношения уровней возбуждения *кзс*-рецепторов. Следовательно, необходимыми и достаточными условиями тождественности зрительных ощущений согласно (1-67а) являются: равенство яркости сравниваемых излучений, однозначно определяющей в условиях дневного зрения светлоту, и соответственное равенство двух коэффициентов цветоощущения. Излучения, обеспечивающие тождественность зрительного ощущения, принято называть одинаковыми по цвету. Возможность установления зрительного тождества разноспектральных излучений позволяет сделать вывод о наличии в природе одинаковых по цвету излучений с различными спектральными составами.

Из проведенного анализа тождественности зрительных ощущений можно установить критерии их различия, определяемые:

а) различием светлот (яркостей) $S \neq S'$ или $B \neq B'$;

б) различием коэффициентов цветоощущения $\mu_К \neq \mu'_К$ и $\mu_З \neq \mu'_З$;

в) различием светлот и коэффициентов

$$S \neq S'; \quad \mu_К \neq \mu'_К \quad \text{и} \quad \mu_З \neq \mu''_З.$$

В первом случае сравниваемые излучения будут зрительно восприниматься одноцветными и разносветлыми, во втором — разноцветными и равносветлыми и в третьем — разноцветными и разносветлыми.

Ощущения цветности, будучи двухмерными, могут различаться по двум параметрам: по *цветовой тональности* и по *цветовой насыщенности*. Наиболее характерным примером различения ощущения по цветовой тональности является разноцветность однородных излучений. Так, например, зрительные ощущения одинаково ярких спектральных линий с длинами волн $\lambda_{кр} = 0{,}65$ *мк* и $\lambda_{син} = 0{,}47$ *мк* являются неодинаковыми вследствие их разной цветовой тональности. Как показывает эксперимент, различие ощущения цветности наиболее заметно по цветовой тональности. Цветовая насыщенность определяется степенью различия ощущения цветности заданного излуче-

[1] Условие тождественности зрительных ощущений предусматривает одинаковые состояния участков сетчатки, на которые проектируются поля сравнения, следовательно, одинаковые условия их предшествующего облучения.

ния от ощущения цветности белого. Как показывает опыт, насыщенность цвета однородных излучений неодинакова. Она минимальна для желтого $\lambda_ж = 0{,}57$ *мк* и максимальна для красного $\lambda_{кр} = 0{,}67$ *мк* и фиолетового $\lambda_ф = 0{,}4$ *мк*.

Пороги цветоощущения. В условиях световой сигнализации часто возникает необходимость опознавания цветности сигнальных огней в ночных условиях. Вполне понятно, что решение этой зрительной задачи возможно лишь при условии, когда уровень возбуждения зрительного анализатора равен или больше порога цветоощущения (§ 1-5). Кодирование цветности в световой сигнализации требует знания порогов цветоощущения для всех цветностей, применяемых в световой сигнализации. Применение, как правило, точечных световых сигналов при кодировании цветности заставляет принять критерием порога *пороговый блеск цветоощущения*.

Исследования Л. И. Демкиной и Г. Н. Раутиана [Л. 47], проведенные в условиях темновой адаптации, показывают, что цветная светящая точка в момент ее появления на пороге воспринимается наблюдателем бесцветной. Для обнаружения и опознавания цветности точечного сигнала необходимо значительно повысить блеск исследуемого точечного огня по сравнению с величиной светового порога (рис. 1-37). Исключение составляют лишь красные излучения с длиной волны $\lambda \geqslant 0{,}62$ *мк*. Бесцветный интервал видимости точечного огня различен для различных участков спектра и имеет наибольшее значение для синих огней $\lambda = 0{,}46$—$0{,}48$ *мк*. На этом участке спектра переход от светового порога к порогу цветоощущения требует увеличения яркости примерно в 500 раз.

Кривая порога цветоощущения в зависимости от длины волны (рис. 1-37) имеет два максимума в синей и желто-зеленой частях спектра. Наличие максимума кривой $(E_{эр.пор})_{цв} = f(\lambda)$ в зоне $\lambda = 0{,}56$ *мк* следует объяснить минимумом насыщенности желтого цвета; причина второго максимума не ясна. Минимум порога цветоощущения в области красного цвета $\lambda = 0{,}62$ *мк* объясняется большой насыщенностью этих излучений и высоким значением абсолютного светового порога. По Н. И. Пинегину [Л. 88] число фотонов, падающих на одну светочувствительную клетку (колбочку) в зоне изображения, обеспечивающее порог цветоощущения для однородного излучения $\lambda = 0{,}546$ *мк*, в среднем для восьми наблюдателей равен 100 $сек^{-1}$. Учитывая наличие в полевых условиях ряда причин, повышающих пороги, для практики расчета сигнальных установок приняты практические значения порогов цветоощущения, превышающие их лабораторные значения на три-четыре порядка (§ 2-20).

Пороги цветоразличения. Как показывают опыты, не всякое изменение цветности можно обнаружить зрительно.

Для обеспечения различия зрительного ощущения разноспектральных излучений необходимо, чтобы разница цветности сравниваемых излучений превышала порог цветоразличения (§ 1-5). Первыми по времени и наиболее детальными исследованиями в области изучения порогов цветоразличения были эксперименты по установлению впервые заметного различения цветности полей сравнения, заполненных однородными излучениями с малым различием длин волн $\Delta\lambda$.

Минимальную величину $\Delta\lambda$, на которую отличаются два поля сравнения, заполненных однородными излучениями одинаковой яркости, впервые с заданной вероятностью различаемые разноцветными, принято называть *порогом цветоразличения по цветовому тону*. Понятие различия и сходства излучений по цветовому тону аналогично понятию различия и сходства зрительных ощущений по цветовой тональности. При рассмотрении непрерывного спектра излучения легко обнаружить наиболее быстрое изменение цветности в зоне длин волн $\lambda = 0{,}49$ *мк* при переходе от синего участка спектра к зеленому, а также в зоне $\lambda = 0{,}58$ *мк* при переходе от оранжевого к красному. Наличие в спектре таких участков определяется минимумами порогов цветоразличения по цветовому тону в этих зонах спектра (рис. 1-69).

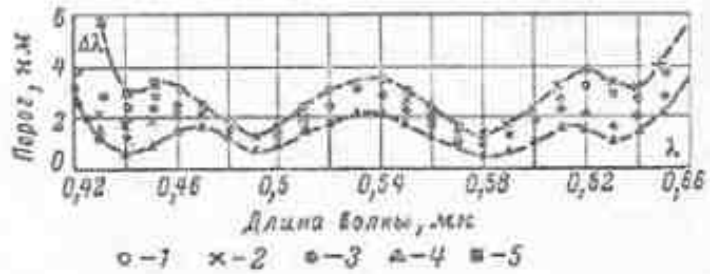


Рис. 1-69.

1—по Штейндлеру; *2*—по Джонсу; *3*—по Лоуренсу; *4*—по Гамильтону; *5*—по Питу и Райту.

Исследования А. Кенига (1884), В. Унтхоффа (1888), Ф. Экснера (1902), О. Штейндлера (1906), Л. Джонса (1917), Лоуренса и Гамильтона (1923) и др. показали, что на видимом участке спектра от $\lambda = 0{,}42$ *мк* до $\lambda = 0{,}66$ *мк* зрительный анализатор человека способен различать при благоприятных условиях около 100 оттенков по цветовому тону. По всему спектру, дополненному чистыми пурпурными цветами в условиях достаточной для цветоразличения яркости $B \geqslant 10$ *нт*, число различаемых оттенков по цветовому тону достигает примерно 150. Минимальные значения порогов цветоразличения по цветовому тону в сине-зеленой и оранжево-красной зонах спектра численно равны $\Delta\lambda \approx 1{,}0$ *нм*. По краям видимого участка спектра пороги цвето-

различения по цветовому тону резко возрастают, причем цветовые тона становятся неразличимыми для излучений с длинами волн $\lambda_{кр} \geqslant 0{,}68$ *мк* и $\lambda_{син} \leqslant 0{,}42$ *мк*. Из многочисленных опытов исследования порогов цветоразличения следует, что общее число различаемых цветовых оттенков уменьшается по мере уменьшения яркости полей сравнения. Причиной этого является рост порогов цветоразличения в условиях сумеречного зрения.

Цветовой тон излучения, являясь одной из двух характеристик цветности, применим для оценки качества не только однородных излучений. Допустимость применения цветового тона в качестве характеристики цветности любого излучения со сложным спектром основана на экспериментально установленной возможности тождественного воспроизведения любого цвета смесью белого с однородным. В соответствии с этим цветовой тон любого излучения принято обозначать длиной волны того однородного излучения, которое в определенной пропорции смеси с белым обеспечивает зрительное тождество с исследуемым излучением. Необходимость введения раздельных понятий цветового тона излучения и цветовой тональности зрительного ощущения вызвана экспериментально установленными фактами изменения тональности цветовых ощущений излучений одинакового цветового тона при изменении яркости, размеров полей сравнения и доли белого излучения в смеси с однородным.

Долю однородного излучения, которая обеспечивает в смеси с белым зрительное тождество с исследуемым излучением, принято называть *чистотой цвета*:

$$p = \frac{B_\lambda}{B_б + B_\lambda} = \frac{B_\lambda}{B}, \qquad (1\text{-}68)$$

где B_λ — яркость однородного излучения, характеризуемого цветом Φ_λ;

$B_б$ — яркость излучения белого цвета $\Phi_б$, обеспечивающего пропорцию смеси с Φ_λ, тождественную по цветности с исследуемым цветом $\Phi \equiv \Phi_\lambda + \Phi_б$.

Из приведенного определения и количественного соотношения (1-68) следует, что чистота цвета максимальна ($p=1$) для цветов всех однородных излучений и минимальна ($p=0$) для белого цвета.

Нетрудно видеть, что между чистотой цвета излучения и цветовой насыщенностью вызванного им зрительного ощущения имеется качественное соответствие. Это соответствие заключается в том, что чистота цвета, так же как цветовая насыщенность, уменьшается по мере разбавления однородного излучения белым. Постепенное «обесцвечивание» однородного излучения при разбавлении его белым можно характеризовать изменением чистоты цвета от 1 до 0 или каким-либо количественным выражением изменения цветовой насыщенности. Наиболее распространенным количественным критерием цветовой насыщенности является число порогов цветоразличения на участке изменения цветности от однородного излучения до белого в условиях постоянства цветового тона и яркости сравниваемых излучений.

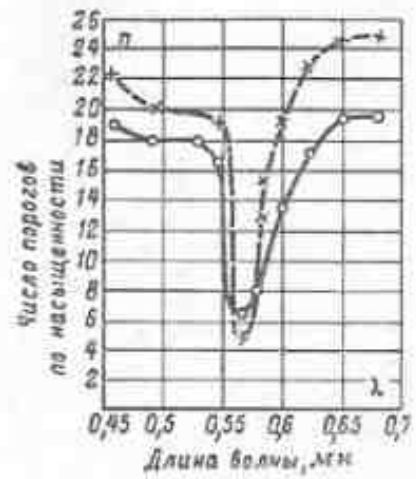


Рис. 1-70.

В отличие от порогов цветоразличения по цветовому тону пороговые различия цветностей только по чистоте цвета (B=const и λ=const) принято называть *порогами цветоразличения по насыщенности*. При исследовании порогов по цветовой насыщенности поля сравнения заполняются излучениями одинакового цветового тона. Задачей наблюдателя в этих исследованиях является установление минимального различия цветности, изменяющейся по чистоте цвета, следовательно, и по насыщенности.

Цветовая насыщенность, выраженная числом порогов цветоразличения от белого до однородного излучений, графически представлена (рис. 1-70) для двух наблюдателей по результатам исследований Е. Мартина, Ф. Уэбертона и В. Моргана [Л. 89]. Из приведенного графика можно видеть резкое снижение насыщенности в желтой зоне 0,55—0,58 *мк*. Эти же авторы определяли цветовую насыщенность логарифмом числа, обратного первому порогу цветоразличения по чистоте от белого цвета по направлению к однородному с заданным цветовым тоном:

$$n = \lg \frac{1}{\Delta p_{пор}}, \qquad (1\text{-}69)$$

где n — цветовая насыщенность зрительного ощущения;

$\Delta p_{пор}$ — чистота цвета исследуемого цветового тона на расстоянии одного порога от белого.

Этот критерий количественной оценки насыщенности был в последующем применен Д. Парди (1931), Ф. Уэбертоном (1936), В. Райтом (1937), Ж. Нельсоном (1937), И. Пристом (1938) и др.

Графическое изображение цветовой насыщенности, характеризуемой согласно (1-69) первым порогом по чистоте цвета в функции цветового тона (рис. 1-71), а также числом порогов

цветоразличения от белого до однородного (рис. 1-70), показывает качественное соответствие между двумя количественными критериями насыщенности [Л. 90—92].

Джонс и Лоурей [Л. 93], исследуя цветовую насыщенность, вызываемую излучениями одинакового цветового тона, уста-

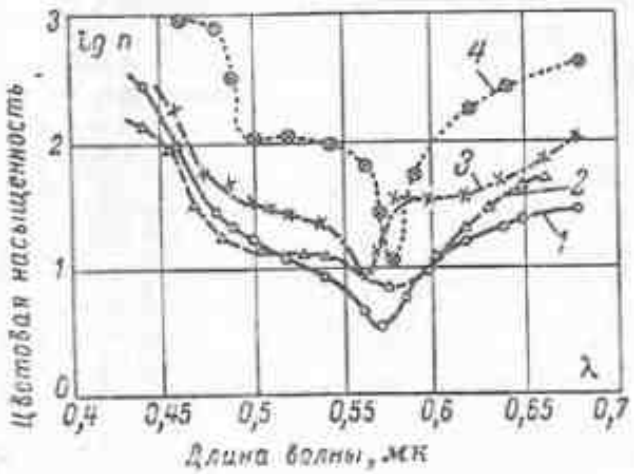


Рис. 1-71.
1—по Уэбертону; 2—по Парди; 3—по Моргану; 4—по Гревереу.

новили количественное соотношение между насыщенностью и чистотой цвета исследуемых излучений (рис. 1-72). Типичная кривая $n=f(p)$, изображенная для $\lambda=0{,}54$ *мк*, позволяет считать в пределах $p=0{,}1$—$0{,}9$ зависимость насыщенности от чистоты линейной:

$$n = pn_{\lambda}, \qquad (1\text{-}70)$$

где n_{λ} — цветовая насыщенность однородного излучения исследуемого цветового тона.

Это соотношение позволяет рассматривать чистоту цвета как величину, характеризующую относительное значение цветовой насыщенности зрительного ощущения. Линейная связь чистоты и насыщенности позволяет применять термин «насыщенность цвета» к излучению с тем же правом, как и к ощущению, им вызванному.

Наличие линейной зависимости (1-70) позволяет использовать понятие насыщенности цвета в основном для характеристики степени различия цветности любого однородного излучения и белого. Следовательно, понятие насыщенности чаще всего применяется как максимальное значение n, определяемое (1-69) для заданного цветового тона n_{λ}, используя для всех других цветов того же цветового тона аналогичное понятие чистоты цвета.

Все изложенное о порогах цветоразличения позволяет использовать в качестве характеристик цветности излучения цветовой тон и чистоту цвета или его насыщенность.

Как показал проф. Н. Д. Нюберг [Л. 94], понятия цветового тона и чистоты или насыщенности цвета, не имея непосредственно органической связи с механизмом цветового ощущения, выработались в ходе опыта общения с красящими материалами и окрашенными телами. Наши представления о свойствах окраски наблюдаемых предметов позволяют проводить аналогию между цветовым тоном и красящим веществом, а его количество аналогизировать с чистотой цвета. Эти аналогии, закрепившись в языке, приобрели преемственность понимания и логического запоминания, что и следует считать одной из основных причин наибольшей наглядности системы обозначения цветов яркостью, цветовым тоном и чистотой цвета.

Как показал Д. А. Шкловер (§ 2-11), экспериментальные данные по изменению порога цветоразличения как по цветовому тону (рис. 1-69), так и по насыщенности (рис. 1-71) достаточно близко совпадают с расчетными, если в первом при-

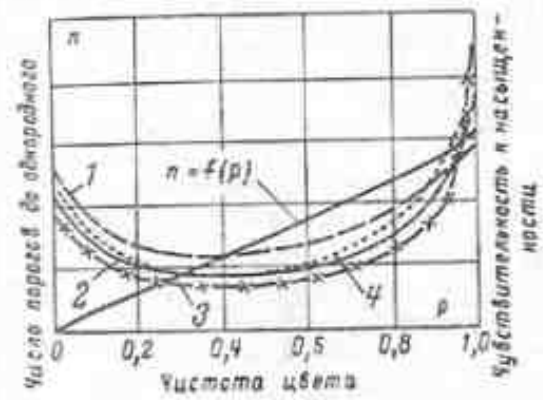


Рис. 1-72.
1—λ = 0,44 *мк*; 2—λ = 0,54 *мк*; 3—λ=0,575 *мк*; 4—λ=0,605 *мк*.

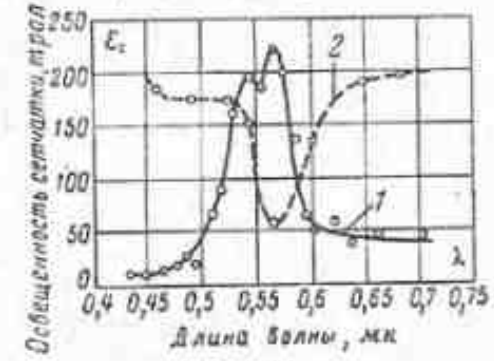


Рис. 1-73.
1—освещенность сетчатки, обеспечивающая максимум насыщенности однородного излучения; 2—число порогов по насыщенности.

ближении принять уровень реакции каждого из трех *кзс*-приемников зрительного анализатора пропорциональным логарифму соответствующего компонента цвета [1].

Исследования Р. Синдена [Л. 95] показывают, что дополнительные цвета следует смешивать для получения белого обратно пропорционально значениям их насыщенности. Согласно исследованиям Пэдди [Л. 96] чем большей насыщенностью обладает цвет однородного излучения, тем при меньшей яркости его насыщенность достигает максимума (рис. 1-73). Зависимость насыщенности от яркости является отклонением от принятой эквивалентной схемы описания зрительных ощущений раздель-

[1] Логарифмическая зависимость уровня реакции от компонента цвета соответствует закону Вебера—Фехнера, который (§ 1-6) можно в первом приближении использовать для дневного зрения.

но взаимонезависимыми показателями: качественными — цветность и количественными — яркость.

Аналогичное отклонение от эквивалентной колориметрической системы было обнаружено В. Бецольдом и Е. Брюкке [Л. 97, 98], установившими изменения цветовой тональности излучений постоянного цветового тона при изменении их яркости.

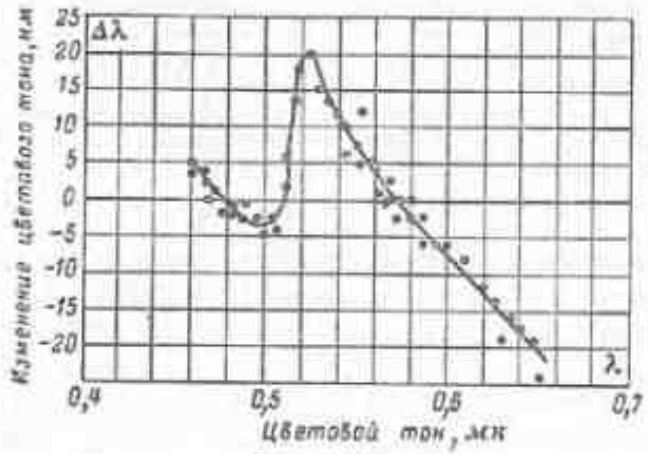


Рис. 1-74.

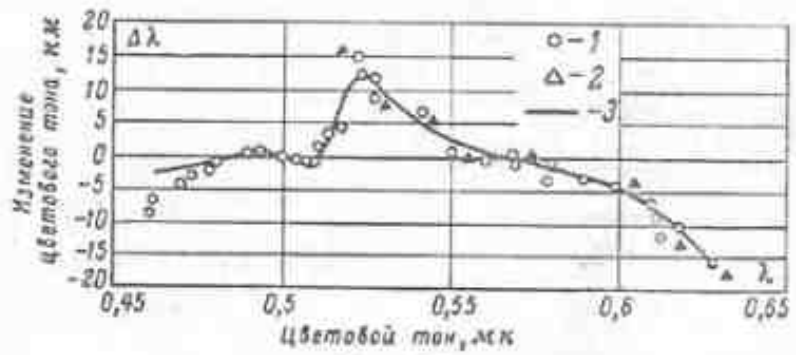


Рис. 1-75.

1—эксперимент Федорова; *2*—эксперимент Эбнея; *3*—расчетная по Федорову.

Согласно этим исследованиям при значительном уменьшении яркости спектра сплошного излучения исчезают желтые и голубые тона и спектр обращается в трехцветный: красный, зеленый и сине-фиолетовый. Это явление происходит, как показал впоследствии Д. Парди [Л. 99], за счет покраснения желтых излучений и посинения голубых (рис. 1-74). Количественные закономерности этого процесса были установлены при уменьшении освещенности сетчатки с 1 000 до 10 *трол*, что соответствует уменьшению яркости поля зрения примерно в 350 раз с $1{,}75 \cdot 10^2$ *нт* до 0,5 *нт*.

Отклонение от колориметрической схемы было установлено

и при изменении чистоты цвета. В. Эбнеем [Л. 100] было обнаружено, что уменьшение чистоты цвета при постоянстве яркости и цветового тона вызывает пожелтение красных излучений, сдвиг желто-зеленых к желтым, голубовато-зеленых к голубым и синих к фиолетовым.

Количественные закономерности этого явления (рис. 1-75) были детально исследованы В. Эбнеем и Н. Т. Федоровым [Л. 101].

Как показали исследования М. М. Гуревича и Л. М. Мейер (1948), Броуна (1951), Мидльтона и Майо (1952), Г. Н. Раутиана и В. П. Солозьевой (1954), величина порогов цветоразличения зависит от уровня яркости полей сравнения; уменьшению яркости, в особенности в области сумеречного зрения, соответствует рост порогов цветоразличения. Результаты исследования зависимости порогов цветоразличения от яркости, проведенные М. М. Гуревичем [Л. 102] и Г. Н. Раутианом [Л. 103], показывают 5—10-кратное увеличение порога при снижении освещенности сетчатки до 1 *трол*, что соответствует яркости полей сравнения $B = 0{,}04$ *нт* (рис. 1-76). По данным Г. Н. Раутиана уменьшение яркости до $B \leqslant 3 \cdot 10^{-3}$ *нт* вследствие ничтожно малого участия колбочкового аппарата в зрительном процессе приводит к полному падению цветоразличительной чувствительности зрительного анализатора.

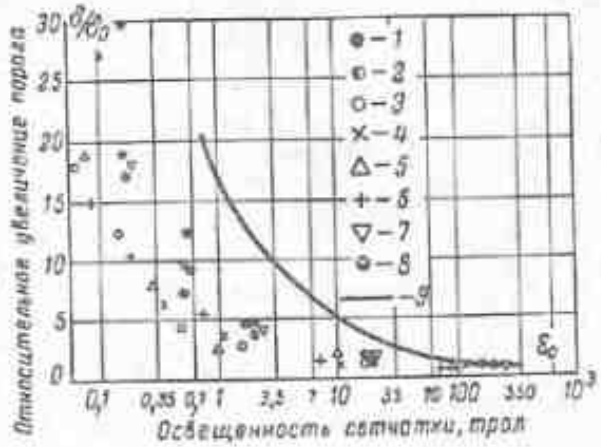


Рис. 1-76.

1—зеленый
2—желтый
3—пурпурно-красный
4—светло-пурпурный
5—белый
6—синий
7—желто-зеленый
8—пурпурный
9—по Гуревичу.

по Раутиану

Цветоразличительная чувствительность зрительного анализатора несколько изменяется при вариациях яркости и цветности поля окружения[1]. Как показал Г. Н. Раутиан [Л. 101], широкие изменения яркости (от 0 до 10-кратного значения по сравнению с яркостью полей сравнения) и цветности поля окружения приводили не более чем к 2—3-кратному увеличению порогов цветоразличения в самых неблагоприятных условиях измерения. Зависимость величины цветовых порогов от яркости полей сравнения и поля окружения также является отклонением

[1] Полем окружения является та часть поля зрения наблюдателей, которая непосредственно граничит с полями сравнения.

от основных принципов колориметрии, согласно которым яркость и цветность излучения взаимонезависимы.

Не менее существенным для практики применения цвета является процесс изменения цветности при уменьшении углового размера полей сравнения (тест-объекта). Этот процесс имеет существенное значение для практики цветного телевидения (§ 2-23), так как рациональное использование этой особенности цветового зрения позволяет уменьшить ширину полосы частот сигналов цветового телевидения, что очень существенно для современного радиовещания.

Впервые изменение цветности полей малых размеров установил А. Шарпантье [Л. 104], обнаружив потерю синим цветом своей окраски до обесцвечивания при уменьшении угла зрения сверх одного углового градуса. А. Кениг [Л. 105] на основании предшествующих исследований и оригинальных экспериментов высказал соображение о прекращении функционирования синеощущающего аппарата зрительного анализатора при угле зрения на цветной тест-объект $\alpha \leqslant 60'$. Установив этот факт, Кениг высказал предположение о механизме этого процесса, заключающемся, по его мнению, в поглощении желтым пигментом центрального пятна сетчатки излучений синего цвета. Это предположение было опровергнуто результатами исследований Г. Хартриджа [Л. 106], обнаружившего выцветание синего при уменьшении угла зрения не только в центре сетчатки, но и на значительной части ее площади.

На основании результатов исследований [Л. 107—111], проведенных в течение последних 10 лет, изучены многие закономерности этого явления, в частности исследована [Л. 103] зависимость углового размера тест-объекта, при котором наблюдается заметное изменение ощущения цветности от его яркости. Как можно видеть из кривой (рис. 1-77), увеличение яркости поля сравнения приводит к снижению влияния углового размера поля на цветоразличительную чувствительность, так как искажение ощущения цветности в условиях большей яркости наблюдается при меньших угловых размерах тест-объекта.

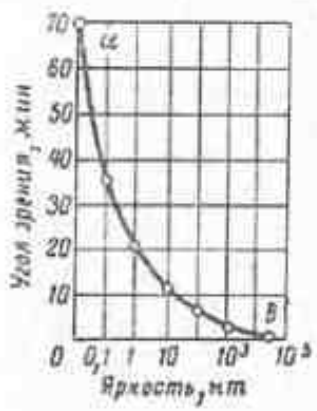


Рис. 1-77.

При яркости объекта $B \geqslant 3$ *нт* описываемое явление наблюдается лишь при $\alpha \leqslant 12'$. Согласно исследованиям [Л. 104—107] возникновение тританопии [1] при малых угловых размерах тест-объекта приводит к изменению ощущения всего многообразия цветов, за исключением тех, которые могут быть получены смесью излучений зелено-голубых с оранжево-красными с цветовыми тонами, варьируемыми в пределах: $\lambda_{з.г} = 0{,}49$ *мк*, $\lambda_{кр} = 0{,}70$ *мк* — по Раутиану и Демкиной [Л. 107]; $\lambda_{з.г} = 0{,}488$ *мк* и $\lambda_{кр} = 0{,}595$ *мк* — по Мидлтону и Холмсу [Л. 108]; $\lambda_{з.г} = 0{,}496$ *мк* и $\lambda_{кр} = -0{,}50$ *мк* — по А. Кустареву [Л. 109]; $\lambda_{з.г} = 0{,}46$ *мк* и $\lambda_{кр} = 0{,}65$ *мк* — по Уилмеру и Райту [Л. 110]. Существенные различия результатов определения совокупности цветовых ощущений, не подвергающихся изменению при уменьшении размера тест-объекта, следует объяснить трудностью сопоставления цветностей большого и малого полей сравнения, расположенных друг относительно друга без оптического контакта (рис. 1-78). Ощущения цветов приближаются к ощущениям смеси оранжево-красного и зелено-голубого по мере уменьшения углового размера тест-объекта. При угловых размерах $\alpha \leqslant 3'$ зрительное ощущение становится практически ахроматическим. Из качественного описания изменения цветоощущения при уменьшении углового размера тест-объекта следует, что наибольшему изменению подвержены синие и сине-фиолетовые, а также желтые цвета. Причины возникновения тританопии при наблюдении цветных объектов малых угловых размеров до настоящего времени не получили достаточно достоверного теоретического объяснения.

Подводя итоги обсуждению отклонений закономерностей формирования ощущения цветности от основных принципов колориметрической систематизации цветов, следует сделать вывод о достаточно точном для практики соответствии принципа раздельной оценки качества и количества излучения с результатами опытов по исследованию цветоразличения и ощущения цветности в тех случаях, когда работает преимущественно колбочковый аппарат ($B \geqslant 10$ *нт*) и угловые размеры полей сравнения не менее 1—2 *град*.

Трехкомпонентность цветового зрения. Способность различать излучения не только по их яркости, но и по цветности является бесспорным доказательством многомерности реакции зрительного анализатора. Как уже указывалось ранее, любой приемник с многомерной реакцией является приемником сложным — многокомпонентным. Опыт показывает, что порядок многомерности реакции любого приемника обычно равен числу его компонентов. Колориметрический метод испытания зрительного анализатора, констатирующий приближенную тождественность зрительного ощущения (неразличимость) заданного излучения любого спектрального состава и совокупности трех разноцветных излучений, устанавливает необходимым и достаточным число таких цветов, равное трем [Л. 88]. Необходимость и достаточность трех цветов для воспроизведения любого четвертого цвета определяется трехкомпонентностью

[1] Тританопией принято называть ненормальное цветовое зрение, при котором вследствие выпадения синеощущающего аппарата наблюдатель видит все разнообразие цветов как смесь оранжево-красных излучений с зелено-голубыми.

реакции зрительного анализатора. Первой экспериментальной проверкой трехкомпонентности цветового зрения следует считать опыты Д. К. Максвелла по оптическому смешению цветов, опубликованные им в 1860 г. [Л. 112].



Рис. 1-78.
A и *B* — поля сравнения.

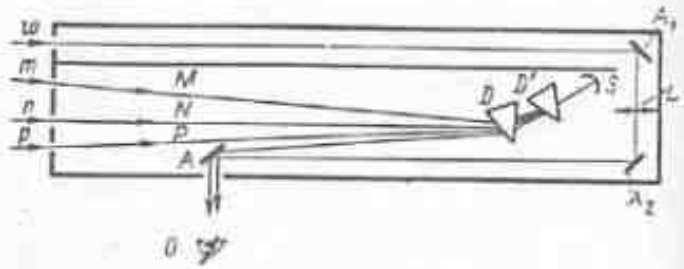


Рис. 1-79.

Эти исследования были проведены на специальном спектральном приборе (рис. 1-79). В приборе Максвелла для смешения цветов использовано правило обратимости хода лучей в оптической системе, состоящей из двух призм D и D'. На входную призму D падает три пучка лучей, прошедших через три входные щели m, n и p после отражения от поверхности белой рассеивающей пластины. Пучки лучей M, N и P после прохождения через призмы падают на вогнутое зеркало S. В соответствии с правилами обратимости хода лучей на зеркало S упадут три однородных излучения, длины волн которых λ_m, λ_n и λ_p будут определяться угловой дисперсией призм D и D', а также их расположением относительно входных щелей m, n и p. Зеркало ориентировано так, чтобы отраженный от него пучок лучей, состоящий из совокупности трех однородных излучений с длинами волн λ_m, λ_n и λ_p, после вторичного отражения от зеркала A попал в глаз наблюдателя (точка O). Изменение ширины входных щелей позволяло изменять яркость и цветность отраженного зеркалом S пучка лучей. Наблюдатель, расположенный в точке O, видит в зеркале A, кроме отражения пучка смешанных однородных излучений λ_m, λ_n и λ_p, отражение пучка белых излучений, прошедших сквозь щель w по пути wA_1LA_2A. Задачей эксперимента являлось установление неразличимости цветов двух смежных полей (белого и смеси трех однородных излучений). Подбор пропорции смеси трех однородных излучений, тождественной по зрительному ощущению белому, осуществлялся регулированием ширины каждой из трех входных щелей m, n и p. Найденное из опыта соотношение записывалось следующим цветовым тождеством:

$$\Phi_w \equiv (\Phi_M)_w + (\Phi_N)_w + (\Phi_P)_w, \qquad (1\text{-}7)$$

где $(\Phi_M)_w$; $(\Phi_N)_w$; $(\Phi_P)_w$ — M, N, P-компоненты белого цвета (цвета однородных излучений с длинами волн λ_m, λ_n и λ_p, смесь которых тождественна заданному белому цвету Φ_w);

Φ_w — цвет белого исследуемого излучения, отраженного от зеркала A.

Расположение входных щелей по спектру было выбрано в опытах Максвелла таким, которое обеспечивало смесь трех однородных излучений с длинами волн $\lambda_m = 0{,}457$ *мк*, $\lambda_n = 0{,}528$ *мк* и $\lambda_p = 0{,}630$ *мк*.

Перемещая положение одной из трех входных щелей по спектру, наблюдатель изменял длину волны одного из трех смешиваемых на зеркале S однородных излучений, например, λ_p на λ_q перемещением щели p в положение q. Подбирая в этом случае новое соотношение размеров входных щелей m, n и q, обеспечивающее зрительное тождество белого и смеси трех однородных излучений с длинами волн λ_m, λ_n и λ_q, можно записать его следующим уравнением:

$$\Phi_w \equiv (\Phi'_M)_w + (\Phi'_N)_w + (\Phi'_Q)_w, \qquad (1\text{-}7\text{а})$$

где $(\Phi'_M)_w$; $(\Phi'_N)_w$; $(\Phi'_Q)_w$ — MNQ-компоненты белого цвета Φ_w.

Вследствие того, что один из трех цветов смеси изменен, пропорции смеси также изменятся. Поэтому обычно имеет место

$$(\Phi_M)_w \neq (\Phi'_M)_w \text{ и } (\Phi_N)_w \neq (\Phi'_N)_w,$$

где $(\Phi_M)_w$, $(\Phi_N)_w$ и $(\Phi'_M)_w$, $(\Phi'_N)_w$ — компоненты исследуемого белого цвета в системе однородных цветов MNP с длинами волн λ_m, λ_n и λ_p и в системе также однородных цветов MNQ с длинами волн λ_m, λ_n и λ_q. Приравнивая первые части двух экспериментально установленных равенств (1-7) и (1-7а), получим новое соотношение, определяющее зрительную тождественность смеси трех однородных излучений с длинами волн λ_m, λ_n и λ_p и четвертого однородного излучения λ_q:

$$\Phi_Q + (\Phi_P)_Q \equiv (\Phi_M)_Q + (\Phi_N)_Q, \qquad (1\text{-}7\text{б})$$

где $(\Phi_M)_Q = (\Phi_M)_w - (\Phi'_M)_w$; $(\Phi_N)_Q = (\Phi_N)_w - (\Phi'_N)_w$; $(\Phi_P)_Q = (\Phi_P)_w$ — MNP-компоненты цвета Φ_Q однородного излучения с длиной волны λ_q.

В тех случаях, когда $\Phi'_M > \Phi_M$ или $\Phi'_N > \Phi_N$, M- и N-компоненты цвета Φ_Q отрицательны. Отрицательные компоненты цвета возникают в тех случаях, когда смесь трех цветов не может по чистоте воспроизвести цвет четвертого (исследуемого) излучения. Как показали опыты Д. Максвелла, отрицательные компоненты цвета наблюдаются у большинства однородных излучений.

При наличии отрицательного компонента, например P-компонента[1], математическую запись цветового тождества можно преобразовать, пользуясь правилом алгебраических операций,

$$\Phi_Q + (\Phi_P)_Q \equiv (\Phi_M)_Q + (\Phi_N)_Q. \qquad (1\text{-}7\text{в})$$

Новый вид уравнения показывает, что тождественность цвета может быть получена лишь при сравнении смеси двух основных цветов системы M и N и смеси исследуемого излучения Q с третьим основным цветом P. Это уравнение формулирует один из законов смешения цветов, говорящий о том, что два однородных излучения с произвольно выбранными длинами волн воспринимаются одинаковыми лишь при смешении с какими-либо двумя другими излучениями [Л. 88][2]. Опыты Д. Максвелла по смешению цветов

[1] Отрицательное значение могут иметь не только M- и N-компоненты, но также и P-компонент.

[2] Исключение из этого правила составляют лишь излучения с длинами волн от 0,58 до 0,78 *мк*.

позволили ему установить для любого исследуемого цвета пропорцию смеси трех основных цветов однородных излучений, тождественной по зрительному ощущению цвету исследуемого излучения,

$$\left.\begin{aligned} \mu &= \frac{(B_M)_Q}{B_Q}; \\ \nu &= \frac{(B_N)_Q}{B_Q}; \\ \pi &= \frac{(B_P)_Q}{B_Q}, \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}72)$$

где μ, ν и π — доли основных цветов, характеризующих цветность исследуемого излучения;

$(B_M)_Q$, $(B_N)_Q$ и $(B_P)_Q$ — количественные выражения смешиваемых цветов.

Нетрудно видеть, что сумма этих трех коэффициентов цветности для любого исследуемого излучения равна единице:

$$\mu + \nu + \pi = 1.$$

Перемещая одну из трех входных щелей по всему видимому участку спектра, Максвелл экспериментально установил пропорции смеси трех основных цветов (синего $\lambda_m = 0{,}457$ *мк*, зеленого $\lambda_n = 0{,}528$ *мк* и красного $\lambda_p = 0{,}630$ *мк*) для каждого нового значения длины волны λ исследуемого однородного излучения.

Графическое изображение результатов опытов по смешению цветов можно представить кривой на трехкоординатном графике μ, ν и π (рис. 1-80). Каждой вершине координатного треугольника Максвелла соответствуют основные цвета *M*, *N* и *P*. Координатами любой точки служат коэффициенты μ, ν и π, определяющие пропорции смеси.

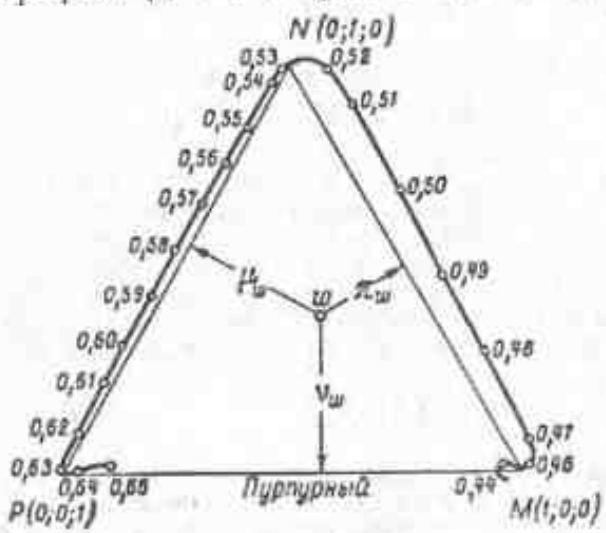


Рис. 1-80.

Результаты экспериментов Д. Максвелла доказали необходимость и достаточность трех цветов для воспроизведения исследуемого цвета, однако вследствие несовершенства спектральных приборов того времени они были недостаточно точны для определения количественного выражения пропорций смеси. Для получения более точных данных осуществлялись неоднократные попытки определения пропорций смеси различных основных цветов, тождественные цветам любых однородных излучений. Этому вопросу много внимания уделял А. Кениг, который в 1903 г. совместно с К. Дитеричи опубликовал работу [Л. 113] по экспериментальному изучению количественных закономерностей смешения цветов. Наиболее достоверными являются исследования Д. Гилда (1925—1930) и В. Райта (1927—1930), результаты которых положены в основу построения всех колориметрических систем (§ 2-6).

Вторым не менее существенным доказательством трехкомпонентности цветового зрения являются материалы исследований зрительных реакций на разноцветные излучения *цветоаномалов* — лиц с ненормальным цветовым зрением. Ненормальности цветового зрения могут выражаться в снижении цветоразличительной чувствительности, в большем или меньшем отклонении от нормы выбора пропорций смеси основных цветов, тождественной заданному цвету, а также в отождествлении некоторых цветных излучений с серым. Причинами ненормального цветового зрения могут быть [Л. 114]: снижение чувствительности одного или нескольких цветовоспринимающих рецепторов анализатора или отклонение их функций спектральной чувствительности от средних значений. Как показывает опыт, расстройство цветового зрения может достигать полной или частичной цветовой слепоты (ахромазии и дихромазии).

С точки зрения изучения механизма цветового зрения наибольший интерес представляют дихроматы, ошибочно отождествляющие некоторые разноцветные излучения. Результаты излучения цветового зрения дихроматов позволяют разделить их на три группы в соответствии с тем, какие ошибки они допускают при установлении колориметрического тождества.

Первая группа дихроматов — *протанопы* отождествляют светло-красные цвета с темно-зелеными, а также голубые и синие с пурпурными и фиолетовыми. Они почти не видят излучений с длиной волны $\lambda \geqslant 0{,}68$ *мк*, за счет чего у них укорочен видимый участок спектра (рис. 1-81) в длинноволновой части спектра. В середине спектра — в зоне 0,49 *мк* у протанопов расположена бесцветная полоска.

Вторая группа дихроматов — *дейтеранопы* отождествляют темно-красные цвета со светло-зелеными, а также голубые с фиолетовыми. Некоторые оттенки пурпурного воспринимаются дейтеранопами как серые. Видимый участок спектра у дейтеранопов не укорочен, но зона максимума спектральной чувствительности сдвинута в сторону более длинных волн. Бесцветная полоса расположена в зоне 0,50 *мк* (рис. 1-81).

Вследствие того, что протанопы и дейтеранопы отождествляют красные и зеленые цветовые оттенки, дихроматов этих двух разновидностей иногда называют красно-зелеными слепыми. Все многообразие цветов дейтеранопы и протанопы воспринимают в виде различных оттенков желтого, коричневого и синего цветов.

Третья группа дихроматов — *тританопы* встречаются в жизни очень редко, они характеризуются укорочением видимого участка спектра с коротковолновой стороны и наличием двух бесцветных полосок в зоне около 0,47 и 0,58 *мк* (рис. 1-81). Максимум спектральной чувствительности тританопов практически не перемещается по спектру. Тританопы отождествляют желтовато-зеленые тона с синевато-зелеными, а также пурпурные с оранжево-красными.

Все отклонения от нормального цветового зрения, имеющие место у дихроматов, можно объяснить на основе трехкомпонентности зрительного анализатора, считая, что цветовое зре-

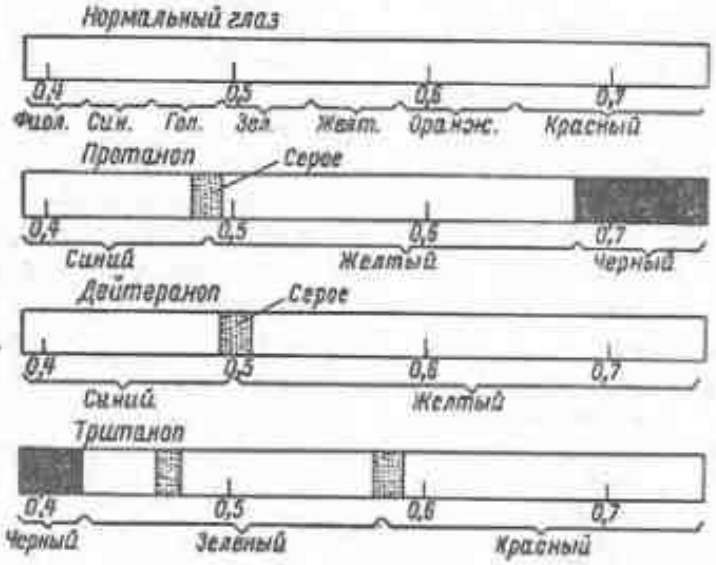


Рис. 1-81.

ние дихроматов определяется двумя приемниками из трех, третий из которых, обладая пониженной чувствительностью, объединяется с одним из двух оставшихся или совершенно не функционирует. Достоверность гипотезы о двухкомпонентности цветового зрения дихроматов подтверждается случаями искусственной дихромазии, вызываемой [Л. 115] предварительным освещением глаза наблюдателя мощным излучением в узкой области спектра. Действие такого излучения на глаз вызывает бурный распад молекул одной из трех разновидностей иодопсина и соответствующее этому резкое снижение концентрации молекул этого вещества, следовательно, падение чувствительности одного из трех цветовоспринимающих аппаратов. Появление бесцветных полос в видимой области спектра у дихроматов объясняется равенством значений спектральной чувствительности двух действующих приемников дихромата в этой зоне спектра. Результаты большого числа исследований цветового зрения три-

хроматов в подавляющем большинстве подтверждают наличие трех основных рецепторов зрительного анализатора, постулированных классической теорией цветового зрения Ломоносова — Юнга — Гельмгольца. Большое значение в дальнейшем утверждении этой теории сыграли электрофизиологические исследования Р. Гранита (ч. 1, § 3-22), доказавшего прямым экспериментом наличие трех цветовоспринимающих аппаратов.

Большинство описанных в настоящем параграфе особенностей цветового зрения (явления Бецольда — Брюкке и Бецольда — Эбнея, изменения цветоразличительной чувствительности и др.) вполне укладывается в схему трехкомпонентной структуры зрительного анализатора (§ 2-1). Наряду с этим некоторые особенности зрительного ощущения цветовых объектов невозможно объяснить на основе принятой в настоящее время классической теорией цветового зрения. К числу таких особенностей в первую очередь следует отнести специфику ощущений желтого цвета. Согласно трехкомпонентной теории цветового зрения ощущение желтого цвета возникает при определенном соотношении возбуждений *k*- и *з*-аппаратов зрительного анализатора. В соответствии с этим зрительно установленная пропорция смеси красного $\lambda_{кр} = 0{,}65$ *мк* и зеленого $\lambda_{зел} = 0{,}53$ *мк*, тождественная желтому $\lambda_{ж} = 0{,}58$ *мк*, должна быть одинаковой при любом значении яркости полей сравнения и любом их расположении.

Как показали исследования (Ф. Аллен, В. Эбней, Г. Хартридж, В. Райт и др.), пропорция смеси зеленого и красного, эквивалентной по зрительному ощущению с однородным желтым, изменяется в зависимости от ряда причин. Смесь зрительно воспринимается более зеленой:

а) при увеличении яркости полей сравнения;

б) при увеличении размеров полей сравнения;

в) при увеличении яркости белого цвета, на который адаптированы наблюдатели перед колориметрическим сравнением желтого и смеси красного с зеленым.

При уменьшении яркости полей сравнения, применении полей сравнения малых размеров, а также в условиях сумеречного зрения смесь зеленого с красным зрительно воспринимается более красной. К этому следует добавить различие размеров полей зрения для желтого и тождественной смеси зеленого с красным (рис. 1-82), установленное В. Эбнеем [Л. 96].

Приведенные особенности ощущения желтого цвета не противоречат принятой концепции трехкомпонентности цветового зрения и лишь требуют дальнейшего ее углубления и совершенствования. К числу таких же особенностей цветового зрения, требующих дальнейшего изучения, следует отнести изменения цветоощущения, происходящие при уменьшении яркости и угло-

вых размеров полей сравнения, а также при перемещении их изображения из центра сетчатой оболочки на периферию. Исследования влияния яркости и угловых размеров поля зрения на цветоощущение показывают, что при уменьшении яркости, так же как и углового размера полей сравнения, происходит:

а) постепенное обесцвечивание желтого и синего цветов с одновременным уменьшением светлоты этих участков спектра и изменением цветового тона всех цветов, за исключением синего $\lambda_{син} = 0{,}46 - 0{,}47$ *мк*, сине-зеленого $\lambda_{с.з} = 0{,}49 - 0{,}50$ *мк* и желтого $\lambda_{ж} = 0{,}57 - 0{,}58$ *мк*;

б) переход к дихроматическому зрению, основными цветами которого является сине-зеленый $\lambda_{с.з} = 0{,}46 - 0{,}49$ и оранжево-красный $\lambda_{о.к} = 0{,}6 - 0{,}7$ *мк*;

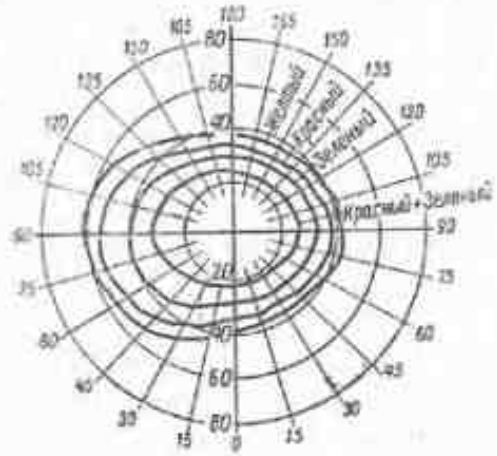


Рис. 1-82.

в) переход к ахроматическому зрению.

При значительном увеличении яркости и перемещении полей сравнения на периферию сетчатки наблюдается:

а) постепенное обесцвечивание сине-зеленых и пурпурно-малиновых цветовых оттенков с одновременным изменением цветового тона всех излучений, за исключением ранее указанных синего, сине-зеленого, желтого и пурпурного;

б) переход к дихроматическому зрению с основными цветами синим и желтым;

в) переход к ахроматическому зрению.

Отличительной особенностью цветового зрения нормального трихромата является неизменность ощущения белого при любых условиях наблюдения. Из приведенных примеров изменения цветового зрения в зависимости от условий наблюдения особо следует отметить полную потерю цветоощущения (переход к ахроматическому зрению): при очень малых угловых размерах цветных тест-объектов, при очень малых или чрезмерно больших яркостях тест-объектов, а также при расположении тест-объектов на периферии поля зрения.

В 1959 г. были опубликованы [Л. 116] результаты экспериментальной работы Э. Лэнда, которыми он пытался опровергнуть трехцветную теорию цветового зрения. Эксперименты Лэнда состояли в оптическом совмещении на проекционном экране двух цветоделенных позитивных изображений разноцветного объекта, полученных съемкой через красный и зеленый светофильтры. По пути проецирующего пучка лучей, создающих на экране «красное» цветоделенное изображение, был поставлен красный светофильтр. «Зеленое» цветоделенное изображение было черно-белым, так как цветного светофильтра в пучке второго проектора не было.

Как показали эксперименты Лэнда, совмещение на экране двух цветоделенных изображений красного и черно-белого, полученного съемкой через зеленый светофильтр, даст многоцветное изображение, достаточно правильно передающее цвета объекта. Использование пары однородных излучений для проецирования цветоделенных позитивов также обеспечивает, по данным Лэнда, многоцветное изображение с достаточно правильной передачей цвета объекта, если длина волны в пучке «красного» цветоделенного негатива была больше длины волны в пучке «зеленого» цветоделенного изображения. При освещении «красного» позитива более коротковолновым однородным излучением по сравнению с «зеленым» позитивом, так же как применение зеленого светофильтра в пучке красного цветоделенного изображения, приводит к возникновению дополнительных цветов на освещенном изображении по сравнению с цветами объекта. Эти результаты позволили Э. Лэнду высказать необоснованную мысль о неправомочности трехцветной теории цветового зрения и возможности замены трех информаций о цвете двумя.

Дальнейшие исследования ряда авторов показали, что уменьшение количества информаций о цвете до двух приводит к недопустимо низкому качеству цветовоспроизведения. Так, например, малонасыщенные цвета воспроизводится как ахроматические или со значительным искажением цветовой тональности. Синие и голубые тона в совмещенном изображении совершенно отсутствуют. Воспроизведение синих и голубых цветов оказалось возможным лишь при замене в «красном» цветоотделенном изображении красного фильтра на желтый.

Как показали исследования, цветности отдельных участков совмещенного изображения в сильной степени зависят от цветового содержания объекта, в основном от цветности фона и участков изображения, смежных с исследуемым. Цвета большой чистоты совершенно не воспроизводятся в системе Лэнда. Все эти характеристики «нового» метода воспроизведения цвета позволяют сделать вывод, что опыты Лэнда ни в какой мере не опровергают существующей трехцветной теории цветового зрения, так как полученные им результаты можно объяснить явлениями цветового контраста (§ 1-13) и смысловой константностью цвета изображения по ассоциации с цветом объекта.

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ЗРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

1-11. Зрительная адаптация

Адаптационный процесс. Как известно (§ 1-5), световая чувствительность зрительного анализатора зависит от уровня его возбуждения. Максимальной световой чувствительностью, называемой абсолютной, обладает зрительный анализатор после длительного пребывания в темноте. Во время пребывания на свету чувствительность уменьшается, главным образом в результате снижения концентрации молекул фотореагентов в светочувствительных клетках сетчатки, уменьшения зрачка глаза, увеличения поглощения фотонов молекулами фусцина, содержащегося в клетках пигментного эпителия, и связанного с этим снижения квантового выхода первой фазы зрительного процесса.

Зависимость световой чувствительности от уровня возбуждения зрительного анализатора вызывает возникновение переходных адаптационных процессов при изменении уровня его возбуждения или соотношения уровней возбуждения его *кэс*-рецепторов.

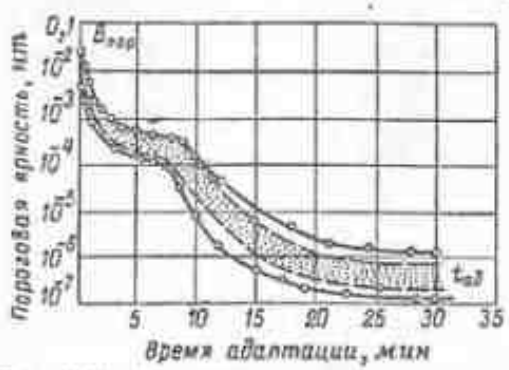


Рис. 1-83. Область, ограниченная пунктирными кривыми, охватывает 80% наблюдателей.

Зрительной адаптацией принято называть приспособление организма человека к различным уровням яркости и к различной цветности поля зрения. Зрительную адаптацию следует рассматривать как процесс непрерывной смены состояний зрительного анализатора в течение некоторого периода времени после перехода от одного возбуждения к другому. Этот процесс характеризуется плавным изменением светлоты или ощущения цветности при постоянстве яркости и цветности поля зрения после скачкообразного их изменения.

Понятие зрительной адаптации часто относят к заключительной фазе адаптационного процесса, говоря о состоянии зрительного анализатора в условиях установившегося соответствия между светлотой и яркостью, а также между ощущением цветности и ее колориметрическим значением. В этом понимании адаптации принято говорить о *яркости адаптации*, которой соответствует вполне определенное установившееся значение светлоты, а также о *цветности адаптации*, однозначно определяющей установившиеся значения ощущения цветности поля зрения. Рассматривая адаптацию как процесс, вызванный изменением яркости или цветности поля зрения наблюдателя, принято его характеризовать функцией изменения во времени количественного критерия ощущения, определяемого чувствительностью зрительного анализатора (рис. 1-83), или качественного критерия ощущения, определяемого его цветовой насыщенностью или тональностью (рис. 1-84).

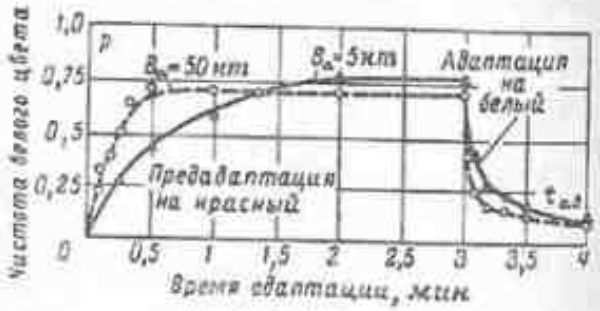


Рис. 1-84.

В зависимости от характеристики изменения условий возбуждения зрительного анализатора его адаптация может быть яркостной или цветовой.

Яркостная адаптация возникает в результате быстрого изменения яркости поля зрения, следовательно, и освещенности сетчатки в зоне изображения. Частными случаями яркостной адаптации являются:

а) *темновая адаптация*, возникающая при мгновенном уменьшении яркости поля зрения от некоторого значения $B_{п.а}$, называемого *яркостью предадаптации*, до нулевого значения яркости адаптации $B_а = 0$.

б) *световая адаптация* — при увеличении яркости от $B_{а.а} = 0$ до некоторого конечного значения $B_а$.

Цветовая адаптация возникает в результате изменения цветности поля зрения при неизменной его яркости. В то время как яркостная адаптация характеризуется несоответствием светлоты и яркости, для цветовой адаптации характерно несоответствие между ощущением цветности и ее колориметрическим значением. Так, например (рис. 1-84), поле сравнения, заполненное белым излучением типа А с $T_ц = 2854°$ К, зрительно воспринимается зеленым с цветовой тональностью $\lambda = 0{,}519$ *мк* [Л. 116] после предадаптационного облучения сетчатки насыщенным красным $\lambda = 0{,}70$ *мк*.

«Позеленение» ощущения белого излучения в результате предадаптации на красный цвет можно объяснить относительным уменьшением концентрации молекул *к*-реагента. Процесс адаптации на белое излучение в этом случае будет характеризоваться постепенным подравниванием концентрации молекул *к*-реагента и *зс*-реагентов, что приведет к плавному снижению цветовой насыщенности ощущения зеленым цветом до нуля. Из графиков предадаптации на красный цвет (рис. 1-84) можно видеть увеличение цветовой насыщенности ощущения зеленого цвета по мере увеличения времени предадаптации. Прекращение прироста цветовой насыщенности ощущения в предадаптационный период, так же как и снижение ее до нуля в процессе адаптации на белое излучение, соответствует завершению процессов цветовой адаптации на красный и на белый цвета.

В действительных условиях часто приходится иметь дело с адаптационными процессами смешанного типа, когда причиной изменения чувствительности зрительного анализатора является изменение одновременно цветности и яркости.

В процессе яркостной адаптации также основную роль играет изменение концентрации молекул фотореагентов. Эти процессы вследствие постоянства цветности излучений, действующих на глаз наблюдателя в предадаптационный и адаптационный периоды, вызывают пропорциональные изменения концентрации молекул всех фотореагентов, в результате чего яркостной адаптации свойственно лишь изменение светлоты при по-

стоянстве ощущения цветности. Большая роль периферического звена зрительного анализатора в любых адаптационных процессах была показана в работах акад. П. П. Лазарева [Л. 117, 118], К. Тэнсли [Л. 119], Р. Литго [Л. 120], С. Гехта [Л. 121], Г. Уолда [Л. 122] и др. Этими работами создана фотохимическая теория зрительного процесса, позволяющая описать кинетику распада молекул фотореагента при взаимодействии их с фотонами, а также кинетику регенерации ионов распада.

Уменьшение электрического фосфена зрительного анализатора в темноте по сравнению с его значением на свету, а следовательно, и изменение электрической чувствительности анализатора в процессе адаптации позволяют рассматривать любой адаптационный процесс как результат изменения функционального состояния не только сетчатой оболочки, но также и центральных участков зрительного анализатора. Подтверждением этому служат результаты опытов по исследованию побочных неадэкватных раздражителей (звуковых, обонятельных и осязательных) на ход темновой адаптации [Л. 123].

Не менее существенным подтверждением значения функционального состояния коры головного мозга в процессах адаптации следует считать зависимость хода адаптационного процесса для одного глаза при предварительном засвете второго. Исследования С. В. Кравкова и Е. Н. Семеновской [Л. 124, 125] показали, что освещение одного глаза в процессе адаптации изменяет течение адаптационного процесса второго глаза, увеличивая его чувствительность через небольшой промежуток времени после окончания засвета. Результаты опытов (рис. 1-85) показывают, что освещение левого глаза в течение 10 мин. белым светом яркостью $B=60$ *нт* после 70-минутной темновой адаптации приводит к значительному изменению кривой адаптации правого глаза. Повышение световой чувствительности правого глаза было наибольшим в тех случаях, когда освещение левого глаза распространилось в основном на его колбочковый аппарат. Этому условию удовлетворяли: а) освещение лишь центральной части сетчатки, практически содержащей одни колбочки, и б) освещение всей сетчатки красным светом, не вызывающим распада молекул родопсина.

Повышение световой чувствительности одного глаза при освещении другого следует объяснить повышением чувствительности центрального участка зрительного анализатора, наблюдавшимся во всех случаях раздражения клеток коры головного мозга. Опыты предадаптационного освещения красным светом двух глаз наблюдателя также показывают рост световой чувствительности, начиная с 10—20 *мин* темновой адаптации.

Интересным является то, что количественная характеристика увеличения чувствительности в результате предварительного освещения одного глаза зависит от яркости действующего на

глаз излучения $B_л$ (рис. 1-86). Оптимальной является яркость ~150 *нт*. Большие яркости засвета $B \geqslant 700$ *нт*, вызывая тормозные процессы в коре головного мозга, приводят к снижению чувствительности незасвеченного глаза. Все описанные явления не могут быть объяснены только процессами изменения концентрации молекул фотореагента, следовательно, подтверждают роль центров в процессах адаптации.

Темновая адаптация. Из изложенного ранее следует, что темновая адаптация является процессом, возникающим в результате изменения чувствительности как периферического, так и центрального звеньев зрительного анализатора.

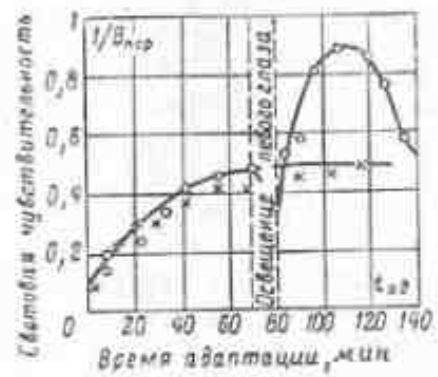


Рис. 1-85.

×—оба глаза в темноте; ○—освещение левого глаза.

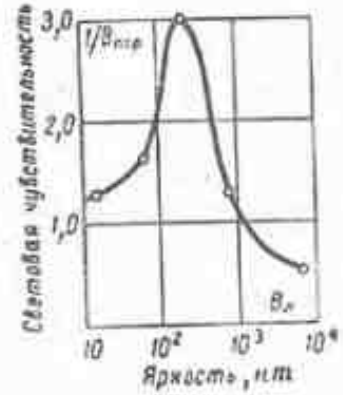


Рис. 1-86.

Завершение процесса темновой адаптации, соответствующее практическому установлению абсолютной световой чувствительности зрительного анализатора, измеряется 1,5—2 *ч*. Как показали исследования А. С. Ахматова [Л. 127] и Новицкого [Л. 128], очень медленное, незначительное увеличение световой чувствительности наблюдалось в течение 24 *ч*.

Большая роль в адаптационных процессах принадлежит изменению чувствительности сетчатой оболочки, что наглядно видно из опытов сравнения световой чувствительности каждого глаза наблюдателя после предадаптационного освещения лишь одного из них. В. Райт [Л. 129] производил фотометрическое сравнение яркостей, наблюдаемых раздельно правым и левым глазом, после предадаптационного освещения левого глаза в течение $t_{а.а}=3$ *мин* источником белого цвета $T_ц=4400°$ К, создавшим освещенность на сетчатой оболочке $(E_л)_{а.а}=6000$ *трол*. Правый глаз в предадаптационное время был погружен в темноту. После 3-минутной предадаптации наблюдателю предлагалось подобрать такую яркость для правого глаза $B_п$, которая была бы равносветлой яркости, предъявлен-

ной левому глазу $B_л$, создававшей на его сетчатке освещенность $E_л = 30$ *трол.*

Вследствие различия концентрации молекул фотореагентов в сетчатых оболочках правого и левого глаза в течение всего последующего времени адаптации имело место неравенство яркостей $B_п$ и $B_л$ при одинаковой светлоте полей сравнения правого и левого глаза наблюдателем. Изменение отношения равносветлых яркостей $B_п : B_л$ в процессе адаптации (рис. 1-87) показывает темновое восстановление чувствительности сетчатой оболочки левого глаза после 3-минутного предадаптационного освещения.

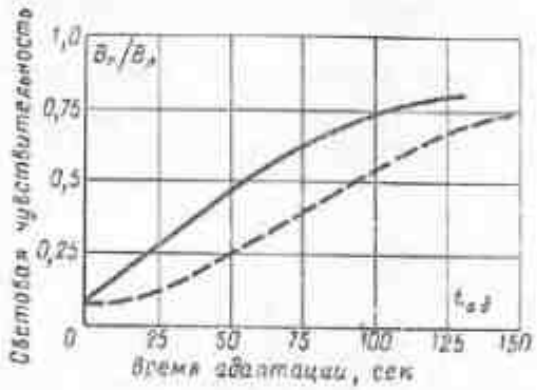


Рис. 1-87.
———59% наблюдателей;
— — —36% наблюдателей.

Большая роль периферии в адаптационных процессах отнюдь не отрицает регулирующего влияния центрального звена зрительного анализатора. Все процессы живого организма, в том числе и поведение периферии органа зрения, в частности регулирование концентрации молекул фотореагентов и эффективности процессов преобразования излучения в зрительное ощущение, контролируются нервными центрами.

Процесс темновой адаптации зрительного анализатора принято характеризовать кривыми изменения светового порога в функции времени адаптации (рис. 1-83) или кривыми изменения световой чувствительности, также в функции времени адаптации (рис. 1-88). По результатам исследований П. П. Лазарева [Л. 118] и В. Нагеля [Л. 126] форма кривых изменения световой чувствительности в процессе темновой адаптации зависит от яркости предадаптации. Если яркость предадаптации невелика (рис. 1-88,*а*), уже в самой начальной стадии адаптации $t \leqslant 10$ *мин* наблюдается существенный рост чувствительности. При высоких уровнях



Рис. 1-88.
а — малая яркость предадаптации; *б* — большая яркость предадаптации.

яркости предадаптации (рис. 1-88,*б*) начальный этап темновой адаптации $t \leqslant 10$ *мин* характеризуется очень малой скоростью роста световой чувствительности зрительного анализатора вследствие наличия затухающего последовательного образа (§ 1-12).

Кривые изменения светового порога в функции времени темновой адаптации имеют две отчетливо выраженные ветви (рис. 1-83), наличие которых служит одним из доказательств двойственности световоспринимающего аппарата (§ 1-3). Как показали исследования Н. И. Пинегина [Л. 131], в соответствии с ходом кривой $B_{пор} = f(t_а)$ в процессе темновой адаптации

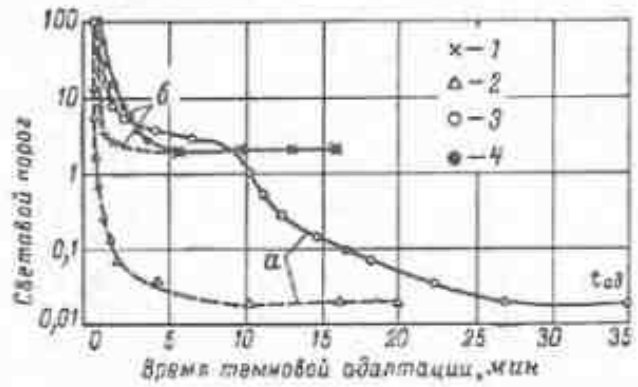


Рис. 1-89.
а — периферические палочки и колбочки; *б* — фовеальные колбочки; *1, 3* — предадаптация к красному B=900 *нт*; *2, 4* — предадаптация к белому $B = 2{,}7 \cdot 10^4$ *нт*.

(рис. 1-89) следует различать не два, а три световоспринимающих аппарата: колбочкового фовеального, колбочкового периферического и палочкового.

Различие значений абсолютной спектральной чувствительности трех световоспринимающих аппаратов (рис. 1-38), выраженной величинами, обратными абсолютным пороговым плотностям излучения (для темноадаптированных наблюдателей), позволяет предполагать различие хода темновой адаптации в условиях предадаптации на разноспектральные излучения одинаковой яркости. Ход кривых изменения абсолютного порога в условиях предадаптации в течение 30 *мин* на разноцветные излучения одинаковой яркости $B = 12{,}7$ *нт* показывает (рис. 1-90) более быстрое завершение процесса темновой адаптации периферического палочкового аппарата для красного предадаптационного излучения и наиболее длительное для синего и белого [Л. 131]. Эта зависимость хода и продолжительности темновой адаптации от спектрального состава предадаптационного излучения полностью согласуется с кривой спектральной чувствительного палочкового аппарата (рис. 1-38).

П. П. Лазаревым в 1916 г. впервые было предложено [Л. 132] рассматривать изменение чувствительности периферического участка зрительного анализатора в условиях темновой адаптации как процесс восстановления молекул родопсина из продук-

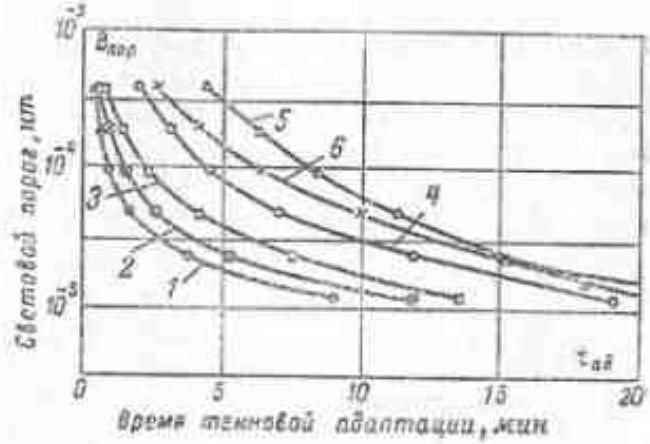


Рис. 1-90.

Предадаптационное освещение.

1 — красное $\lambda=0{,}67$ *мк*; *2* — красное $\lambda=0{,}65$ *мк*; *3* — оранжево-красное $\lambda=0{,}59$ *мк*; *4* — желто-оранжевое $\lambda=0{,}53$ *мк*; *5* — синее $\lambda=0{,}46$ *мк*; *6* — белое.

тов их фотодиссоциации, возникающей под действием фотонов предадаптационного излучения. Принимая реакцию восстановления молекул родопсина мономолекулярной, можно считать скорость восстановления пропорциональной концентрации продуктов распада:

$$\frac{dc}{dt}=a(c_0-c),$$

где c_0 и c — концентрация молекул родопсина в условиях полной темновой адаптации и мгновенное значение концентрации.

Решая это уравнение в пределах изменения концентрации молекул от начального значения $c_{п.а}$, определяемого яркостью предадаптации, до конечного c_0 получим:

$$c=c_0(1-\psi e^{-at}) \qquad (1\text{-}73)$$

и

$$S=S_a(1-\psi e^{-at}), \qquad (1\text{-}73а)$$

где $\psi=\frac{c_0-c_{п.а}}{c_0}$ — доля молекул родопсина, вступивших в реакцию в результате предадаптационного освещения глаза;

a — коэффициент скорости восстановления;

S и S_a — текущее значение световой чувствительности и абсолютная чувствительность при полной темновой адаптации.

Уравнение, аналогичное (1-73а), было получено А. Пютером [Л. 133]. Рассмотренные ранее (ч. 1, § 3-22) закономерности фотохимической реакции распада и восстановления молекул фотореагента приводят к тем же зависимостям изменения чувствительности в процессе яркостной адаптации для $B_{п.а}=B_a$ [уравнение (3-62)]. Относительное значение начальной концентрации $c_{п.а}$ молекул фотореагента, влияющее согласно уравнению (1-73а) на скорость адаптационного процесса, определится для полного завершения предадаптации на яркость $B_{п.а}$ из условия баланса скоростей диссоциации и восстановления молекул фотореагентов [уравнение (3-59)]:

$$\frac{c_{п.а}}{c_0}=\frac{1}{1+AkB}, \qquad (1\text{-}74)$$

где A — параметр, зависящий от условий возбуждения (диаметра зрачка, квантового выхода фотодиссоциации, скорости восстановления ионов распада и пр.);

k — поправочный коэффициент актиничности действующего излучения.

Учитывая реальные значения параметров A и k, можно с достаточной для практики точностью принять для дневного зрения $B\geqslant 10$ *нт* начальную концентрацию обратно пропорциональной яркости:

$$c_{п.а}kB=\text{const}. \qquad (1\text{-}74а)$$

С. Гехт, предполагая реакцию восстановления зрительного пурпура бимолекулярной [Л. 134], получил линейную зависимость

$$S=S_a\left(1-\frac{1}{at+b}\right), \qquad (1\text{-}75)$$

где a и b — параметры, зависящие от предельной концентрации молекул родопсина и скорости восстановительного процесса.

Наличие в уравнениях Лазарева, Пюттера и Гехта постоянных параметров позволяет в значительной мере варьировать форму расчетной кривой темновой адаптации, добиваясь вполне удовлетворительного совпадения с данными эксперимента по уравнениям как мономолекулярной, так и бимолекулярной реакций восстановления. Лишь только для заключительного этапа адаптации (большие значения t_a) различие порядка реакции неустранимо подбором параметров кинетических уравнений. А. А. Новицкий [Л. 128] показал, что для $t_a=180$ *мин* закономерности мономолекулярной реакции более соответствуют результатам эксперимента.

Огромное количество экспериментальных работ по исследованию темновой адаптации и изучению влияния на этот процесс внешних причин (состояние нервной системы, действие лекарственных препаратов и пр.) позволило применить метод адаптометрии в клинической диагностике.

Световая адаптация. Световая адаптация характеризуется изменением световой чувствительности зрительного анализатора в процессе его приспособления к заданной ярко-

сти B_a после длительного пребывания в темноте. В противоположность темновой адаптации световая характеризуется понижением световой чувствительности в результате снижения концентрации молекул фотореагентов, уменьшения диаметра зрачка и увеличением доли поглощенного излучения молекулами фуксина.

Кривые $S=f(t_a)$ в условиях световой адаптации (рис. 1-91) характеризуются наибольшей крутизной в первую минуту приспособления зрительного анализатора. Это начальное падение

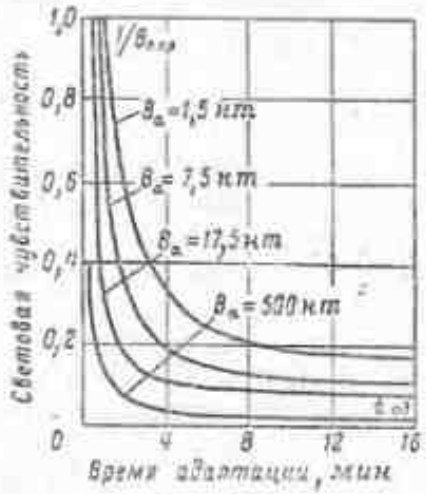


Рис. 1-91.

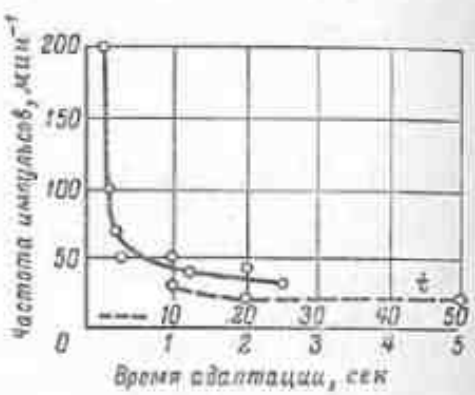


Рис. 1-92.
——адаптации в течение последних 40 сек.

чувствительности тем резче, чем больше яркость, на которую адаптируется наблюдатель. Характерная форма кривой изменения световой чувствительности в процессе световой адаптации аналогична форме кривой изменения частоты импульса тока действия, обнаруженной Р. Гранитом в изолированном волокне зрительного нерва [Л. 135], в условиях адаптации на яркость $B_a=620$ *нт* (рис. 1-92). Это сходство кривых подчеркивает соответствие частоты импульсов тока действия уровню зрительного ощущения, следовательно, светлоте пороговых излучений. Общая длительность процесса световой адаптации обычно не превышает 5—10 *мин*. Бо́льшую длительность процессов адаптации на темноту по сравнению с адаптацией на свет следует объяснить значительно меньшей скоростью процессов восстановления молекул родопсина по сравнению со скоростью их фотодиссоциации.

Исследование процесса световой адаптации впервые было проведено И. Крисом [Л. 136], который оценивал относительную световую чувствительность зрительного анализатора обратным отношением яркостей, обеспечивающих одинаковую светлоту. Наблюдатель смотрел в течение некоторого постоянного для опыта времени после предварительной темновой адаптации на

два смежных поля сравнения, одно из которых было закрыто черным непрозрачным экраном, а другое имело заданную яркость адаптации B_a. По истечении некоторого времени t_a черный экран удалялся и наблюдатель устанавливал равенство светлот полей сравнения. Чем бо́льшие значения яркости и времени адаптации задавались, тем значительнее требовалось уменьшить яркость поля сравнения, ранее закрытого экраном.

Второй метод исследования хода световой адаптации был предложен В. Ломаном [Л. 137]. В этом методе световая чувствительность измерялась в темноте на адаптометре после пребывания наблюдателя в течение времени t_a в условиях яркости B_a. Измерение светового порога осуществлялось в первый момент погружения в темноту. В методе Ломана любая точка кривой световой адаптации определяется как начальная точка кривой темновой адаптации при соответствующих значениях яркости и времени предадаптационного периода. Эта общность параметров темновой и световой адаптации определяет единство механизма любого процесса яркостной адаптации.

Фотохимическая природа изменения чувствительности сетчатки в процессе световой адаптации была сформулирована П. П. Лазаревым аналогично темновой адаптации кинетическим уравнением

$$S = AS_a + (1-A)\,S_a e^{-\beta t}; \qquad (1\text{-}76)$$

где $A=\frac{\alpha_2}{\alpha_1 k_\pi B_a+\alpha_2}$;

$\beta=\alpha_1 k_\pi B_a+\alpha_2$;

α_1 — коэффициент скорости фотодиссоциации;

α_2 — коэффициент скорости восстановления;

k_π — показатель поглощения света фотореагентом;

B_a — яркость адаптации.

Уравнение (1-76) можно получить путем преобразования уравнения (3-62), приведенного в первой части настоящего руководства.

Цветовая адаптация. При изменении спектрального состава излучения источников света изменяется ощущение цветности объектов, освещаемых этими источниками. Это происходит не только за счет изменения цветности наблюдаемых объектов вследствие изменения спектрального состава отраженного ими излучения, но также и за счет изменения чувствительности зрительного анализатора в результате изменившегося соотношения уровней возбуждения трех его рецепторов. Изменение соотношения уровней возбуждения *кзс*-рецепторов зрительного анализатора приводит к изменению цветовой насыщенности и цветовой тональности ощущения, в частности к возникновению цветовой тональности зрительных ощущений от ахроматических цветов. Цветовая адаптация к насыщенным цветам любого цветового тона после предадаптации к белому приводит к постепенному снижению цветовой насыщенности ощущения. Цвет, на который адаптируется зрительный анализатор, как бы выцветает. Это происходит в результате того, что

участок сетчатки, адаптированный на какой-либо насыщенный цвет, например красный, теряет к нему чувствительность в результате относительного снижения концентрации молекул к-реагента. Предадаптация на цвет, дополнительный цвету адаптации, приводит в начальный момент адаптации к еще большей насыщенности ощущения цветности и к дальнейшей количественно большей потере насыщенности в процессе адаптации.

Как показали исследования цветовой адаптации Е. Н. Юстовой [Л. 138], изменения ощущения цветности в процессе цветовой адаптации могут достигать 15—20 цветовых порогов. Эти исследования позволили также сделать вывод о независимости характера изменения цветности в процессе цветовой адаптации от яркости наблюдаемого цвета. Этот вывод существенно важен потому, что он дополнительно подчеркивает правомерность условного деления характеристик цвета на качественную (цветность) и количественную (яркость).

Исследования Е. Н. Юстовой были выполнены на трехцветном колориметре с размером полей сравнения 2°. Фон, окружающий поля сравнения, был светлым и имел цвет предадаптации. После зрительного уравнивания исследуемого цвета со смесью трех основных цветов колориметра поля сравнения перекрывались на 2—3 *мин* белым экраном. В течение этого времени наблюдатель предадаптировался на цвет фона. После завершения процесса предадаптации открывалось поле сравнения, заполненное исследуемым цветом, и некоторый вполне определенный участок сетчатки адаптировался на этот цвет. Затем открывалось второе поле сравнения и наблюдатель вновь устанавливал зрительное тождество путем изменения пропорции трех цветов колориметра. После установки зрительного тождества поле сравнения, заполненное смесью трех цветов колориметра, вновь перекрывалось белым экраном на 3—10 *сек*. По истечении этого времени вновь удалялся экран и устанавливалось новое зрительное тождество полей сравнения. Такие повторные (три-четыре) отыскания новых зрительных тождеств проводились до их стабилизации. После этого исследуемый цвет устанавливался колориметрически одинаковым с цветом поля сравнения, зафиксированным последним зрительным тождеством, и все измерения проводились вновь в прежнем порядке до новой стабилизации выцветания нового исследумого цвета.

Как показали исследования Е. Н. Юстовой, любой насыщенный цвет, воспроизводимый с помощью трех основных цветов колориметра, в результате двух-трех серий последовательных сравнений достигал цвета фона, и изменения ощущения цветности прекращались.

Результаты измерений в условиях предадаптации на белый цвет фона, близкий к дневному цвету (рис. 1-93), подтверждают изложенные ранее выводы. Графики выцветания исследуемых цветов приведены в трехкоординатной системе пропорций смеси трех основных цветов колориметра (красного — *Кр*, зеленого — *Зел* и синего — *Син*). Цвет фона, изображенный на графике точкой *Ф*, соответствует пропорции основных цветов: 0,15 *Кр* + +0,58 *Зел*+0,27 *Син*. Для красного, зеленого и синего исследуемых цветов измерения адаптации производились на двух

уровнях яркости, отличающихся в 6 раз. Результаты этих измерений в пределах точности измерений повторяют друг друга. Все кривые выцветания исследуемых цветов, приведенные на графике (рис. 1-93), стремятся в пределе к точке *Ф*, в частности все красные, пурпурные, фиолетовые и синие в процессе адаптации заметно зеленеют. Это следует объяснить тем, что состоянию адаптации на белый цвет *Ф* со значительной составляющей зеленого соответствует относительно большее уменьшение чувствительности з-рецепторов зрительного анализатора. Следовательно, при составлении зрительно тождественной смеси наблюдатель увеличивает долю зеленого для компенсации снижения чувствительности зелено-ощущающего рецептора. При составлении тождественной смеси для зеленых исследуемых цветов наблюдатель, наоборот, выбирает большую долю синих и красных вследствие того, что их доля в исследуемых цветах меньше, чем в предадаптационном цвете фона.

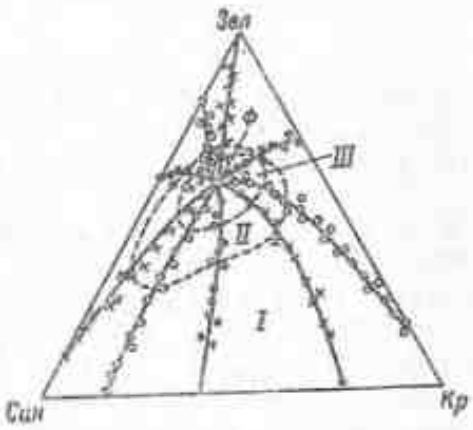


Рис. 1-93.

На графике адаптационного изменения цветности нанесены две пунктирные замкнутые кривые, представляющие собой геометрическое место точек, соответствующих ощущениям цветностей исследуемых цветов после первой и второй серии установления цветовых тождеств. Следовательно, все точки, лежащие в зоне I — от начальных значений цветности исследуемых цветов (точки на сторонах треугольника) до наружной пунктирной кривой, соответствуют изменениям ощущения цветности при постоянстве исходных исследуемых цветов. Вторая зона графика (зона II) соответствует изменению ощущений исследуемых цветностей, установленных по концу первой серии измерений, и зона III — по концу второй серии измерений. Из этого следует, что каждая зона соответствует адаптационному выцветанию тех цветов, которые изображены точками наружной граничной кривой этой зоны.

Изложенный метод исследования цветовой адаптации принято называть *методом местной адаптации*. Это название метода определяется тем, что при исследовании этим методом происходит сравнение реакций двух различно адаптированных смежных мест сетчатки. Метод местной адаптации применял Д. Мак-Адам [Л. 139], производя цветовое подравнивание по памяти в течение 9 *сек* после секундного предъявления полей сравнения, заполненных исследуемым цветом и регулируемой смесью трех основных цветов колориметра. Поля сравнения предъявлялись наблюдателю до полного согласования цветовых ощущений.

Второй метод *бинокулярного согласования цветов*, применявшийся в исследованиях цветовой адаптации Р. Бернемом, Р. Эвансом и С. Ньюхолом [Л. 140], отличается от изложенного тем, что цвет исследуемый и регулируемая смесь трех цветов проецируются на сетчатки разных глаз наблюдателя.

Третий метод, названный *методом «памяти цветов»*, был применен Г. Хельсоном, Д. Джаддом и М. Вильсоном [Л. 141, 142] в исследованиях цветопередачи отражающих цветных объектов, освещенных различными источниками белого цвета (лампы накаливания и люминесцентные лампы различных типов). В исследованиях цветовой адаптации третьим методом заранее тренировавшиеся наблюдатели после тщательного ознакомления с выкрасками из атласа Мэнселла (§ 2-11) в начальных условиях освещения источником *С* подбирали тождественные по зрительному ощущению выкраски для новых условий освещения после предварительной 5-минутной адаптации.

Исследования процессов цветовой адаптации позволили создать метод приближенного расчета ощущений цветности, выражая их для любой фазы адаптации эквивалентными значениями цветности. Такой метод основан на принципе учета изменения коэффициентов цветоощущения (§ 1-10) в процессе адаптации. Согласно (1-65) изменение ощущения цветности в процессе адаптации можно выразить изменением соотношения концентраций молекул *кзс*-рецепторов зрительного анализатора или пропорциональным изменением *кзс*-компонентов цвета, определяемых (1-66).

В условиях дневного зрения при установившейся адаптации относительная концентрация молекул любого из трех *кзс*-реагентов светочувствительного аппарата глаза может быть определена в соответствии с (1-74а) величиной, обратно пропорциональной соответствующему компоненту цвета адаптации. Ахроматическим цветом, по сравнению с которым принято оценивать условия цветовой адаптации, принято брать белый цвет стандартного источника света *С*:

$$\frac{(c_К)_a}{(c_К)_C}=\frac{(B_К)_C}{(B_К)_a};\quad \frac{(c_З)_a}{(c_З)_C}=\frac{(B_З)_C}{(B_З)_a};\quad \frac{(c_С)_a}{(c_С)_C}=\frac{(B_С)_C}{(B_С)_a} \qquad (1\text{-}77)$$

и соответственно:

$$(\mu_К)_a=\frac{(B_К)_C}{(B_К)_a}\mu_К;$$

$$(\mu_З)_a=\frac{(B_З)_C}{(B_З)_a}\mu_З, \qquad (1\text{-}78)$$

где $(B_К)_C$, $(B_З)_C$, $(B_С)_C$; $(B_К)_a$, $(B_З)_a$, $(B_С)_a$ — количественные (яркостные) выражения *КЗС*-компонентов белого цвета источника *С* и цвета адаптации;

$(\mu_К)_a$ и $\mu_К$; $(\mu_З)_a$ и $\mu_З$ — коэффициенты цветоощущения в заданных условиях адаптации и их расчетные значения без учета адаптационных изменений чувствительности *кзс*-рецепторов.

Как показывают результаты экспериментального исследования процессов цветовой адаптации (§ 2-17), приближенный метод расчета обладает достаточной для практики точностью. В тех случаях, когда необходимо рассчитать цветоощущение не только при установившейся цветовой адаптации, следует текущие значения концентрации молекул фотореагентов определять из (1-76).

1-12. Зрительная инерция

Инерционность зрительного анализатора. Инерцией любой системы принято считать свойство сохранять то состояние, в котором она находится, следовательно, свойство реагировать на изменения внешней среды с некоторым опозданием. В соответствии с этим *зрительная инерция* определяется реакцией зрительного анализатора не только на излучения, действующие в исследуемый момент времени, но и на предшествующие. Зрительная инерция в отличие от адаптации определяется постепенным ростом светлоты излучения постоянной яркости в результате конечной длительности всех этапов зрительного процесса, а также последействием ионов распада предшествующего возбуждения (§ 1-5). Постепенное использование ионов распада вызывает постепенное уменьшение светлоты после прекращения действия излучения.

Ход затухания светлоты во времени после прекращения действия излучения на зрительный анализатор принято называть *функцией зрительной инерции*, а продолжительность процесса затухания светлоты — *временем зрительной инерции*. Наличие у зрительного анализатора инерционности биологически целесообразно, так как она способствует сглаживанию флуктуаций действующего на глаз излучения и этим обеспечивает устойчивость зрительного процесса.

Зрительная инерция обнаруживается в последовательных образах, возникающих после прекращения действия на глаз излучений большой яркости, в слитии мельканий периодически с высокой частотой повторяющихся кратковременных излучений, в зависимости светлоты от времени действия на глаз одиночных световых кратковременных импульсов и пр. Зрительная инерция, так же как и зрительная адаптация, приводит к зависимости светлоты и ощущения цветности не только от яркости и цветности действующего в данный момент излучения, но также и от уровней и качества предшествующих возбуждений. Лишь только в том случае, когда на зрительный анализатор неограниченно большое время действует излучение постоянной

яркости и цветности, светлота и ощущение цветности однозначно определяются яркостью и цветностью постоянно действующего излучения.

Оценка светлоты излучения, действующего на глаз наблюдателя, одним из ранее изложенных методов (§ 1-8) в условиях неустановившихся зрительных процессов не разработана, вследствие чего А. В. Луизов [Л. 143, 144] предложил пользоваться понятием *эффективной яркости*[1]. Эффективная яркость в любой момент времени по Луизову эквивалентна такой постоянной яркости, которая при длительном действии на глаз наблюдателя вызывала бы зрительное ощущение, одинаковое с исследуемым мгновенным значением ощущения. Из этого определения следует, что в неустановившихся зрительных процессах эффективная яркость непрерывно изменяется, даже в условиях постоянного фотометрического значения яркости излучения, кратковременно действующего на глаз наблюдателя. Следовательно, вводя понятие эффективной яркости неустановившегося процесса, мы говорим о мгновенных ее значениях, которые являются лишь отдельными фазами этого переменного по времени зрительного процесса.

Из определения эффективной яркости можно видеть, что любому ее значению соответствует вполне определенное, единственно возможное значение светлоты. Из определения также явствует, что для любого установившегося зрительного процесса эффективная яркость численно равна фотометрическому значению яркости действующего на глаз излучения или значению эквивалентной яркости в условиях $B \leqslant 10$ *нт*. Следовательно, эффективная яркость, однозначно определяя мгновенное значение светлоты какой-либо фазы неустановившегося зрительного процесса, отличается от светлоты не только различием единиц измерения, но также и тем, что связь ее со светлотой нелинейна.

По аналогии с эффективной яркостью возможно ввести понятие *эффективного блеска точечного излучателя* Q_τ и *эффективного контраста объекта наблюдения с фоном* W_τ. Эти величины являются мгновенными, так же как и эффективная яркость в условиях неустановившегося зрительного процесса. Эффективным блеском точечного излучателя с переменной по времени освещенностью зрачка глаза принято считать в каждый исследуемый момент времени такую постоянную по времени освещенность на зрачке, которая создает зрительное ощущение, тождественное с исследуемым мгновенным значением ощущения. Понятие эффективного блеска приемлемо также для оценки

[1] Ранее выведенное понятие эффективной яркости, определяемой числом пороговых приращений яркости [Л. 46], правильнее называть светлотой (§ 1-8).

кратковременных вспышек. Приемлемость этого понятия в данном случае определяется тем, что малая продолжительность вспышки τ не сможет обеспечить полного формирования зрительного ощущения $Q_\tau < Q_\infty$ (рис. 1-94). Так, например, если вспышка с длительностью $\tau = 0{,}02$ *сек*, создающая на зрачке наблюдателя освещенность $E_{зр} = 150$ *мклк*, будет воспринята наблюдателем равносветлой с непрерывно действующим точечным огнем, обладающим блеском $E_\infty = 50$ *мклк*, численное значение эффективного блеска вспышки следует принять $Q_{\tau=0{,}02} = 50$ *мклк*.

Эффективный контраст объекта наблюдения с фоном можно определить как относительную разность эффективных яркостей объекта наблюдения и фона в каждый данный момент неустановившегося зрительного процесса:

$$W(\tau) = \frac{N_o(\tau) - N_\phi(\tau)}{N_\phi(\tau)}, \qquad (1\text{-}79)$$

где $W(\tau)$ — функция эффективного контраста;

$N_o(\tau)$ и $N_\phi(\tau)$ — функции эффективной яркости объекта наблюдения и фона.

Эффективный контраст можно также определить по аналогии с эффективной яркостью и эффективным блеском как такое значение контраста объекта и фона, наблюдаемых неограниченное время, при котором зрительное ощущение тождественно исследуемому мгновенному ощущению переменного по времени или кратковременно наблюдаемого контраста.

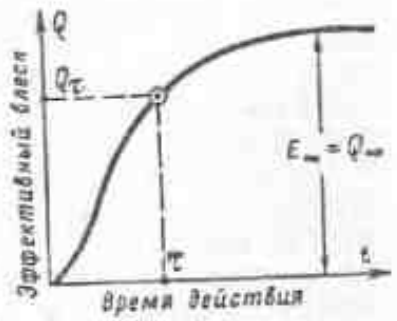


Рис. 1-94.

Впервые понятие об эффективной яркости в неясной форме ввели в 1902 г. А. Брока и Д. Зульцер [Л. 145], исследовавшие ход развития зрительного ощущения во времени. Они проводили фотометрическое сравнение яркостей непрерывно действующего на глаз наблюдателя излучения и кратковременных вспышек.

Два поля сравнения в виде квадратов с угловыми размерами сторон $\alpha = 2°$ заполнялись излучением с постоянной по времени регулируемой яркостью и кратковременными вспышками с исследуемой яркостью. Вспышки повторялись периодически с малой частотой, позволяющей видеть их раздельно. Наблюдатель, регулируя яркость поля постоянного по времени излучения, устанавливал равенство светлот полей сравнения. Исследования проводились в условиях темновой адаптации с искусственным зрачком $d = 2{,}5$ *мм*.

Результаты измерений приведены (рис. 1-95) в виде кривых $N = f(\tau)$, принимая условно яркость поля постоянного излучения за эффективную яркость. Кривые $N = f(\tau)$ имеют максимумы, тем более выраженные, чем большей яркостью обладала вспышка. Время максимума функций $N(\tau)$ изменялось от 0,032 *сек* для $B_н = 45$ *нт* ($\mathscr{E}_c \approx 200$ *трол*) до 0,10 *сек* для $B_н = 2{,}6$ *нт* ($\mathscr{E}_c \approx 26$ *трол*). Максимум функции $N(\tau)$ при больших значениях яркости исследуемых вспышек превышал установившиеся значения N в 5—5,5 раз. Время стабилизации зрительного ощущения равнялось 1,1—2,5 *сек*, увеличиваясь при уменьшении яркости вспышек $B_н$. Наличие максимумов, превышающих установившееся значение эффективной яркости для вспышки с длительностью больше 1,1—2,5 *сек*, отчетливо показывает роль адаптационных процессов.

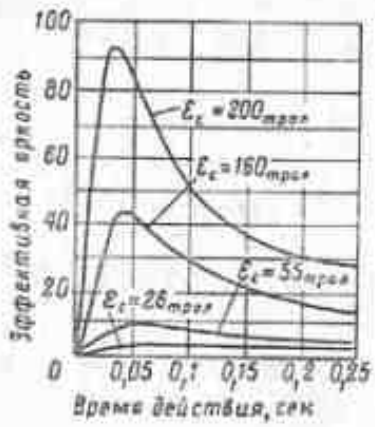


Рис. 1-95.

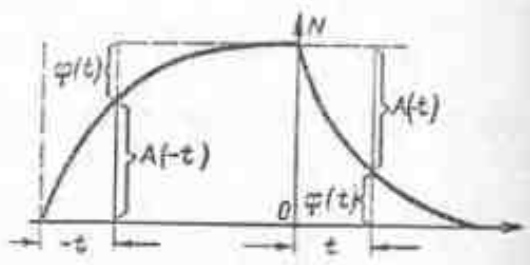


Рис. 1-96.

При исключении адаптационных процессов предельно максимальное значение эффективной яркости не может превышать ее установившегося значения для любой яркости вспышки. Предельное значение эффективной яркости при неограниченном времени действия излучения численно равно его яркости. Полное соответствие между эффективной яркостью и ее фотометрическим значением в условиях длительного постоянства яркости поля зрения определяется устанавливающимся балансом постепенного затухания совокупности предшествующих возбуждений и одновременного роста их эффективной яркости в результате развития зрительного ощущения во времени.

При определении баланса процессов затухания и развития зрительного ощущения необходимо учитывать суммирующую способность зрительного анализатора. Эта способность зрительного анализатора выражается зависимостью уровня его реакции от совокупности числа фотонов, эффективно поглощенных сетчаткой в течение всего времени зрительной инерции, а также их распределением по этому промежутку времени. Следовательно, можно предположить, что бесконечно малому

приросту действия излучения будет соответствовать некоторое, также бесконечно малое приращение эффективной яркости:

$$dN(\vartheta) = \frac{1}{\vartheta} B(t) A(\vartheta - t)\, dt,$$

где ϑ и t — координаты времени зрительного ощущения и вызывающего его излучения;

$A(\vartheta - t)$ — безразмерная функция формирования зрительного ощущения, характеризующая способность анализатора сохранять и суммировать зрительные ощущения во времени;

ϑ — постоянная, имеющая размерность времени.

Функция формирования ощущения $A(\vartheta - t)$ определяется совокупностью функций затухания зрительного ощущения и его развития. Принимая в соответствии с суммирующим свойством зрительного анализатора эффективную яркость подчиняющейся правилу аддитивности, получим:

$$N(\vartheta) = \frac{1}{\vartheta} \int_{-\infty}^{\vartheta} B(t) A(\vartheta - t)\, dt. \qquad (1\text{-}80)$$

Пределы интегрирования, принятые в уравнении (1-80), характеризуют неограниченно длительное действие излучения, эффективная яркость которого определяется в момент $t = \vartheta$. В соответствии с ранее принятым определением эффективной яркости следует считать: при $t = \vartheta$ $A(\vartheta - t) = 1$ и при $t = -\infty$ $A(\vartheta - t) = 0$. Эти значения функции соответствуют окончанию и началу действия излучения. После прекращения действия излучения эффективная яркость предшествующего возбуждения начинает уменьшаться, стремясь к нулю (рис. 1-96). Уменьшение эффективной яркости характеризуется функцией зрительной инерции

$$\varphi(t) = \frac{N(t)}{N_0}, \qquad (1\text{-}81)$$

где $N(t)$ — функция инерции в абсолютных значениях эффективной яркости;

N_0 — мгновенное значение эффективной яркости в момент окончания действия излучения.

В первом приближении можно принять [Л. 143] функцию формирования зрительного ощущения аналогичной функции инерции (рис. 1-96):

$$A(-t) = 1 - \varphi(t). \qquad (1\text{-}82)$$

Это соотношение следует из равенства числа ионов последействия числу эффективно поглощенных фотонов, не преобра-

зовавшихся в зрительное ощущение в течение всего периода действия излучения постоянной яркости B:

$$\frac{1}{\vartheta} B \int_{-\infty}^{0} A(t)\,dt = \frac{1}{\vartheta} B \int_{0}^{\infty} \varphi(t)\,dt. \qquad (1\text{-}82a)$$

Пользуясь этим правилом, напишем выражение эффективного контраста объекта наблюдения яркостью B_0, кратковременно появляющегося на фоне длительно наблюдаемой яркости B_Φ. Применяя для этой цели (1-79), (1-80) и считая время действия фона в течение времени от $t_н = -\infty$ до $t_к = 0$, а время действия объекта от $t_н = -\tau$ до $t_к = 0$, получим:

$$W = \frac{\left[\frac{1}{\vartheta} B_\Phi \int_{-\infty}^{-\tau} A(t)\,dt + \frac{1}{\vartheta} B_0 \int_{-\tau}^{0} A(t)\,dt\right] - \frac{1}{\vartheta} B_\Phi \int_{-\infty}^{0} A(t)\,dt}{\frac{1}{\vartheta} B_\Phi \int_{-\infty}^{0} A(t)\,dt}.$$

Сокращая полученное отношение на ϑ и разбивая интеграл с пределами от $-\infty$ до $-\tau$ на разность двух интегралов от $-\infty$ до 0 и от $-\tau$ до 0, получим окончательное выражение эффективного контраста:

$$W = \frac{B_0 - B_\Phi}{B_\Phi} \frac{\int_{-\tau}^{0} A(t)\,dt}{\int_{-\infty}^{0} A(t)\,dt} = k \frac{\int_{0}^{\tau} \varphi(t)\,dt}{\int_{0}^{\infty} \varphi(t)\,dt}, \qquad (1\text{-}83)$$

где τ — длительность наблюдения объекта;
k — яркостный контраст объекта наблюдения с фоном.

Функция зрительной инерции. Изменение эффективной яркости последействия можно принять в первом приближении пропорциональным уменьшению концентрации отрицательных ионов, скопившихся в сетчатке после прекращения действия излучения. Предполагая [Л. 144] процесс эффективного уменьшения концентрации ионов за счет преобразования их в молекулы ретинена с последующим окислением и переносом в сосудистую оболочку мономолекулярным, а процесс уменьшения концентрации за счет рекомбинации с положительными ионами распада молекул фотореагента — бимолекулярным, можно написать следующее дифференциальное уравнение:

$$-\frac{dc}{dt} = ac + bc^2, \qquad (1\text{-}84)$$

где $\frac{dc}{dt}$ — скорость уменьшения концентрации отрицательных ионов;
a и b — коэффициенты скорости восстановления молекул фотореагентов.

Интегрируя полученное уравнение (1-84) после разделения переменных в пределах от c_0 до c и от 0 до t, получим:

$$c = \frac{ac_0}{ac^{at} + bc_0 e^{at} - bc_0}, \qquad (1\text{-}85)$$

где c_0 и c — начальное и текущее значения концентрации отрицательных ионов.

Обозначив $\gamma = \frac{bc_0}{a}$, получим согласно (1-81) и (1-85) выражение функции зрительной инерции:

$$\varphi(t) = \frac{c}{c_0} = \frac{1}{(1+\gamma)e^{at} - \gamma}. \qquad (1\text{-}86)$$

Анализируя полученное уравнение, можно сделать следующие выводы:

а) функция зрительной инерции $\varphi(t)$ приближается к экспоненте e^{-at} при уменьшении γ и обращается в нее при $\gamma = 0$;

б) по мере увеличения γ функция зрительной инерции приближается к гиперболической зависимости типа

$$\varphi(t) = \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{\vartheta}\right)^2}, \qquad (1\text{-}87)$$

где ϑ — постоянная времени в (1-80).

Время зрительной инерции. Из уравнения (1-80) следует, что интегрирование функции зрительной инерции дает некоторую величину, зависящую лишь только от свойств зрительного анализатора. Эта величина имеет размерность времени. Для доказательства этих положений рассмотрим соотношение эффективной и фотометрической яркостей, установившееся в результате длительного действия излучения постоянной яркости B. Согласно уравнению (1-80) получим:

$$N_\infty = \frac{1}{\vartheta} B \int_{-\infty}^{0} A(t)\,dt = \frac{1}{\vartheta} B \int_{0}^{\infty} \varphi(t)\,dt.$$

Вследствие того, что эффективная яркость при длительном действии на зрительный анализатор численно равна постоянному значению фотометрической яркости действующего излучения,

интеграл функции зрительной инерции в пределах от 0 до ∞ является величиной постоянной:

$$\vartheta = \int_0^\infty \varphi(t)\,dt. \qquad (1\text{-}88)$$

Графическая интерпретация полученного выражения (рис. 1-97) позволяет рассматривать ϑ как некоторое время, в течение которого зрительное ощущение сохранилось бы неизменным, а затем мгновенно уменьшалось до нуля. А. В. Луизов предложил называть эту величину *временем зрительной инерции (эффективным временем сохранения зрительного ощущения)*. Следует отметить, что время инерции, найденное согласно А. В. Луизову [Л. 147] из уравнения (1-88), не определяет полную длительность инерционных процессов, так же как эта условная характеристика зрительной инерции лишь приближенно может характеризовать время существования последовательного образа.

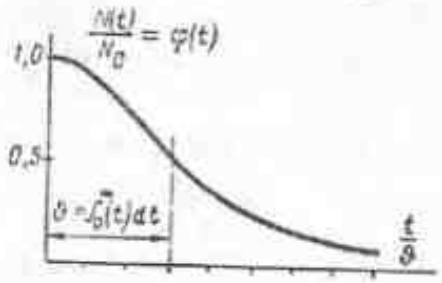


Рис. 1-97.

В соответствии с этой трактовкой понятия времени зрительной инерции физический смысл (1-83) становится вполне отчетливым:

$$W\vartheta = k\int_0^\tau \varphi(t)\,dt. \qquad (1\text{-}89)$$

В условиях очень малых значений времени наблюдения объекта τ можно с достаточной для практики точностью принять $\varphi(t) = 1$. При этом (1-89) будет:

$$W = k\frac{\tau}{\vartheta}. \qquad (1\text{-}89а)$$

Полученное уравнение (1-89а) показывает, что при кратковременном наблюдении контраст объекта с фоном уменьшается пропорционально отношению времени наблюдения к времени зрительной инерции.

Экспериментальное исследование области применимости (1-89а) показало [Л. 146] достаточную его точность для $\tau \leqslant 0{,}2\vartheta$ (рис. 1-98).

Точность (1-89а) исследовалась путем измерения скорости обнаружения простейших объектов наблюдения в виде дисков с угловыми размерами 5,5′ — 11′ и контрастами 0,18 — 1,0 в условиях яркости $B = 31{,}2$ *нт*. Для каждого исследуемого объекта предварительно определялось пороговое значение контраста $k_{пор}$ при неограниченном времени наблюдения.

Экспериментальное определение времени зрительной инерции осуществлялось различными методами [Л. 147]:

а) сравнением пороговых значений яркостного контраста тест-объекта, или блеска точечного огня, при неограниченном и малом времени наблюдения;

б) сравнением порогового мгновенного изменения яркости светлого пятна на короткий промежуток времени и на неограниченное время;

в) установлением зрительного тождества между постоянным огнем и кратковременными вспышками.

Для определения времени зрительной инерции первым методом измеряются пороговые значения яркостного контраста при неограниченном и малом времени наблюдения объекта. Время зрительной инерции при этом определяется из (1-89) или (1-89а) в зависимости от W/k.

Второй метод экспериментального определения ϑ основан на измерении пороговых изменений яркости светлого пятна на фоне заданной яркости.

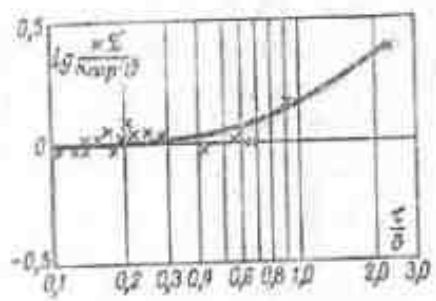


Рис. 1-98.
ϑ=0,053 *сек*; B=31,2 *нт*.

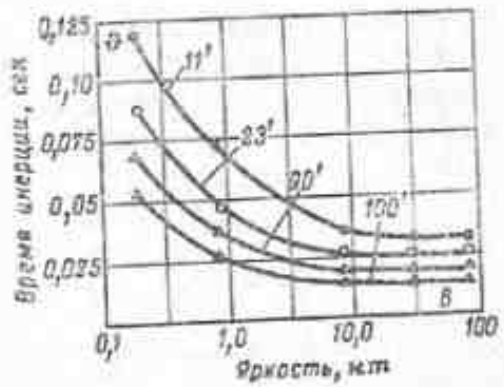


Рис. 1-99.

Пороговые изменения яркости пятна определялись при мгновенном изменении его яркости на величину ΔB_τ. Пятно с яркостью $B \pm \Delta B_\tau$ фиксировалось в течение времени τ, после чего яркость пятна вновь изменялась мгновенно до прежнего значения B. Как показали эти измерения, пороговое значение яркости увеличивалось при уменьшении времени наблюдения τ. При неограниченном времени $\tau \to \infty$ пороговое значение изменения яркости во времени ΔB_∞ минимально. Минимальное значение порогового изменения яркости во времени ΔB_∞ в 3—5 раз превышает величину пороговой разности яркости, измеренную в условиях оптического контакта полей сравнения, однако величина ΔB_∞ не превышает $0{,}07B$, даже в условиях яркости $B = 0{,}2$ *нт* при $\tau = 1{,}5°$. В соответствии с теорией зрительной инерции отношение ΔB_τ к ΔB_∞ можно определить из уравнения (1-89) или (1-89а) при $\tau \leqslant 0{,}2\vartheta$. Зная из опыта ΔB_τ, ΔB_∞ и τ, определяют время зрительной инерции. Как можно видеть из результатов экспериментов, проведенных по этой методике [Л. 148], время зрительной инерции зависит от уровня яркости и углового размера тест-объекта (рис. 1-99).

Третий метод экспериментального определения времени зрительной инерции основан на визуальном сравнении эффективных яркостей постоянного

огня и кратковременных вспышек. Время зрительной инерции в этом случае также определится из (1-89) или (1-89а) в зависимости от длительности вспышки.

Для установления соответствия (1-89) и (1-89а) результатам экспериментов воспользуемся общим видом уравнения зрительной инерции (1-86). Интегрируя это уравнение в пределах от 0 до ∞, получим выражение для времени зрительной инерции:

$$\vartheta = \frac{\ln(1+\gamma)}{a\gamma}. \qquad (1\text{-}90)$$

Уравнение (1-86) при этом получит следующий вид:

$$\frac{k}{W} = \frac{\lg(1+\gamma)}{\lg(1+\gamma-\gamma e^{-at})} \qquad (1\text{-}91)$$

или

$$\frac{E_{зр}}{Q} = \frac{\lg(1+\gamma)}{\lg(1+\gamma-\gamma e^{-at})}. \qquad (1\text{-}91а)$$

Пользуясь (1-91а), построена кривая ($\gamma = 10$; $e^{-a} = 0{,}987$ и $\vartheta = 0{,}18$ *сек*) изменения отношения $E_{зр}$: Q для пороговых значений блеска точечного источника, расположенного в центре поля зрения (рис. 1-100). На эту кривую нанесены результаты экспериментов

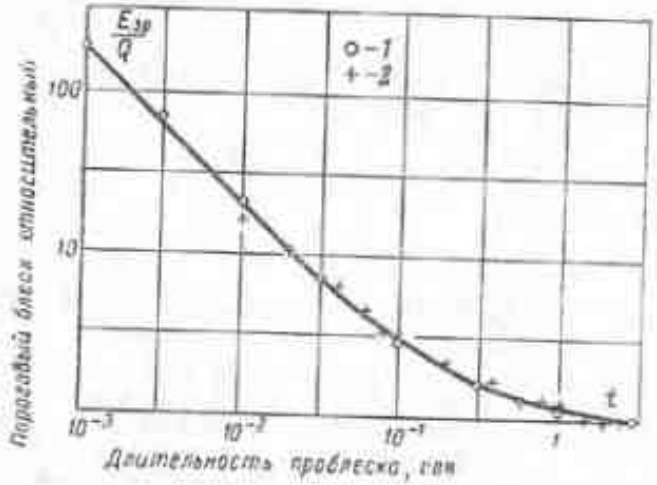


Рис. 1-100.
Центральное зрение.
1—по Блонделю и Рею; 2—по Луизову.

А. В. Луизова [Л. 147] и Блонделя и Рея [Л. 148]. На рис. 1-101 приведена аналогичная кривая ($\gamma = 6{,}5$; $e^{-a} = 0{,}989$ и $\tau = 0{,}27$ *сек*) для случая обнаружения кратковременных вспышек периферическим зрением. Обе кривые показывают вполне удовлетворительное совпадение расчетных данных с результатами эксперимента. Время инерции, найденное из результатов экспериментального определения времени обнаружения объектов с различными контрастами, приведено в табл. 7.

Таблица 7

Зависимость времени инерции от яркости фона

Яркость фона $B_ф$, *нт*	$3{,}2\cdot10^{-5}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0,1	1	10	100	1 000
Время инерции ϑ, *сек*	0,20	0,20	0,19	0,167	0,134	0,10	0,065	0,051	0,050

Из приведенных в табл. 7 значений времени зрительной инерции можно видеть, что для яркостей адаптации $B \geqslant 100$ *нт* можно с достаточной точностью принимать $\vartheta = 0{,}05$ *сек*. В табл. 8 приведены значения времени зрительной инерции

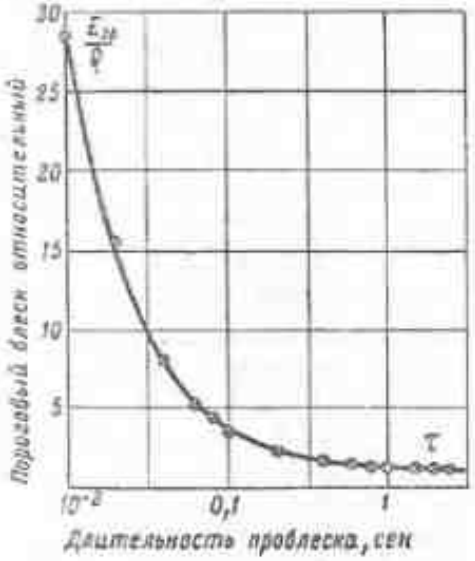


Рис. 1-101.
Периферическое зрение по Луизову.

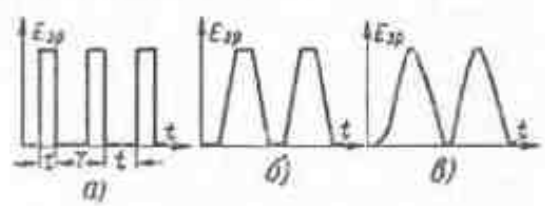


Рис. 1-102.

в условиях наблюдения кратковременных вспышек на фоне с яркостью $B_ф = 0$ в функции эффективного значения блеска вспышки.

Видимость проблесков. *Проблесками* или *проблесковыми огнями* принято называть кратковременные вспышки, повторяющиеся периодически с заданным интервалом времени. Интенсивность проблеска определяется блеском для точечных огней и яркостью для огней конечных размеров. В простейшем случае освещенность на зрачке наблюдателя, создаваемая проблеском в течение всего времени действия τ, постоянна (рис. 1-102,*а*). В практических условиях интенсивность проблеска может изменяться во времени (рис. 1-102,*б*, *в*). Время полного периода проблеска определяется суммой длительностей вспышки τ и затемнения t. Частота вспышек определяется величиной, обратной времени полного периода проблеска. Отношение длительности затемнения к времени полного периода принято называть *скважностью проблесков*.

Таблица 8

Зависимость времени инерции от эффективного блеска вспышки ($B_ф = 0$)

Эффективный блеск Q, 10^{-4} *лк*	2,0	5,0	10	50	100	500	1 000	10 000
Время инерции θ, *сек*	0,20	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,032

При малых значениях частоты вспышек и большой скважности проблески зрительно воспринимаются раздельно. При раздельном восприятии проблесков их пороговое значение зависит от времени вспышки. Эта зависимость впервые была сформулирована Л. Блохом и А. Шарпантье [Л. 150]. *Закон Блоха—Шарпантье* формулирует для точечных проблесков постоянство порогового количества освещения на зрачке наблюдателя:

$$E_τ τ = \text{const}, \qquad (1\text{-}92)$$

где $E_τ$ — пороговый блеск;

$τ$ — длительность проблеска.

Эта зависимость была установлена для кратковременных вспышек от 0,0017 до 0,058 *сек*. Для проблесков большей длительности ($τ \geqslant 0{,}1$ *сек*) согласно исследованиям А. Блонделя и Ж. Рея [Л. 149] постоянным следует считать произведение длительности вспышки на разность пороговых значений блеска при исследуемом проблеске $E_τ$ и при постоянном огне E_∞:

$$(E_τ - E_\infty)\, τ = \text{const}. \qquad (1\text{-}92а)$$

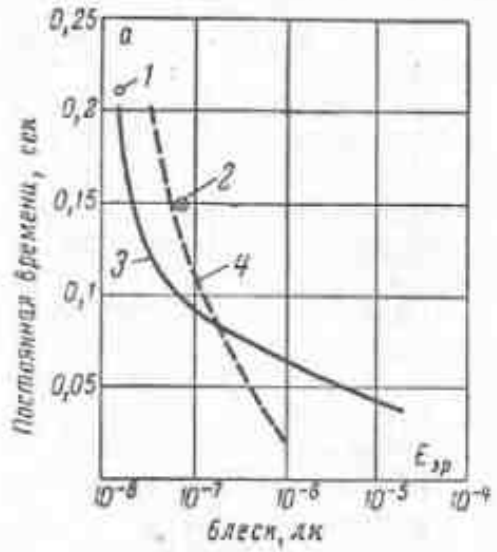


Рис. 1-103.

1—по Блонделю и Рею; *2*—по Тоулмину-Сиссу и Грину; *3*—по Хемптону; *4*—по Лунзову.

Согласно (1-92а) пороговое количество освещения зрачка глаза наблюдателя вспышкой с длительностью определится

$$E_τ τ = E_\infty (τ + a), \qquad (1\text{-}93)$$

где a — постоянная времени.

Постоянная времени согласно исследованиям Блонделя и Рея для проблесков белого цвета была определена равной $a = 0{,}21$ *сек* при темновой адаптации наблюдателей. Как показали последующие исследования [Л. 151], постоянная времени для сверхпороговых проблесков уменьшается по мере роста блеска вспышки (рис. 1-103). Постоянная времени в уравнении Блонделя — Рея зависит от яркости фона (рис. 1-104) в тех случаях, когда проблеск виден наблюдателем на фоне яркостью $B \neq 0$.

А. В. Лунзов принимает постоянную времени Блонделя и Рея равной времени инерции, предполагая функцию зрительной инерции в соответствии с уравнением (1-87) гиперболической типа

$$\varphi(t) = \frac{\theta^2}{(\theta + t)^2}.$$

Анализируя уравнение Блонделя—Рея (1-93), можно видеть, что оно вырождается для предельных значений длительности проблеска в следующие зависимости:

для $τ \ll \theta$

$$E_{τ \to 0}\, τ = \text{const}; \qquad (1\text{-}93а)$$

для $τ \gg \theta$

$$E_{τ \to \infty} = \text{const}. \qquad (1\text{-}93б)$$

Переход уравнения Блонделя—Рея в уравнение Блоха—Шарпантье (1-93а) при малых значениях длительности проблеска следует объяснить тем, что пороговый блеск кратковременных вспышек $τ \ll \theta$ определяется согласно исследованиям С. И. Вавилова [Л. 152] первым импульсом тока действия. Как известно, одному импульсу тока действия соответствует пороговое количество ионов, определяемое пороговым количеством эффективно поглощенных фотонов, следовательно, пороговым значением количества освещения входного зрачка глаза наблюдателя. Так, например в условиях темновой адап-

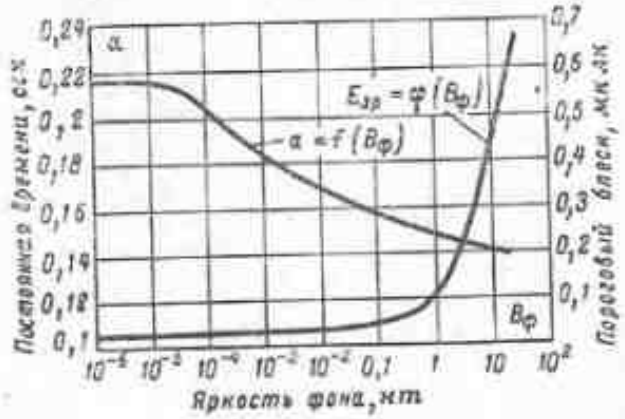


Рис. 1-104.

тации ($\vartheta=0{,}21$ *сек*) уравнения (1-92) и (1-93) тождественны с точностью $\pm 0{,}05$ для пороговых проблесков белого цвета длительностью $\tau=0{,}02$ *сек*. Как показывают результаты экспериментов [Л. 154], зона действия закона Блоха — Шарпантье распространяется в условиях малой яркости фона на пороговые проблески длительностью до 0,1 *сек*.

В соответствии с этим возможно провести аналогию между законом Блоха — Шарпантье и законом Бунзена — Роско (ч. I, § 3-14), определяющим зависимость количественной характеристики фотохимической реакции от количества облучения реагирующего вещества. Как было показано применительно к фотографическим процессам, закон Бунзена—Роско нарушается при малых и больших значениях плотности облучения вещества в результате уменьшения квантового выхода фотохимического преобразования излучения.

По аналогии с фотографическим действием света можно предположить уменьшение квантового выхода фотодиссоциации молекул фотореагентов в условиях порогового обнаружения проблесков большой длительности $\tau \gg \vartheta$ вследствие очень малой освещенности сетчатки. Малая освещенность сетчатки требует значительного времени концентрации порогового количества ионов в первом синапсе реагирующего волокна зрительного нерва, что может привести к частичной рекомбинации ионов, образовавшихся в процессе фотодиссоциации молекул фотореагента. С увеличением времени концентрации порогового количества ионов в первом синапсе, непосредственно связанным с увеличением длительности проблеска, увеличивается вероятность рекомбинации, следовательно, уменьшается квантовый выход первой фазы зрительного процесса. Это приводит к более медленному уменьшению пороговой вспышки по сравнению с увеличением ее длительности, следовательно, к нарушению взаимозаменимости премени и освещенности на зрачке наблюдателя. Такое нарушение взаимозаменимости E_τ и τ при росте длительности проблесков приводит в пределе к постоянству порогового блеска при любой длительности проблеска для $\tau \gg \vartheta$. В этом предельном случае пороговый блеск вспышки должен определяться некоторой предельно малой частотой импульсов тока действия, однозначно определяемой освещенностью сетчатки в зоне изображения. При постоянстве площади изображения точечных проблесков освещенность сетчатки однозначно определяется освещенностью на зрачке наблюдателя, следовательно, пороговое значение частоты импульсов тока действия соответствует некоторому значению порогового блеска, постоянному для любой длительности проблеска (1-93а). Следует предполагать, что снижение квантового выхода фотодиссоциации молекул фотореагента в функции увеличения длительности проблесков происходит плавно, что должно приводить к плавному переходу уравнения Блонделя—Рея в уравнение Блоха—Шарпантье (рис. 1-105).

Аналогия фотохимической фазы зрительного процесса и фотографического действия излучения заставляет предполагать возможность снижения квантового выхода фотодиссоциации молекул фотореагентов также и для очень малых значений длительности проблесков, следовательно, — наличие некоторого минимума функции $E_\tau\tau=f(\tau)$. Наличие такого минимума было доказано результатами экспериментов ряда авторов [П. Ривс (1918), Г. Пьерон (1920), В. Анри (1927), В. Федорова и М. Грушецкая (1927), Н. Вищневский и Б. Цырлин (1934) и др.]. Наряду с этим многие исследователи [Е. Баумгардт (1949), М. Баум (1948, 1957) и др.] считают справедливым закон Блоха—Шарпантье для проблесков длительностью до $\tau=10^{-3}$ *сек*. Это различие мнений не может иметь существенного значения при решении практических вопросов, так как рост $(E_{\text{пр}}\tau)_{\text{пор}}$ можно ожидать лишь при очень малых значениях длительности проблеска $\tau \leqslant 10^{-3}$ *сек*.

Соответствие времени зрительной инерции и постоянной времени Блонделя — Рея позволяет предполагать, что зависимость порогового блеска от премени вспышки полностью определяется процессами зрительной инерции. Это соответствие подтверждается также, что закон Блоха — Шарпантье, выражающий зависимость эффективного блеска вспышек очень малой длительности от величины $\tau \leqslant \vartheta$, определяется приближенным уравнением (1-89а).

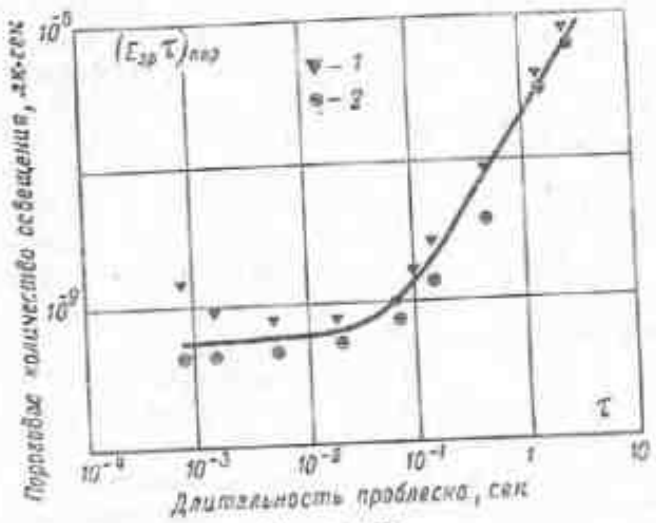


Рис. 1-105.

1 — опытные данные Пьерона; *2* — расчетные данные по Блонделю и Рею.

Соответствие a и ϑ позволяет записать уравнение Блонделя — Рея в следующем виде:

$$E_\tau = E_\infty\left(1+\frac{\vartheta}{\tau}\right) \tag{1-94}$$

или

$$Q = E_\tau\frac{\tau}{\vartheta+\tau}, \tag{1-94а}$$

где Q — эффективный блеск вспышки, обеспечивающей на зрачке наблюдателя постоянную освещенность E_τ в течение всей длительности вспышки τ.

В том случае, если вспышка характеризуется переменной по времени силой света в течение каждого проблеска, эффективный блеск можно в первом приближении определить, интегрируя по времени мгновенные значения количества освещения

$$Q = \frac{\int_0^\tau E(t)\,dt}{\vartheta+\tau}, \tag{1-95}$$

где $E(t)$ — функция мгновенных значений блеска вспышки.

Критическая частота мелькания. Зрительная инерция вызывает слитное восприятие серии проблесков, если их частота достаточно велика или скважность незначительна. Минимальную частоту проблесков, обеспечивающую впервые с достаточной достоверностью их слитное восприятие, принято называть *критической частотой мелькания*. Следовательно, критическая частота мелькания является граничной частотой между раздельным и слитным восприятием проблесков. Слитное восприятие проблесков наблюдается во всех случаях, когда глубина колебания эффективной яркости ΔN или эффективного блеска (рис. 1-106) меньше пороговой разности яркости или освещенности на зрачке глаза наблюдателя во времени. В том случае, когда мелькающее излучение зрительно воспринимается постоянным по времени, его эффективная яркость при неограниченном времени действия $\Delta t = t_2 - t_1$ определится согласно (1-80) как

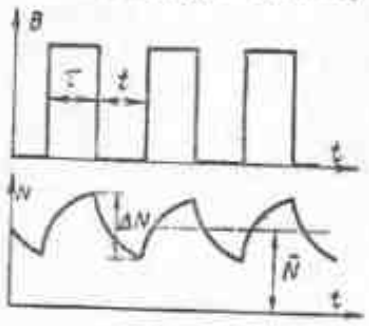


Рис. 1-106.

$$\overline{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} B(t)\, dt. \qquad (1\text{-}96)$$

Для длительной серии проблесков постоянной яркости или проблесков, создающих одинаковую освещенность на зрачке наблюдателя, (1-96) можно написать:

$$\overline{N} = \frac{1}{T} \int_{0}^{\tau} B(t)\, dt = \frac{B\tau}{\tau + t} \qquad (1\text{-}96а)$$

или

$$\overline{Q} = \frac{E_{зр}\tau}{\tau + t}. \qquad (1\text{-}96б)$$

Эти уравнения, определяющие зрительные ощущения слитно воспринимаемых проблесков, действующих на глаз наблюдателя неограниченное время, впервые были установлены английским ученым Г. Талботом (1800—1877). Закон Талбота [Л. 155], неоднократно проверенный экспериментально, определяет тождественность зрительного ощущения постоянного по времени излучения и серии проблесков, зрительно воспринимаемых слитно, при равных значениях световой энергии, падающей на зрачек наблюдателя. Отклонения от этого закона наблюдаются при очень слабых и очень высоких уровнях возбуждения зрительного аппарата.

Первые исследования зависимости критической частоты мелькания от яркости проблесков были проведены Т. Портером [Л. 156] в связи с возникновением проблемы прерывной световой проекции в кино. Результаты исследований Т. Портера, дополненные Г. Айвсом [Л. 157], были выражены эмпирическим уравнением, называемым *уравнением Айвса — Портера:*

$$n_{кр} = a \lg B + b, \qquad (1\text{-}97)$$

где a и b — параметры уравнения Айвса—Портера;
B — яркость проблесков.

Рост критической частоты мельканий с увеличением яркости проблесков, описываемый (1-97), определяется уменьшением порогового контраста во времени, а также относительным увеличением глубины колебания эффективной яркости ΔN в результате более быстрого падения эффективной яркости в периоды затемнения. Значения критической частоты мельканий изменяются в значительных пределах 5—100 *сек*$^{-1}$ в зависимости от условий опыта, в первую очередь от яркости мелькающего источника и яркости адаптации. Г. Айвс обнаружил зависимость параметров уравнения (1-97) a и b от спектрального состава мелькающего излучения. Согласно исследованиям С. Гехта [Л. 158] существенное различие критической частоты от спектрального состава излучения имеет место лишь в области сумеречного и ночного зрения. Эту зависимость можно объяснить несоответствием кривой видности однородных излучений стандартной функции видности. Кривые изменения критической частоты мельканий в функции эквивалентной яркости излучений любого спектрального состава $n_{кр} = f(B_э)$, согласно исследованию С. Гехта совпадают на всем диапазоне изменения яркости. В отличие от результатов исследования С. Гехта некоторые экспериментаторы отмечали аналогично Айвсу зависимость критической частоты мельканий от спектрального состава излучения также и в условиях дневного зрения. Это различие, определяемое по результатам исследования Р. Л. Фольб [159] величиной 5—15%, следует предположительно объяснить различной инерционной способностью зрительного анализатора в условиях реакции на излучения различных длин волн. Согласно последним исследованиям критической частоты мельканий [Л. 158, 159] уравнение Айвса—Портера применимо с достаточной точностью для яркостей, не превышающих 500—1 000 *нт*, что соответствует освещенности сетчатки при естественном зрачке глаза $2{,}6 \cdot 10^3$—$4{,}9 \cdot 10^3$ *трол*. Для этого диапазона яркости мелькающего источника белого света $\omega \geqslant 0{,}01$ *стер*, расположенного в центральной части поля зрения, (1-97) можно написать в следующем виде:

$$n_{кр} = 12 \lg B + 35. \qquad (1\text{-}97а)$$

Увеличение углового размера проблесков сказывается на критической частоте качественно одинаково с повышением яркости. Это соответствие следует объяснить уменьшением порогового контраста при увеличении углового размера тест-объекта, так же как и при росте яркости.

Увеличение скважности будет приводить к росту $\frac{\Delta N}{N_{макс}}$, следовательно, к повышению заметности мельканий, что эквивалентно росту критической частоты мелькания. Исследования Айвса, Арндта [Л. 160] и др. подтверждают эти выводы. Согласно исследованиям Айвса увеличение скважности с 0,25 до 0,5 в условиях вариации яркости от 2,5 до 250 *нт* приводит к увеличению критической частоты на 3 — 6%.

Результаты экспериментального исследования критической частоты мелькания при проецировании проблесков на центральную и периферическую области сетчатки показывают, что в условиях яркостей дневного зрения и больших размерах проблесков $\alpha \geqslant 2^\circ$ критическая частота на периферии сетчатки выше. Следовательно, наблюдатель, впервые обнаруживая мелькания периферическим зрением, не замечает их при переводе взгляда на мелькающий источник света.

Критическая частота мелькания в значительной степени определяется также условиями адаптации наблюдателя. Темновая адаптация глаза повышает критическую частоту мельканий в условиях палочкового зрения и снижает в условиях колбочкового. Снижение критической частоты при темновой адаптации зрительного анализатора в условиях колбочкового зрения можно объяснить понижением лабильности центрального звена. Это позволяет рассматривать изменение критической частоты мельканий, проецируемых в центральную ямку сетчатки, в качестве критерия влияния условий освещения на функциональное состояние центрального звена зрительного анализатора.

Последовательные образы. Зрительное ощущение, сохраняющееся в нашем сознании в течение некоторого промежутка времени после прекращения непосредственного действия на глаз излучения, принято называть *последовательным образом*. Результаты экспериментального исследования последовательных образов показывают уменьшение их яркости и изменение цветности в течение времени их существования. Причинами возникновения последовательных образов являются зрительная инерция и адаптационные изменения чувствительности центра и периферии зрительного анализатора. Роль инерционности зрительных процессов в формировании последовательных образов определяется наличием в светочувствительных клетках ионов распада после окончания действия излучения. Отрица-

тельные ионы, концентрируясь в первых синапсах, вызывают возникновение импульсов тока действия. Адаптационные вариации чувствительности зрительного анализатора в течение всего времени существования последовательного образа определяются изменением концентрации молекул фотореагентов, а также чувствительности центрального звена зрительного анализатора.

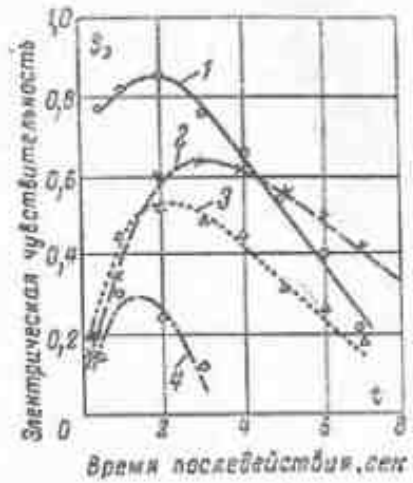


Рис. 1-107.

1—белый; *2*—синий; *3*—зеленый; *4*—красный; $E_{ср}$=22 *лк*.

Зависимость последовательных образов от функционального состояния центрального звена анализатора отчетливо показана в работе П. А. Корзуна [Л. 161], исследовавшего изменение электрической чувствительности зрительного анализатора после прекращения кратковременного освещения глаза в условиях темновой адаптации. На рис. 1-107 приведены результаты этих исследований в виде графиков относительного увеличения электрической чувствительности зрительного анализатора после 2-секундного освещения центральной ямки сетчатки глаза наблюдателя разноцветными излучениями, создававшими на зрачке освещенности $E_{ср}$=22 *лк*. Аналогичная картина изменения чувствительности центра была обнаружена также и в условиях освещения периферии сетчатки.

Исследования длительности последовательных образов у лиц с поражением функций затылочной области коры головного мозга, проведенные Н. Н. Зелиной (Л. 152), показали резкое сокращение длительности последовательных образов. Этими исследованиями была установлена стимулирующая роль кофеина, введение которого восстанавливало способность организма ощущать последействие светового раздражения, что также определялось ролью центральной нервной системы. Значение функционального состояния центрального звена в формировании последовательных образов показано также в работе З. М. Зелиной (Л. 163), установившей различие длительности последовательных образов до и после напряженной зрительной работы.

Рассмотрим процесс возникновения и затухания последовательного образа, вызванного наблюдением пятна яркостью B_1, значительно большей яркости фона B_2. Последовательный образ, возникший в нашем сознании после прекращения освещения глаза, определится процессами инерции и адаптации в зоне изображения источника последовательного образа. Процесс инерции зрительного ощущения источника последовательного образа является затухающим в результате постепенного

снижения концентрации отрицательных ионов распада. Процесс адаптации, характеризующийся плавным повышением световой чувствительности зрительного анализатора в зоне локализации последовательного образа, определяется в основном ростом концентрации молекул фотореагента в этой зоне сетчатки. В результате этого эффективная яркость каждой фазы последовательного образа определится суммой переменных эффективных яркостей фона B_2, на котором наблюдатель видит последовательный образ инерционного последействия излучения B_1:

$$N_{п.о}(t) = N_з(t) + N_и(t), \qquad (1\text{-}98)$$

где $N_{п.о}(t)$ — функция изменения эффективной яркости последовательного образа во времени;

$N_и(t)$ — то же эффективной яркости зрительной инерции пятна яркостью B_1;

$N_з(t)$ — то же эффективной яркости фона B_2 в условиях адаптационного изменения чувствительности зрительного анализатора.

Функцию изменения эффективной яркости зрительной инерции можно заменить согласно (1-81) произведением функции зрительной инерции $\varphi(t)$ на мгновенное значение эффективной яркости N_0 в момент окончания действия излучения B_1. Аналогично функцию $N_з(t)$ можно представить произведением установившегося значения эффективной яркости фона $N_2 = B_2$ на функцию $\alpha(t)$ адаптационного изменения чувствительности зрительного анализатора при переходе с яркости B_1 на B_2 в зоне локализации последовательного образа. В условиях неограниченно длительного действия источника последовательного образа, такая замена приведет к следующей записи (1-98):

$$N_{п.о}(t) = \varphi(t) B_1 + \alpha(t) B_2. \qquad (1\text{-}98а)$$

Инерционная составляющая эффективной яркости последовательного образа $\varphi(t) B_1$ уменьшается, стремясь к нулю, в результате постепенного снижения концентрации ионов, возникших от предшествующего возбуждения зрительного анализатора излучением яркостью B_1. Это снижение описывается функцией зрительной инерции, изменяющейся от максимального значения, определяемого временем действия излучения B_1, до нуля. Адаптационная составляющая эффективной яркости последовательного образа в условиях $B_1 \gg B_2$ постепенно увеличивается вследствие постепенного повышения световой чувствительности зрительного анализатора в процессе адаптации с большей яркости на меньшую.

При $B_1 \gg B_2$ значение функции $\alpha(t)$ в течение всего неустановившегося процесса имеет значение, меньшее единицы (рис. 1-108), вследствие пониженной концентрации молекул фотореагентов в зоне локализации последовательного образа по сравнению со смежными участками сетчатки.

В начальных фазах последовательного образа его эффективная яркость превышает установившееся зрительное ощущение яркости окружающего фона. Этот интервал неустановившегося зрительного процесса, характеризуемый неравенством $N_{п.о}(t) \geqslant B_2$, принято называть *положительным последовательным образом*. За положительным последовательным образом следует *отрицательный последовательный образ*, характеризуемый обратным неравенством $N_{п.о}(t) < B_2$.

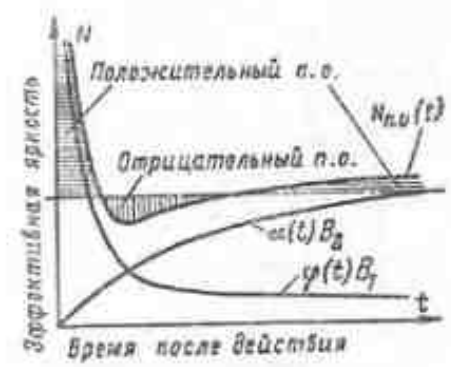


Рис. 1-108.



Рис. 1-109.
Яркость слепящая.
1—$9 \cdot 10^3$ *нт*; 2—$1{,}7 \cdot 10^4$ *нт*; 3—$5 \cdot 10^5$ *нт*.

Отрицательный последовательный образ возникает в результате меньшей скорости процесса адаптационного изменения чувствительности по сравнению со скоростью изменения функции зрительной инерции (рис. 1-108). Последовательный образ принято характеризовать ходом изменения его эффективной яркости $N_{п.о}(t)$.

Затухание последовательных образов можно исследовать прямым и косвенным методами. Прямой метод исследования заключается в непосредственном фотометрировании эффективной яркости. Косвенный метод исследования яркости последовательного образа основан на измерении величины порогового контраста при наблюдении тест-объекта через последовательный образ. Этот метод позволяет с достаточной точностью измерить эффективные яркости положительных последовательных образов.

Экспериментальные исследования хода затухания последовательных образов [Л. 163—167] показывают, что эффективные яркости каждой фазы последовательного образа, а также длительность его положительного и отрицательного интервалов определяются яркостью (рис. 1-109), временем действия и ве-

личиной телесного угла источника последовательного образа.

Результаты исследования З. М. Зелиной [Л. 163] показали также зависимость длительности последовательных образов от уровня яркости адаптации. Снижение яркости и длительности последовательных образов при увеличении яркости адаптации (рис. 1-110) следует объяснить понижением световой чувствительности зрительного анализатора. Исследования длительности последовательных образов в центре и на периферии сетчатки, проведенные А. В. Рославцевым [Л. 167], показали бо́льшую длительность центральных последовательных образов источников большой яркости $B \geqslant 5 \cdot 10^4$ *нт* (рис. 1-111).

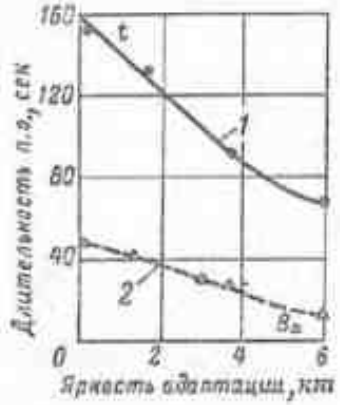


Рис. 1-110.

1—отрицательный последовательный образ; *2*—положительный последовательный образ.

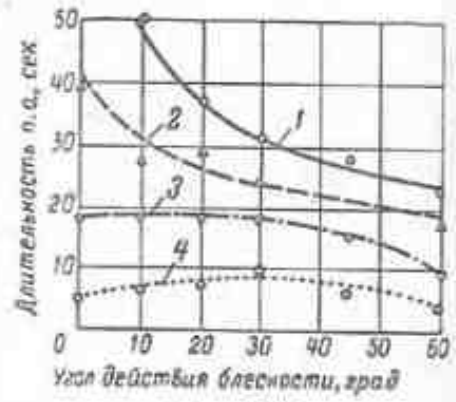


Рис. 1-111.

$1 - B_1 = 5 \cdot 10^5$ *нт*; $2 - B_1 = 2 \cdot 10^5$ *нт*; $3 - B_1 = 5 \cdot 10^4$ *нт*; $4 - B_1 = 5 \cdot 10^3$ *нт*.

Качественные наблюдения хода затухания последовательных образов, возникающих в результате действия белого излучения, показывают, что цветность различных фаз последовательного образа неодинакова. По исследованиям Г. Гельмгольца вначале следуют синевато-зеленые тона, постепенно переходящие в последних фазах положительного последовательного образа к оранжево-красным оттенкам. Изменение цветности положительных последовательных образов можно объяснить различием функций $N_{п.о}(t)$ для каждого из трех цветовоспринимающих приемников глаза. Исследования С. В. Кравкова [Л. 166] показали, что последовательный образ от источника красного цвета имеет большую длительность при меньших начальных значениях эффективной яркости по сравнению с сине-фиолетовым (рис. 1-112).

Основные положения о качественных и количественных характеристиках последовательных образов белого излучения применимы и к последовательным образам цветных излучений. Согласно этим соображениям «положительный последователь-

ный образ цветного излучения должен обладать цветовой тональностью, близкой к цветовому тону источника последовательного образа, и близкой к цветовому тону дополнительного к нему цвета — в условиях отрицательного последовательного образа. Исследование отрицательных последовательных образов цветного излучения [Л. 168] обычно производится на белом (ахроматическом) фоне, яркость которого больше или равна яркости цветного излучения источника последовательного образа $B_1 \approx B_2$. В этом случае длительность положительного последовательного образа невелика, вследствие чего наибольшее значение имеет отрицательный последовательный образ, часто называемый *последовательным цветовым контрастом*.



Рис. 1-112.

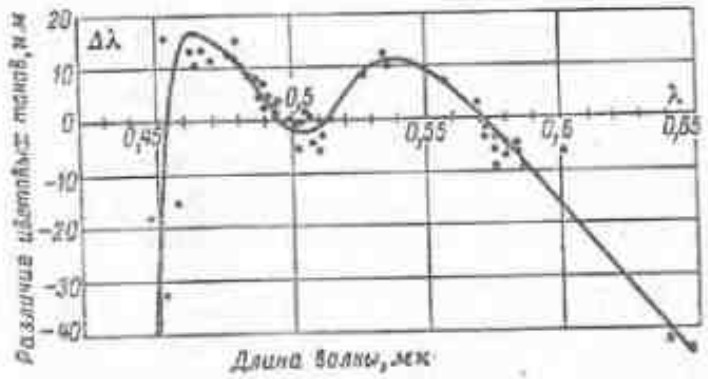


Рис. 1-113.

Из простейшего опыта зрительной оценки листа белой бумаги после предварительного наблюдения поверхности красного цвета можно убедиться в зеленоватой окраске отрицательного последовательного образа красного излучения. Однако уже давно было известно, что цвет последовательного образа несколько отличается от дополнительного. Это отличие отмечал В. Гете [Л. 169], разработавший оригинальное учение о цветах. Это отличие было неоднократно впоследствии подтверждено экспериментом. Результаты детального исследования цветового тона отрицательного последовательного образа однород-

ных излучений, проведенного Н. Т. Федоровым и др. [Л. 169], приведены в виде графика разности цветового тона дополнительного цвета и цветовой тональности ощущения цветового последовательного образа в функции цветового тона дополнительного цвета (рис. 1-113). Из этого графика можно видеть, что последовательный образ зелено-голубого ($\lambda_{з.г} = 0{,}495$ *мк*), вместо красно-оранжевого ($\lambda_{к.о} = 0{,}630$ *мк*) будет желто-оранжевый ($\lambda_{ж.о} = 0{,}595$ *мк*), а последовательный образ пурпурного ($\lambda_{п} = -0{,}540$ *мк*) вместо зеленого ($\lambda_{з} = 0{,}540$ *мк*) будет желто-зеленым ($\lambda_{ж.з} = 0{,}555$ *мк*).

Результаты исследования $\Delta\lambda = f(\lambda_{п.о})$ выражены Н. Т. Федоровым эмпирическим уравнением, определяющим цветовой тон последовательного образа на фоне белого равноинтенсивного излучения:

$$\lambda_{п.о} = \frac{\lg(a-c) - \lg\beta}{\lg(a-b) - \lg\beta},$$

где a, b и c — больший средний и меньший коэффициенты цветоощущения излучения, вызвавшего последовательный образ;

β — параметр, зависящий от соотношения коэффициентов цветоощущения a, b, c и яркости B_1 и B_2, а также от размера поля B_1.

Располагая выражением функций зрительной инерции и адаптационного изменения чувствительности зрительного анализатора, можно рассчитать эффективную яркость и цветность любой фазы последовательного образа с помощью (1-98а). Расчет последовательного образа цветного излучения следует производить раздельно по каждому из трех цветовоспринимающих рецепторов зрительного анализатора. Цветность последовательного образа в этом случае должна определяться соотношением эффективных яркостей последовательных образов, рассчитанных для каждого рецептора отдельно.

Стробоскопический эффект. При освещении движущегося предмета раздельными периодически повторяющимися вспышками зрительное восприятие движения может распадаться на отдельные фазы. В условиях достаточно большой скорости движения, обеспечивающей значительное расстояние пройденное телом за каждый период вспышки, движущийся предмет будет зрительно восприниматься одновременно находящимся в разных точках своего пути, т. е. один движущийся предмет будет иллюзорно восприниматься, как несколько одинаковых предметов. При наблюдении периодического движения в условиях проблескового освещения, движущегося предмета, например вращающегося светлого диска с темным сектором (рис. 1-114), его зрительное восприятие определится соотношением периодов вспышек и вращения. В том случае когда периоды вспышек и вращения одинаковы или кратны,



Рис. 1-114.

диск будет зрительно восприниматься неподвижным, так как каждая новая вспышка будет соответствовать одному и тому же положению сектора, например положению *а* (рис. 1-114). При несколько большем периоде времени вращения по сравнению с периодом вспышек каждая последующая вспышка будет освещать диск в положении несколько отстающей фазы вращательного движения *б*, *в* и т. д. При таком соотношении длительностей периодов вспышки и вращения зрительное ощущение будет соответствовать кажущемуся медленному вращению диска в направлении, обратном его действительному вращению. Чем ближе к совпадению периодичности вспышек и вращения, тем более медленным будет восприниматься вращение диска при постоянстве его действительной скорости вращения. Обратное соотношение длительности периодов ($T_{вр} < T_{всп}$) вызывает кажущееся зрительное впечатление вращательного движения в направлении действительного движения (положения сектора *б'*, *в'* и т. д.), но будет отличаться от него по скорости.

В приведенном примере непрерывное движение объекта зрительно разделялось на отдельные фазы посредством кратковременного наблюдения движущегося объекта в моменты периодически повторяющихся вспышек. В тех случаях, когда фазы движения, зрительно воспринимаемые в течение смежных по времени вспышек, достаточно близки друг к другу, наблюдатель воспринимает совокупность дискретных положений движущегося объекта как непрерывное движение. Как было показано, результирующий зрительный эффект будет в этом случае определяться соотношением периодичности вспышек и движения объекта, следовательно, зрительное восприятие будет отличаться от действительного движения объекта. Это кажущееся зрительное восприятие принято называть *стробоскопическим эффектом*[1].

Экспериментально доказано [Л. 170], что наблюдатель может воспринимать движение непрерывным даже в тех случаях, когда скважность проблесков достаточно велика и частота вспышек ниже критической частоты мелькания. Движение воспринимается благодаря стробоскопическому эффекту непрерывным и в тех случаях, когда наблюдателю кратковременно предъявляются неподвижные изображения различных фаз движения, например в условиях кинопроекции.

Восприятие непрерывного движения в результате зрительного наблюдения совокупности его фаз неразрывно связано с повседневным опытом, позволяющим психологически объединить дискретные фазы в непрерывное движение. Так, напри-

[1] Наименование эффекта происходит от греческих слов στροβος — вращение и σκοπεω — видеть.

мер, кинозритель, увидевший на экране серию кадров с отдельными фазами бега человека, будет воспринимать этот эпизод не как отдельные фазы движения рук, ног и корпуса человека, а как непрерывный бег.

Для возникновения стробоскопического эффекта не обязательно чередование световых вспышек с полной темнотой. Достаточно глубокие периодические колебания светового потока источника также могут вызвать возникновение этого эффекта. Так, например, стробоскопический эффект наблюдается в осветительных установках, выполненных газоразрядными и люминесцентными лампами, если не приняты меры к уменьшению глубины колебания светового потока по времени. Для устранения стробоскопического эффекта в установках с люминесцентными лампами в двухламповых светильниках применяют пускорегулирующие аппараты (ПРА) с опережающим током в одной лампе и отстающим — в другой.

Изложение сущности стробоскопического эффекта позволяет определить его как кажущееся зрительное восприятие непрерывного движения при кратковременном периодическом наблюдении отдельных последовательных фаз этого движения или как кажущееся раздельное зрительное восприятие отдельных фаз непрерывного движения.

Быстрота различения и обнаружения. Как было показано ранее, зрительные пороги определяются совокупностью трех характеристик тест-объектов: яркости фона — $B_ф$, контраста объекта наблюдения с фоном — k и размера тест-объекта — α или ω. Необходимость и достаточность трех величин, определяющих зрительный порог, позволяет графически характеризовать пороговые режимы зрения семействами кривых: α=const в системе координат k и $B_ф$; k=const в системе координат α и $B_ф$ или $B_ф$=const в системе координат α и k. Каждая кривая любого из трех перечисленных семейств делит плоскость на две области (рис. 1-115). В одной из этих областей (на графике заштриховано) все точки характеризуют тест-объекты, обнаруживаемые или различаемые с вероятностью, меньшей заданной. Так, например, все точки заштрихованной области плоскости графика (рис. 1-115,*а*) характеризуют видимость (различимость) тест-объекта, имеющего угловой размер $\alpha=4'$ с вероятностью, менее заданной ($p<0{,}5$). Аналогичные графики можно строить для B=const или k=const (рис. 1-115,*б* и *в*). Такой способ описания пороговых параметров зрительного процесса возможен лишь при неограниченном времени наблюдения тест-объекта в условиях равномерной яркости поля зрения наблюдателя. Уменьшение времени наблюдения приводит к осложнению зрительной работы, следовательно, к снижению вероятности обнаружить, опознать

или различить детали тест-объекта. Такое осложнение зрительного процесса можно рассматривать как некоторое уменьшение контраста или яркости фона, эквивалентное по уровню снижению вероятности обнаружения тест-объекта. Следовательно, при ограничении времени наблюдения тест-объекта пороговый режим должен определяться четырьмя параметрами: $B_ф$, k, $\alpha(\omega)$ и t. Величину, обратную времени наблюдения, обеспечивающего при заданных трех остальных параметрах необходимую вероятность обнаружения или различения, принято называть *быстротой обнаружения* или *быстротой различения*.

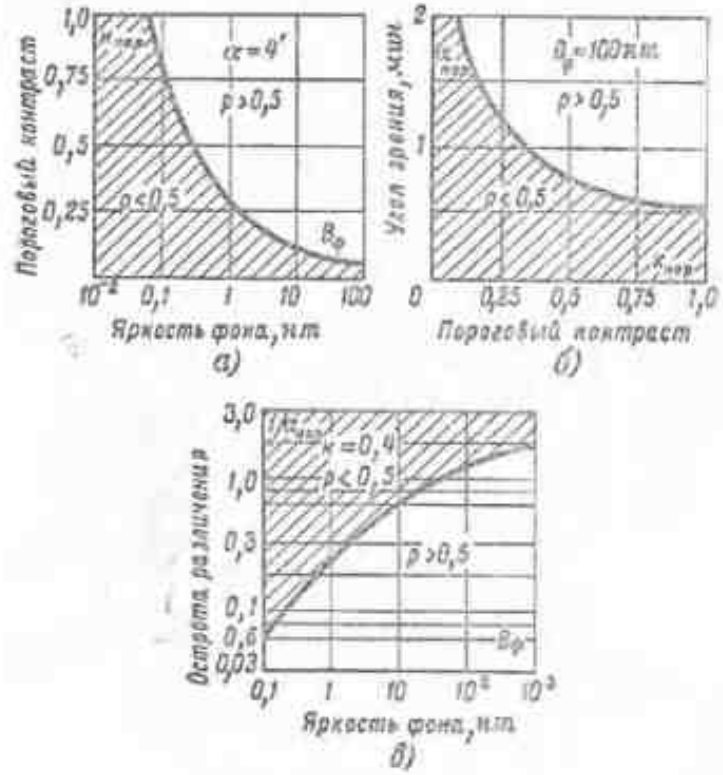


Рис. 1-115.

Необходимость и достаточность четырех параметров для описания порогового зрительного режима в условиях ограниченного времени наблюдения требуют трехмерного пространства для графического изображения условий видения, соответствующих заданной вероятности обнаружения или различения. В качестве координат этого пространства можно выбрать три любых параметра из четырех, описывающих пороговые режимы. Постоянному значению четвертого параметра, определяющему зрительный порог с заданной вероятностью обнаружения или различения, будет соответствовать некоторая поверхность.

По результатам исследования В. Г. Самсоновой [Л. 171]

построена поверхность $a=4'$ в координатах $\frac{1}{\tau}$, k и B_ϕ (рис. 1-116) для условий вероятности различения разрыва кольца Ландольта $p=0{,}7$. В условиях ограниченного времени наблюдения все точки, расположенные над поверхностью $a=4'$ и $p=0{,}7$, определяют аналогично изолиниям заданной вероятности видения в условиях неограниченного времени (рис. 1-115) параметры тест-объектов, различаемых с вероятностью $p<0{,}7$, а точки под этой поверхностью — с вероятностью $p>0{,}7$. Так же как и при неограниченном времени наблюдения, значения пороговых параметров определяются заданной зрительной задачей. В простейшем случае зрительная задача может ограни-

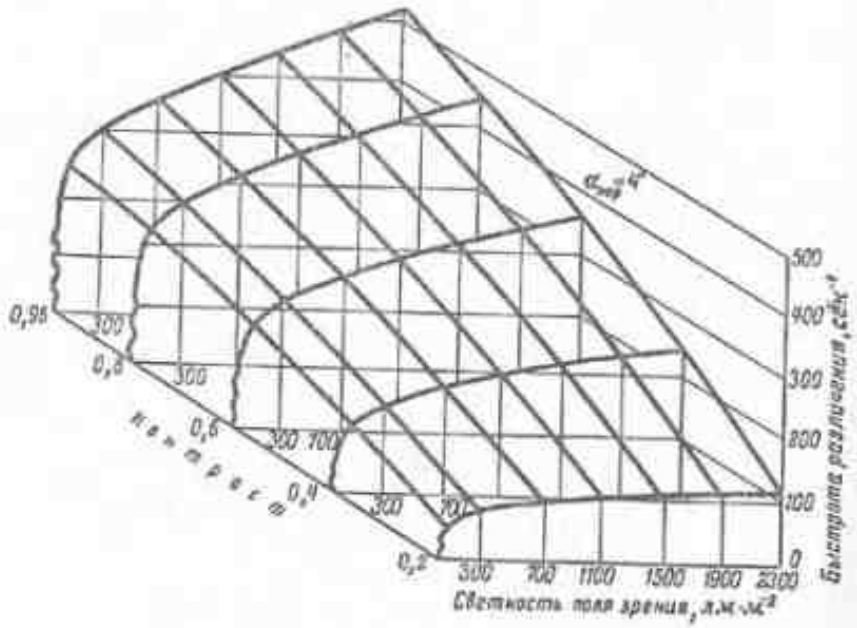


Рис. 1-116.

чиваться лишь обнаружением тест-объекта, когда наблюдатель определяет, заметен или не заметен объект. В этой простейшей фазе видения пороговые параметры имеют наименьшие значения. Как показывает опыт, форма наблюдаемого объекта в этой фазе видения может оказывать существенное влияние на пороговые параметры лишь в случае значительного различия размеров тест-объекта по разным направлениям, например прямоугольник с широкой вариацией отношения длины к ширине.

Более сложной зрительной задачей является различение деталей и опознавание формы тест-объекта, например: опознавание буквы, определение направления разрыва в кольце Ландольта и др. Пороги различения, как правило, выше порогов

обнаружения, причем это различие тем больше, чем сложнее форма тест-объекта.

Ограничение времени наблюдения тест-объекта как в фазе обнаружения, так и различения (опознавания) может быть за счет:

а) кратковременного (импульсного) освещения всего пространства, в том числе и тест-объекта;

б) кратковременного появления в поле зрения наблюдателя тест-объекта на фоне постоянной по времени яркости адаптации.

В первом случае уменьшение времени вспышки согласно (1-80) приводит к уменьшению эффективной яркости всего окружающего пространства, следовательно, к необходимости эквивалентного увеличения пороговых значений любого из трех параметров тест-объекта: k, a, B_ϕ по сравнению с их пороговыми значениями при неограниченном времени наблюдения. Во втором случае осложнение зрительной задачи в соответствии с (1-83) определяется уменьшением эффективного контраста тест-объекта с фоном. Следовательно, кратковременное появление тест-объекта на фоне постоянной яркости также приводит к увеличению пороговых значений любого из трех перечисленных параметров.

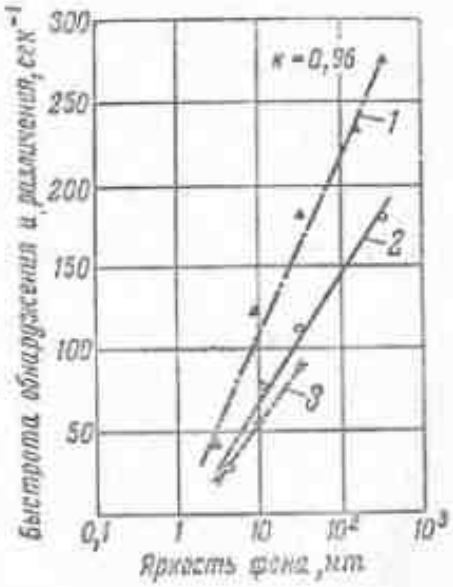


Рис. 1-117.

1 — по Ферри и Рэнд (кольцо Ландольта $a=3'$); *2* — по Коббу (диск $a=2{,}4'$); *3* — по Коббу (две черные полосы на белом фоне ($a=1{,}82'$).

Экспериментальные исследования порогового видения и различения в условиях ограниченной экспозиции тест-объекта были начаты очень давно [П. Кобб (1924), К. Ферри и Г. Рэнд (1928), М. Лекиш и Ф. Мосс (1931) и др.]. Результаты этих исследований (рис. 1-117) позволяют с достаточной для практики точностью написать эмпирическое уравнение логарифмического типа:

$$\frac{1}{\tau}=a+b\lg(B_\phi-c), \tag{1-99}$$

где a, b и c — параметры уравнения, определяемые контрастом и размером тест-объекта, его формой и диапазоном яркости, в пределах которого используется расчетное уравнение.

Уравнениями этого типа пользовались М. Лекиш и Ф. Мосс при описании быстроты различения и опознавания различных тест-объектов. Согласно данным этих авторов параметры уравнения (1-99) определяются зрительной задачей (табл. 9).

Таблица 9

Значения параметров уравнения (1-99) в зависимости от условий зрительной работы

Условия зрительной работы	Значения параметров		
	a	b	c
1. Обнаружение черной точки на белом фоне $a=2{,}4'$; $k=0{,}95$; $B_\phi=5\div3{,}2\cdot10^3$ *нт*	—7	63	0
2. Чтение английского печатного текста $k=0{,}95$; $B_\phi=2{,}5$—80 *нт*	74	24	0,65
3. Скорость раздельного различения двух черных полосок на белом фоне $k=0{,}95$; $a=1{,}8'$; $B_\phi=5$—300 *нт*			
а) на фоне равномерной яркости	—53	100	0
б) при наличии „сбивающих" изображений (рис. 1-118)	16	20	0

Детальные исследования быстроты различения и обнаружения были проведены В. Г. Самсоновой [Л. 171] и Р. Блэкуэллом [Л. 172]. Результаты исследований В. Г. Самсоновой (рис. 1-116) позволяют найти пороговые соотношения k, B_ϕ и τ для различения кольца Ландольта с угловым размером разрыва $a=4'$. Так, например, десятикратному сокращению с 0,02 до 0,002 *сек* соответствует примерно пятикратное увеличение контраста с 0,2 до 0,96 при одновременном двадцатипятикратном увеличении яркости с 30 до 750 *нт*.



Рис. 1-118.
а — тест-объект; б и в — „сбивающие" изображения.

Р. Блэкуэлл [Л. 172] исследовал быстроту обнаружения более светлых по сравнению с фоном круглых пятен с широкой вариацией яркости $3{,}4\cdot10^{-3}$—340 *нт*, углового размера пятна 0,8—60′ и его контраста с фоном 0,007—3 при различных значениях вероятности 0,5—0,99 (рис. 1-119). На основании этих исследований Р. Блэкуэлл установил соотношение между контрастами тест-объектов с фоном, обеспечивающими различные значения вероятности обнаружения в пределах 0,5—0,99 (табл. 10) при постоянстве значений времени наблюдения, яркости и размера объекта для быстроты опознавания $\frac{1}{\tau}\geqslant10$ *сек*$^{-1}$.

Таблица 10

Зависимость вероятности обнаружения от контраста тест-объекта с фоном

Вероятность обнаружения p	0,5	0,75	0,90	0,95	0,99
Отношение контрастов $c_k=k_p:k_{p=0,5}$	1	1,24	1,47	1,60	1,84

Для расчета пороговых параметров обнаружения тест-объектов с ограниченным временем их наблюдения $\tau\ll\theta$ можно пользоваться (1-89а). Согласно (1-89а) определяем эффективный контраст W по заданным значениям k и τ. Замена четырех параметров k, τ, B_ϕ и a тремя W, B_ϕ и a позволяет использовать для расчета уравнение (1-39), (1-40) или (1-41). При заданных τ, B_ϕ и a определяется $W_{пор}$ из (1-39), (1-40) или (1-41) и рассчитывается $k_{пор}$ из (1-89а).

Пользуясь понятием эффективного контраста, определяющего

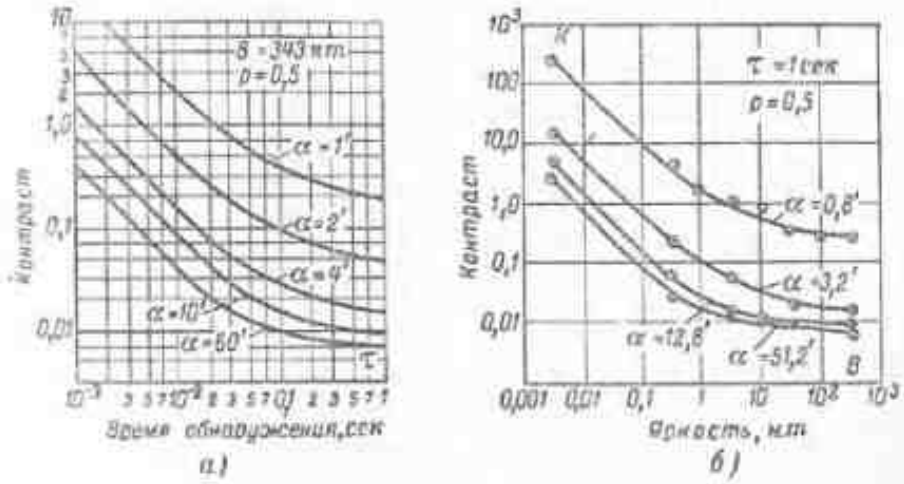


Рис. 1-119.

порог различения в условиях заданного времени наблюдения, А. С. Шайкевич [Л. 173] построил двухквадрантную номограмму (рис. 1-120), позволяющую в первом приближении определить быстроту различения по заданным значениям a, k и B_ϕ. В этой номограмме пороговые значения $\frac{1}{\tau}$, a, k и B_ϕ приняты из условия вероятности различения кольца Ландольта $p=0{,}7$.

Согласно Х. Вестону [Л. 174] зрительную работоспособность можно определить произведением быстроты различения на вероятность правильного опознавания формы тест-объектов:

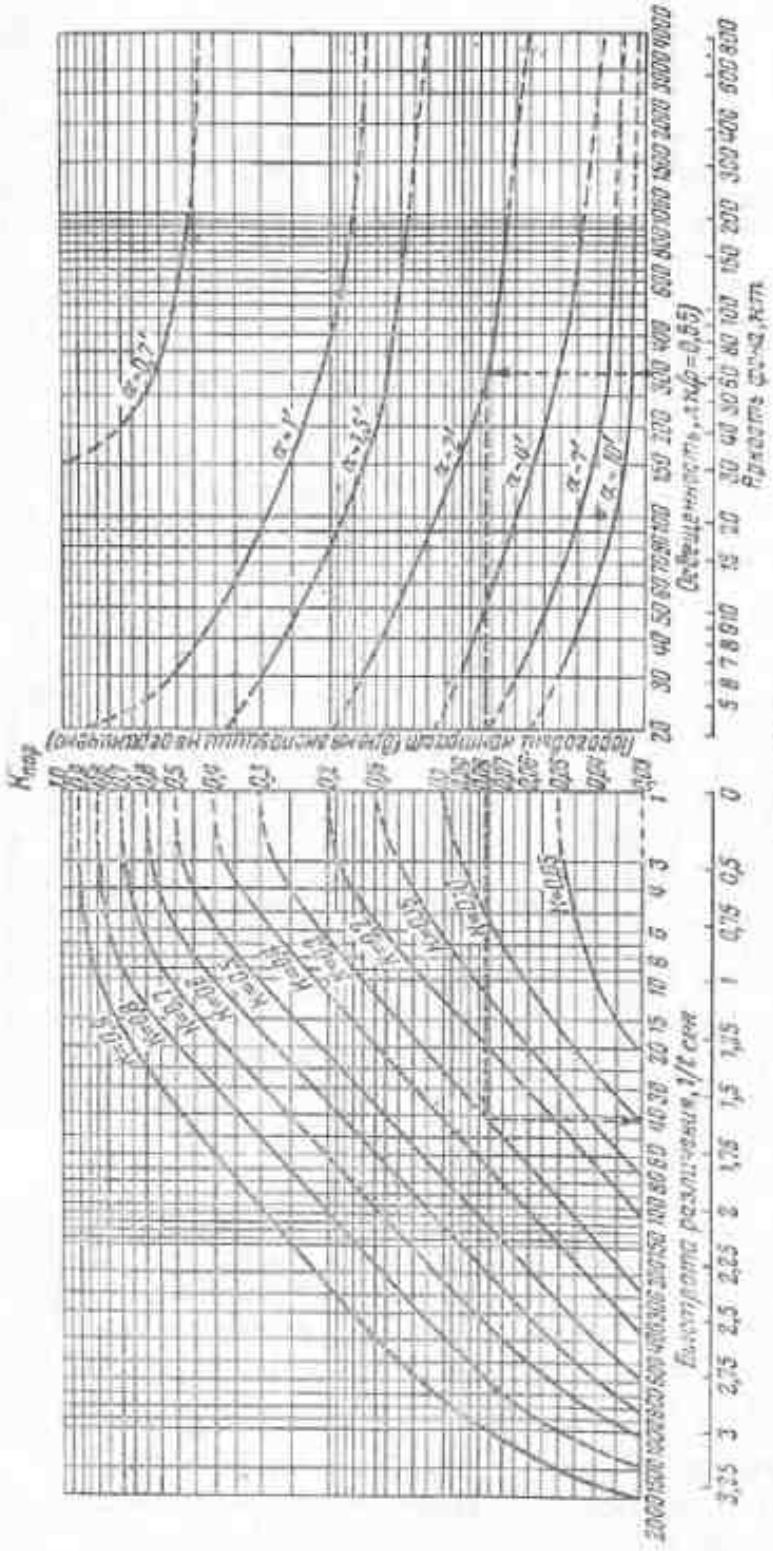


Рис. 1-120.

$$\eta = \frac{1}{\tau} p, \tag{1-100}$$

где p — вероятность правильного опознавания.

Для экспериментального определения зрительной работоспособности Вестон предлагал наблюдателям последовательно один за другим различать кольца Ландольта, напечатанные на листе белой плотной матовой бумаги. В каждой серии опытов все тест-объекты были одинакового размера и контраста, но с различным направлением разрыва. Задача наблюдателей состояла в обнаружении и вычеркивании колец с заданным направлением разрыва. Тест-объекты располагались на листе равномерными рядами.

Оценивая быстроту различения величиной, обратной среднему времени различения каждого тест-объекта с заданным направлением разрыва кольца, и вероятность правильного опознавания их формы — отношением правильно вычеркнутых колец к общему их количеству с заданным направлением разрыва, получим согласно (1-100):

$$\eta = \frac{N}{T} \cdot \frac{n}{N} = \frac{n}{T}, \tag{1-100а}$$

где n, N — количество правильно вычеркнутых и общее количество колец Ландольта с заданным направлением разрыва;

T — полное время, затраченное на различение N колец без учета времени на вычеркивание.

Уравнение (1-100а) показывает, что зрительная работоспособность по Вестону определяет производительность зрительной работы. Для сравнительной оценки условий освещения в английском осветительном кодексе 1955 г. [Л. 175] принято относительное значение зрительной работоспособности

$$\eta_{отн} = \frac{\eta}{\eta_{макс}}, \tag{1-100б}$$

где $\eta_{макс}$ — максимальное значение зрительной работоспособности для заданных значений α и k, определяемое оптимальными условиями освещения.

Английский осветительный кодекс построен для относительного значения зрительной работоспособности $\eta = 0{,}9$. Этому значению работоспособности, по данным Вестона, соответствует яркость фона, равная:

$$B_ф = \frac{450}{\alpha^2 k}. \tag{1-100в}$$

1-13. Зрительная индукция

Индуктивные зрительные процессы. Возбуждение какого-либо участка зрительного анализатора вызывает реакцию не только возбужденного участка сетчатки, на кото-

рый непосредственно проецируется изображение действующего на глаз излучателя (прямое действие), но также и смежных с ним участков (косвенное действие). Такое косвенное действие излучения на орган зрения принято называть *зрительной индукцией*.

Излучение, вызывающее зрительную индукцию, называют *индуцирующим*, а излучение тест-объекта, зрительное ощущение которого изменяется под действием индукции, — *реагирующим*. Как показывают результаты экспериментов, индуцирующее излучение может и ослаблять и усиливать зрительное ощущение. В первом случае *зрительную индукцию* принято считать *отрицательной*, а во втором — *положительной*.

Зрительную индукцию как положительную, так и отрицательную могут вызывать не только излучения, но также и неадэкватные раздражители (звуковые, обонятельные, дактильные и др.). Характерным примером положительной индукции может служить уменьшение светового порога при дополнительном появлении в поле зрения одного или несколько световых пятен яркостью $B \approx B_{пор}$. Как было показано ранее (§ 1-7), пороговая яркость одного пятна меньше пороговой яркости нескольких пятен, расположенных на таких расстояниях друг от друга, которые исключают прямое действие за счет рассеяния в глазных средах.

Положительное индуктивное действие неадэкватных раздражителей на световую и цветовую чувствительность [Л. 175], критическую частоту мелькания и на другие функции зрения исследовалось С. В. Кравковым [Л. 3]. Положительная индукция световых раздражителей на иррадиацию, критическую частоту мелькания, остроту различения и другие функции зрения была отмечена автором [Л. 176], Л. П. Галочкиной [Л. 177], О. П. Холмской [Л. 178], Л. И. Селешкой [Л. 179] и др.

Наиболее характерным примером отрицательной зрительной индукции является снижение функции зрения при неравномерном распределении яркости в поле зрения, а также при наличии в поле зрения ярких источников излучения. Для установления причин, вызывающих возникновение зрительной индукции, рассмотрим индуктивное действие на функции зрения [Л. 180] источника света яркостью, во много раз превышающей яркость фона. Свойство светящих тел изменять установившийся уровень видимости в результате чрезмерной освещенности, создаваемой ими на зрачке наблюдателя, или их чрезмерной яркости по сравнению с яркостью адаптации принято называть *блескостью*. Снижение чувствительности зрительного анализатора в результате отрицательного индуктивного действия блескости принято называть *ослепленностью*. При выборе количественного критерия ослепленности принято ориентироваться на изменение наиболее уязвимой функции зрения. Такой наиболее уязвимой функцией является контрастная чувствительность.

В связи с этим количественную оценку индуктивного действия блескости принято определять отношением пороговых разностей яркости при наличии и отсутствии источника блескости в поле зрения наблюдателя. Это отношение, равное или большее единицы, названо *коэффициентом ослепленности* [Л. 180]:

$$S = \frac{\Delta B_S}{\Delta B}. \qquad (1\text{-}101)$$

Снижение видимости объектов при появлении в поле зрения источника блескости происходит в результате:

а) уменьшения диаметра зрачка глаза наблюдателя, вследствие чего уменьшается освещенность сетчатки при неизменной яркости поля зрения;

б) рассеяния светового потока блеского источника в глазных средах, вследствие чего возникает вуалирующая световая пелена, снижающая эффективное значение контраста объекта с фоном;

в) индуктивного взаимодействия центрального и периферического звеньев зрительного анализатора, возникающего в результате резкого различия уровней возбуждения нервных клеток в зоне действия тест-объекта и источника блескости.

Как показали результаты исследований Г. И. Покровского [Л. 16], В. Стайлса [Л. 183], И. Ле Грана [Л. 184], Г. Фрая [Л. 185], Де Мотта и М. Байтона [Л. 186] и др., рассеяние излучения блескости в глазных средах наблюдателя может играть существенную роль при малых значениях угла действия блескости — угла между линией зрения и лучом источника блескости по направлению к глазу наблюдателя.

Вуалирующая роль рассеянного излучения источника блескости установлена [Л. 191, 192] измерением слепящего действия источника блескости, изображение которого располагалось в пределах слепого пятна, в условиях постоянства диаметра зрачка глаза наблюдателя. Эти измерения показали также существенную роль зрительной индукции в процессах слепящего действия блескости. Существенное значение индукции в зрительных процессах подтверждается также влиянием неадэкватных раздражителей на световую и цветовую чувствительность зрительного анализатора, зависимость коэффициента ослепленности от утомления в процессе работы (рис. 1-121), инверсией зрительной индукции из отрицательной в положительную (рис. 1-22) и др.

Роль реакции зрачка в слепящем действии блескости невелика [Л. 181] и не превышает 10% в условиях реального соотношения яркости фона и освещенности, создаваемой блеским источником на зрачке наблюдателя. Наибольшее значение реакции зрачка наблюдается в условиях малой яркости адапта-

ции, так как в этих условиях уменьшение зрачка в результате действия блескости максимально.

Исследуя индуктивное действие неадэкватного звукового раздражителя на зрительные пороги, в том числе на иррадиацию, С. В. Кравков [Л. 187] пришел к выводу, что основой ин-

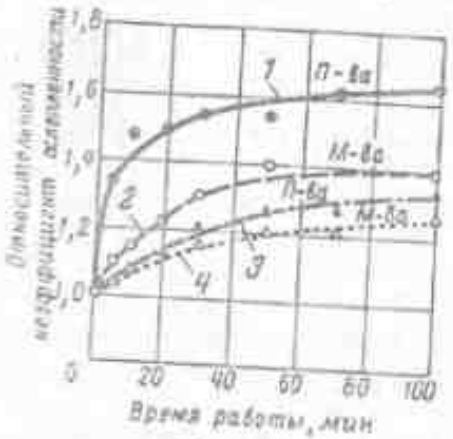


Рис. 1-121.

1, 3 — опытная потеря; 2, 4 — кривая печатного текста.

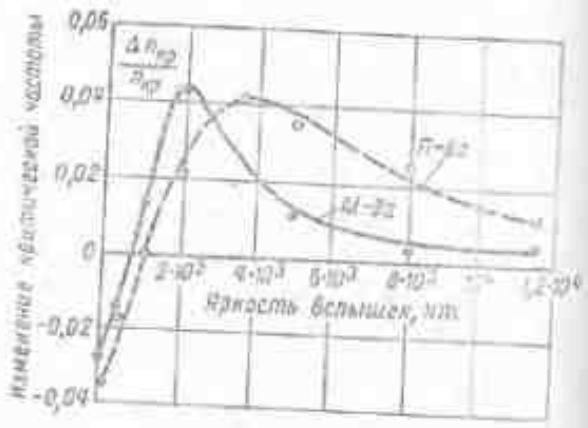


Рис. 1-122.

$\alpha = 12'$; $B_ф = 0{,}24$ нт.

дуктивного действия адэкватных и неадэкватных раздражителей является изменение уровня возбуждения в зоне реакции на тест-объект.

Эквивалентная вуалирующая яркость. Внедрение в практику осветительной техники мощных источников света и световых приборов, концентрирующих световой поток в пределах малых телесных углов (приборы с зеркальными отражателями и призматическими преломлениями), вызвало большой интерес к исследованию блескости световых приборов.

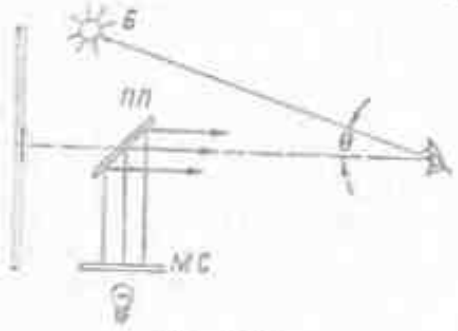


Рис. 1-123.

На основании результатов исследований М. Лекнша [Л. 188], Л. Холлэдея [Л. 189], В. Стайлса [Л. 183] и др. девятая сессия МКО в 1935 г. рекомендовала метод количественной оценки слепящего действия, основанный на учете *эквивалентной вуалирующей яркости*. Этот метод, предложенный Л. Холлэдеем, основан на эквивалентном сопоставлении увеличения порогового контраста тест-объекта за счет слепящего действия исследуемого источника блескости и уменьшения контраста тест-объекта яркостью вуалирующей пелены, равномерно распределенной на фон и на объект наблюдения. Эквивалентной вуалирующей яркостью Л. Холлэдей предложил считать такую яркость, равномерно наложенную на фон и объект наблюдения, которая увеличивает пороговый яркостный контраст тест-объекта с фоном во столько же раз, как и появившаяся в поле зрения блескость. Экспериментальное определение эквивалентной вуалирующей яркости осуществляется двумя измерениями порогового контраста тест-объекта простейшей формы и большого углового размера ($\alpha \geqslant 1{,}5°$). Первое измерение производится при наличии в поле зрения источника блескости $Б$ (рис. 1-123), посылающего излучение в глаз наблюдателя под углом действия блескости θ. Второе измерение осуществляется через плоско-параллельную пластинку $ПП$, отражающую по направлению к глазу наблюдателя излучения равнояркой поверхности $МС$ при экранированном источнике блескости. В этом случае наблюдатель видит тест-объект через вуалирующую световую пелену яркостью

$$\beta = \rho B_{м.с},$$

где ρ — коэффициент отражения плоско-параллельной стеклянной пластины $ПП$.

Эквивалентный контраст тест-объекта с фоном, воспринимаемый наблюдателем через плоско-параллельную пластинку, будет меньше действительного:

$$k_э = \frac{B_ш - B_ф}{B_ф + \beta}. \qquad (1\text{-}102)$$

Варьируя яркость вуалирующей пелены β, наблюдатель подбирает такое ее значение $\beta_э$, которое обеспечивает пороговое восприятие тест-объекта с той же вероятностью, как и при первом измерении. Яркость вуалирующей пелены, подобранную по условиям эквивалентности зрения, принято называть эквивалентной вуалирующей яркостью, характеризуя ею эквивалентное действие блескости.

Применяя в первом приближении закон Вебера—Фехнера с поправкой на собственный свет сетчатки (§ 1-8), можно написать следующее выражение коэффициента ослепленности [Л. 190]:

$$S = \frac{\Delta B_S}{\Delta B} = \frac{(B + B_{с.с} + \beta_э) k_{пор}}{(B + B_{с.с}) k_{пор}} = 1 + \frac{\beta_э}{B + B_{с.с}}, \qquad (1\text{-}103)$$

где $B_{с.с}$ — яркость собственного света сетчатки;

$\beta_э$ — эквивалентная вуалирующая яркость;

$k_{пор}$ — пороговый контраст объекта с фоном (постоянная Вебера—Фехнера).

Согласно уравнению Вебера—Фехнера с поправкой на собственный свет сетчатки глаза (1-103) величину эквивалентной

вуалирующей яркости можно измерить с помощью определения пороговой разности при наличии и отсутствии блескости в поле зрения наблюдателя.

Десятая сессия МКО не только одобрила метод Л. Холладея, но также рекомендовала эмпирическое уравнение для расчета эквивалентной вуалирующей яркости:

$$\beta_э = m\frac{E}{\theta^n}, \qquad (1\text{-}104)$$

где E — освещенность, создаваемая блеским источником на зрачке глаза наблюдателя, *лк*;
θ — угол действия блескости, *град*;
m и n — параметры уравнения, принятые равными: $m=10$ и $n=2$ при выражении эквивалентной яркости, *нт*.

На этой же сессии МКО было принято считать допустимым эквивалентную вуалирующую яркость аддитивной:

$$\beta_э = m\left(\frac{E_1}{\theta_1^n}+\frac{E_2}{\theta_2^n}+\cdots+\frac{E_i}{\theta_i^n}\right), \qquad (1\text{-}105)$$

где $E_1, E_2, \ldots, E_i$ — значения освещенности на зрачке, создаваемые отдельными источниками блескости.

Исследования автора [Л. 190, 191] показали, что эквивалентная вуалирующая яркость определяется не только углом действия источника блескости и создаваемой им освещенностью на зрачке глаза наблюдателя, но также и яркостью этого источника для $B \leqslant 10^5$ *нт*:

$$\beta_э = (31\lg B - 8{,}54)\frac{I\cos\theta}{L^2\theta^2}, \qquad (1\text{-}106)$$

где $\beta_э$ — эквивалентная вуалирующая яркость, *нт*;
B, I — яркость, *нт*, и сила света источника блескости, *св*, по направлению к глазу наблюдателя;
L — расстояние от источника блескости до глаза наблюдателя, *м*;
θ — угол действия блескости, *град*.

Для блеских источников большой яркости $B \geqslant 10^5$ *нт*, когда размеры их изображения на сетчатке малы и практически постоянны, уравнение эквивалентной вуалирующей яркости принимает более простой вид, аналогичный (1-104):

$$\beta_э = 9{,}46\frac{I\cos\theta}{L^2\theta^2} \qquad (1\text{-}107)$$

или

$$\beta_э = 9{,}46\frac{E}{\theta^2}. \qquad (1\text{-}107а)$$

Эти исследования показали также зависимость эквивалентной вуалирующей яркости от характеристик тест-объекта и от общего физиологического состояния наблюдателя. Зависимость $\beta_э$ от характеристик тест-объекта была установлена непосредственными измерениями эквивалентной вуалирующей яркости на тест-объектах различных размеров и контрастов (рис. 1-124). Влияние общефизиологического состояния на зрительную индукцию наглядно видно из графиков изменения коэффициента ослепленности в функции продолжительности напряженной зрительной работы (рис. 121). Рост коэффициента ослепленности в течение работы следует объяснить утомлением наблюдателей в процессе работы.

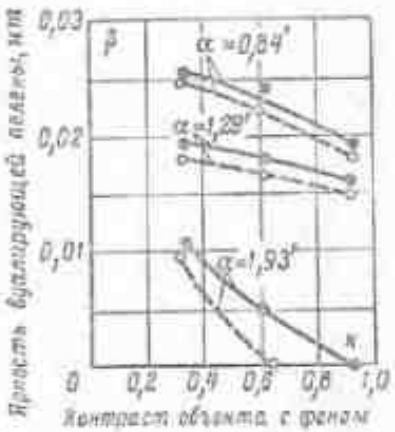


Рис. 1-124.
——— $\beta_\Phi = 6{,}4$ *нт*.
– – – – $\beta_\Phi = 15{,}8$ *нт*.

Непостоянство эквивалентной вуалирующей яркости при неизменных значениях освещенности на зрачке наблюдателя и угла действия блескости, в особенности в условиях изменения общефизиологического состояния наблюдателя, служит бесспорным доказательством наличия внутренних процессов центрального порядка. Эти процессы определяют реакцию организма на появление в поле зрения источника блескости как непосредственно, так и через взаимосвязь с периферическими процессами, протекающими в сетчатке глаза.

Взаимосвязь процессов, протекающих в центре и на периферии, наглядно видна на примере инверсии зрительной индукции в условиях широкой вариации соотношения прямого и индуктивного возбуждения. Так, например, влияние источника блескости на критическую частоту мелькания изменяется по знаку при изменении яркости вспышек (рис. 1-122). При малой яркости вспышек $B \leqslant 10^3$ *нт* появление источника блескости снижает критическую частоту мелькания, в то время как при $B > 10^3$ *нт* критическая частота увеличивается в результате действия на глаз наблюдателя блескости. Как показывает опыт, инверсия зрительной индукции может происходить и при другой яркости проблесков, если изменить условия адаптации наблюдателя или яркость и силу света источника блескости.

В практических условиях зрительной работы обнаружение и различение объектов, как правило, осуществляется на фоне неравномерной яркости. Обычно яркости отдельных участков поля зрения отличаются одна от другой не только вследствие различия коэффициентов яркости, но также и в результате неравномерного распределения светового потока в освещаемом

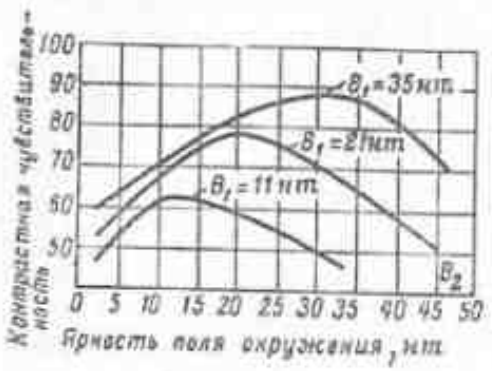


Рис. 1-125.

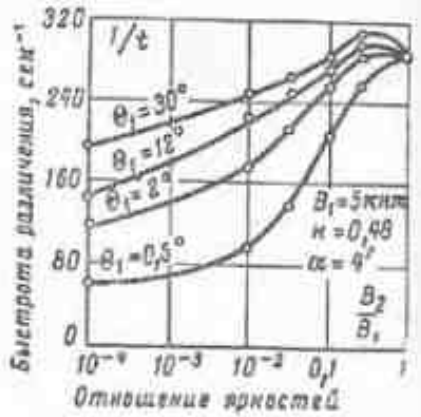


Рис. 1-126.

пространстве. Зрительная работа в практических условиях обычно требует более или менее частого переключения взгляда с одной поверхности на другую. Следовательно, в практических условиях зрительной работы приходится иметь дело с неравномерным распределением яркости во времени и пространстве. Изменение яркости по времени, как известно (§ 1-11), приводит к адаптационным изменениям чувствительности, которые неизменно сказываются на продуктивности зрительной работы. Неравномерное распределение яркости в пространстве также сказывается на продуктивности зрительного процесса в результате зрительной индукции.

Как показывают результаты исследования различных функций зрения в условиях неравномерной яркости поля зрения (П. Кобб и Ф. Мосс [Л. 192], Р. Литго [Л. 193], Н. И. Пикегин [Л. 194], В. Г. Самсонова [Л. 171], В. Арндт [Л. 195], К. Кроуя [Л. 196] и др.), оптимально возможное значение функций имеет место при равномерном распределении яркости в пределах всего поля зрения.

По данным В. Ардта контрастная чувствительность зрительного анализатора существенно снижается (рис. 1-125) при затемнении периферии $B_2<B_1$ и тем более при затемнении центра поля зрения $B_1<B_2$. В этих исследованиях размер центрального участка поля зрения был равен $20°\times20°$ и размер тест-объекта $\alpha=1°$. По данным В. Г. Самсоновой уменьшение углового размера центральной зоны поля зрения и отношения яркостей периферической к центральной может привести к 3-кратному падению скорости различения (рис. 1-126). Наряду с этим В. Г. Самсонова отмечает некоторое повышение скорости различения в результате положительной индукции в условиях $1{,}0\geqslant\frac{B_2}{B_1}\geqslant0{,}1$ при размерах центральной части поля зрения $10-30°$. Некоторое повышение остроты различения в аналогичных условиях были отмечены Р. Литго (рис. 1-127) наряду

с общим снижением этой функции зрения при повышении неравномерности, в особенности при $B_2>B_1$. Согласно исследова-

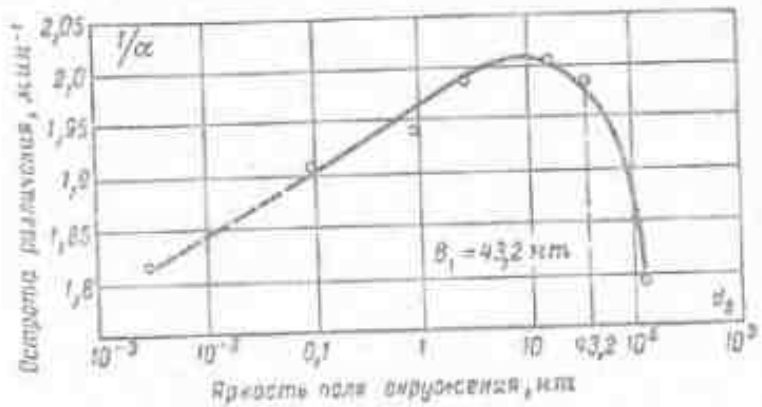


Рис. 1-127.

ниям Р. Литго темное поле окружения при $B_2=10^{-2}B_1$ снижает остроту различения лишь только на 10%.

Принимая в соответствии с уравнением (1-106) эквивалентную вуалирующую яркость аддитивной, можно установить аналогию между действием локальных источников блескости и влиянием поля окружения повышенной яркости на величину порогового контраста (рис. 1-128). В соответствии с этой аналогией влияние поля окружения повышенной яркости $B_2>B_1$ следует характеризовать также эквивалентной вуалирующей яркостью, численно равной сумме ее значений, создаваемых элементарными участками поля окружения. Пользуясь этим правилом, П. Мун и Д. Спенсер [Л. 197] предложили определять эквивалентную вуалирующую яркость, создаваемую полем окружения яркостью B_2, следующим интегралом:

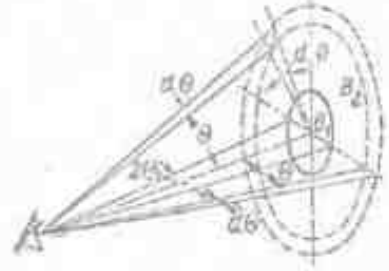


Рис. 1-128.

$$\beta_0=\int_{\delta_1}^{\delta_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2}d^2\beta_0=m\int_{\delta_1}^{\delta_2}d\delta\int_{\theta_1}^{\theta_2}B_2(\theta,\delta)\,\delta^{-n}\sin\delta\cos\delta\,d\theta, \quad (1\text{-}108)$$

где β_0 — эквивалентная вуалирующая яркость, создаваемая полем окружения, *нт*;

θ и δ — меридиональные и азимутальные угловые координаты поля зрения, *град* (рис. 1-128);

$B_2(\theta,\delta)$ — яркость, *нт*, элементарного участка поля зрения, определяемого телесным углом $d^2\omega=\sin\delta\,d\theta\,d\delta$, создающая освещенность на зрачке глаза наблюдателя $d^2E_{зр}=B_2(\theta,\delta)\sin\theta\cos\delta\,d\theta\,d\delta$.

Для поля зрения, обладающего осью симметрии, совпадающей с линией зрения, распределение яркости по зонам $\Delta\theta$ равномерно, следовательно, не зависит от меридиональных углов θ. При этом условии уравнение (1-108) примет вид:

$$\beta_0 = 2\pi m \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_2(\theta)\,\theta^{-n} \sin\theta\cos\theta\, d\theta. \qquad (1\text{-}108а)$$

Подставив в полученное уравнение значения постоянных $m=10$ и $n=2$ из (1-104) и преобразовав подынтегральное выражение, получим:

$$\beta_0 = 0{,}0192 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{B_2(\theta)\sin 2\theta}{2\theta^2}\, d\theta, \qquad (1\text{-}108б)$$

где θ — азимутальный угол, *рад*.

Решая полученное уравнение (1-108б) относительно β_0 для $B_2 = \text{const}$ путем подстановки $u = \sin 2\theta$ и $dv = \frac{d\theta}{2\theta^2}$, Муи и Спенсер получили значение эквивалентной яркости, создаваемой ярким полем окружения:

$$\beta_0 = 0{,}0192 B_2 \left[1 - \frac{\sin 2\theta_2}{2\theta_2} - 2\,\mathrm{ci}(\theta_2) + 2\,\mathrm{ci}(\theta_1)\right]_{\theta_1}^{\theta_2}, \qquad (1\text{-}109)$$

где $\mathrm{ci}(\theta) = \int_{\theta}^{\infty} \frac{\cos\theta}{\theta}\, d\theta$ — интегральный косинус, численно равный

$$\mathrm{ci}(\theta) = 0{,}577 + \ln\theta - \frac{\theta^2}{2\cdot 2!} + \frac{\theta^4}{4\cdot 4!} - \frac{\theta^6}{6\cdot 6!} + \ldots$$

Приняв предельное значение углового размера периферической части поля зрения $\theta_2 = 1$ *рад* и $\frac{\sin 2\theta_2}{2\theta_2} = 1$, получим:

$$\beta_0 = 0{,}0192\, B_2 [0{,}96 - 2\,\mathrm{ci}(\theta_1)]. \qquad (1\text{-}110)$$

Для выяснения доли участия центральной и периферической частей поля зрения в адаптационных процессах Муи и Спенсер предложили считать величину β_0 в поле зрения равномерной яркости численно равной яркости адаптации. Это предположение позволило определить долю участия центральной части поля зрения при $B_1 = B_2$ численно равной:

$$b_ц = 1 - \frac{\beta_0}{B_2}, \qquad (1\text{-}111)$$

где $\frac{\beta_0}{B_2} = b_0$ — доля участия в адаптационном процессе поля окружения.

Расчет величины $b_ц$ в функции углового размера центральной зоны поля зрения θ_1 показывает, что уже при $\theta_1 = 0{,}0131$ *рад* ($0{,}75^\circ$) доля участия центра $b_ц = 0{,}923$. При этом роль всей остальной периферической части поля зрения составляет $b_0 = 0{,}077$. Принимая центральную часть поля зрения заполненной яркостью B_1 и периферическую — яркостью B_2, можно определять яркость адаптации с помощью следующего уравнения:

$$B_a = 0{,}923 B_1 + 0{,}0192 B_2 [0{,}96 - 2\,\mathrm{ci}(\theta_1)], \qquad (1\text{-}112)$$

где B_a — яркость адаптации, *нт*;

B_1 и B_2 — яркость центральной и периферической зон поля зрения, *нт*;

θ_1 — угловой размер центральной зоны поля зрения, *рад*.

Пользуясь эмпирическим уравнением (1-37) и располагая методикой расчета яркости адаптации (1-112), можно рассчитать пороговую разность яркости для любого варианта при $B_2 > B_1$:

$$\Delta B_S = 0{,}007\,(0{,}456 + B_a^{0{,}5})^2,$$

где B_a — яркость адаптации, определяемая с учетом распределения яркости и размера центральной и периферической зон поля зрения [уравнение (1-112)].

Увеличение разностного порога в результате индуктивного действия периферических участков поля зрения повышенной яркости можно определить по аналогии с коэффициентом ослепленности согласно уравнению (1-103):

$$S = \frac{\Delta B_S}{\Delta B} \left[\frac{0{,}456 + \sqrt{B_a}}{0{,}456 + \sqrt{B_1}}\right]^2 = \left(\frac{\delta + \sqrt{\psi}}{1 + \delta}\right)^2, \qquad (1\text{-}113)$$

где $\delta = \frac{0{,}456}{\sqrt{B_a}}$,

$$\psi = \frac{B_п}{B_1} = 0{,}923 + 0{,}0192 \frac{B_2}{B_1} [0{,}96 - 2\,\mathrm{ci}(\theta_1)].$$

Кратность увеличения порогового контраста в результате неравномерного распределения яркости поля зрения можно назвать *показателем неравномерности*[1].

Анализируя полученное уравнение, можно видеть, что для значений яркости центральной зоны поля зрения $B_1 \geqslant 50$ *нт*

[1] Показатель неравномерности, ранее введенный в практику осветительной техники автором [Л. 46], отличается на постоянную величину, численно равную единице, $S = N + 1$.

показатель неравномерности с достаточной точностью однозначно определяется лишь только отношением яркостей адаптации и центральной зоны поля зрения:

$$S = \frac{B_2}{B_1}. \qquad (1\text{-}113а)$$

Зависимость показателя неравномерности от размера центральной зоны и от отношения яркостей по зонам дана семейством кривых $S = f\left(\frac{B_2}{B_1}\right)$ для $B_1 = \text{const}$ (рис. 1-129). В соответствии с результатами экспериментальных исследований Р. Литтo (рис. 1-127), Мун и Спенсер считают возможным применять (1-113) также и в тех случаях, когда $B_2 < B_1$. В этих случаях показатель неравномерности (1-113) определяется отношением $\psi = \frac{B_1}{B_2}$.

К группе индуктивных действий света следует отнести также явления посветления серого тест-объекта на черном фоне и потемнение того же объекта на ярком белом фоне. Такое индуктивное увеличение светлотного различия смежных полей принято называть *индуктивным светлотным контрастом*. Наиболее заметно индуктивное контрастирование в зонах, близлежащих к границе оптического контакта фона и объекта, вследствие чего индуктивное действие возрастает с увеличением отношения параметра тест-объекта к его площади. Поэтому индуктивный светлотный контраст наиболее отчетливо наблюдается при больших размерах фона и малых размерах тест-объектов. И. П. Павлов, уделяя большое внимание процессам индукции в живом организме, указывал на взаимосвязь контрастных явлений с индукцией возбуждения. «Явления взаимной индукции вполне совпадают, — писал он [Л. 198], — с большой группой контрастных явлений, изученных в теперешней физиологии органов чувств».

Согласно этому положению следует рассматривать индуктивный контраст серого тест-объекта на черном фоне как положительную индукцию темного фона на более яркий тест-объект и отрицательную индукцию объекта — на фон. Вследствие малых размеров тест-объекта отрицательная индукция в этом случае пренебрежимо мала. Наоборот, отрицательная индукция играет решающую роль в зрительной оценке яркости небольшого серого тест-объекта на светлом фоне. В этом случае светлота объекта тем меньше, чем больше яркость фона.

Цветовая индукция. В тех случаях, когда смежные участки поля зрения разноцветны, происходит взаимное индуктивное изменение ощущения их цветности. Это явление индуктивного изменения ощущения цветности смежных полей принято называть *индуктивным цветовым контрастом*. Так же как при индуктивном изменении светлоты, индуктивный цветовой

контраст наиболее заметен на тест-объекте серого цвета малого размера. Индуктивное действие цвета смежных равноярких и разноцветных участков поля зрения можно рассматривать как результат суммирования ощущений цветности исследуемого тест-объекта и дополнительного индуктированного цвета,

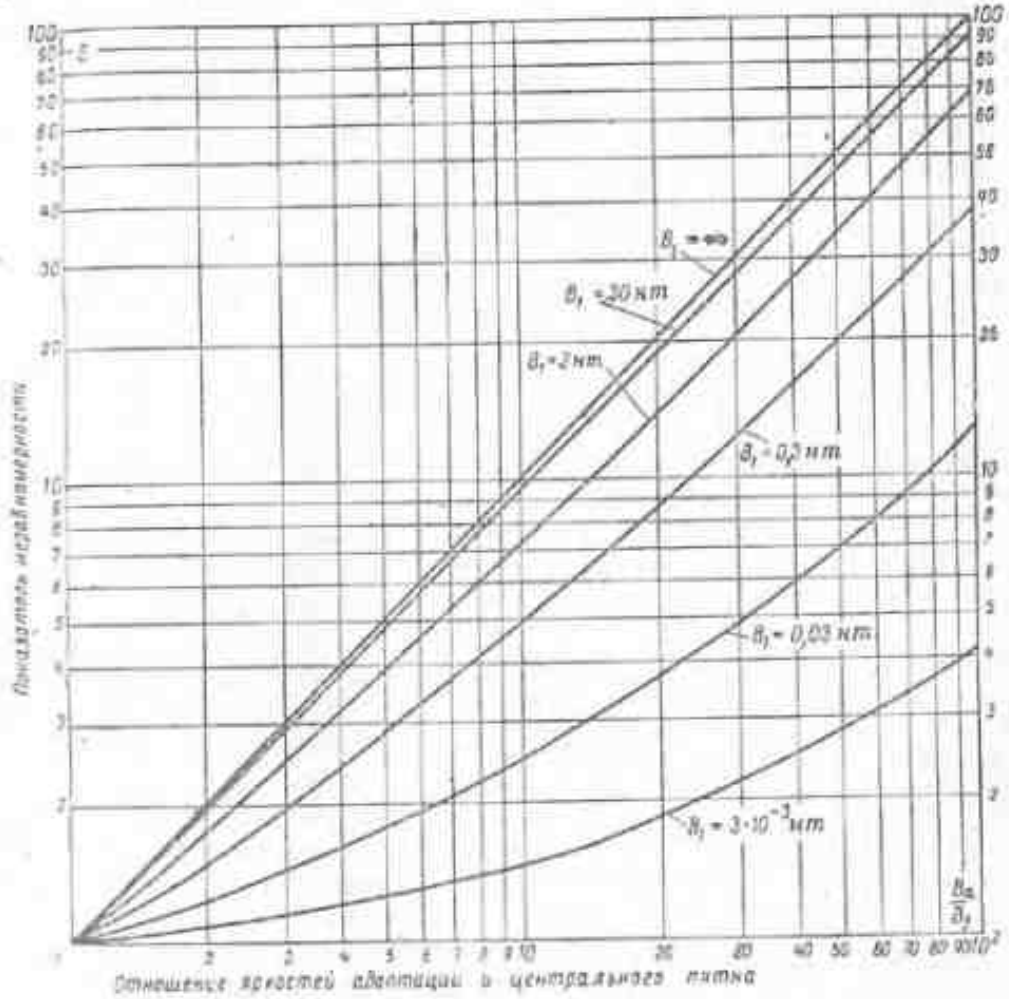


Рис. 1-129.

контрастного индуктирующему, т. е. наиболее удаленного от него.

Многие исследователи, художники и писатели (П. Бугер, Б. Томсон, Ф. Гроттус, В. Гете, Ф. Вольтер, Л. да Винчи и др.) описывали явление индуктивного цветового контраста, касаясь лишь качественной его стороны. Так, например, Леонардо да Винчи в своем трактате о живописи писал о «наиболее превосходном» зрительном ощущении цвета при расположении его в непосредственной близости от «цвета прямопротивоположного».

В соответствии с индуктивным светлотным контрастом можно предполагать, что индуктированный фоном цвет в зоне изображения объекта должен быть дополнительным к индуктирующему как противоположный ему, следовательно, наиболее удаленный от него. Однако эти предположения, как показали

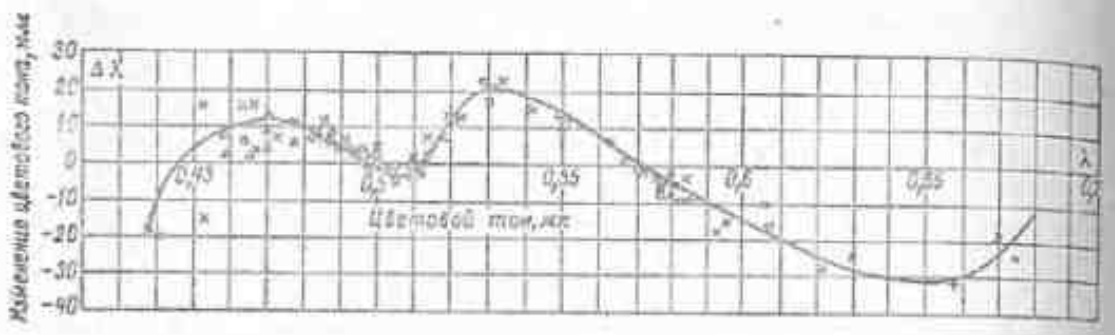


Рис. 1-130.

количественные исследования, являются лишь некоторым приближением к действительности.

Первой попыткой установления количественных закономерностей индуктивного цветового контраста были экспериментальные исследования Эбнея [Л. 96]. Эти исследования показали, что индуктированный цвет отличается от дополнительного к индуктирующему по цветовому тону на 10—40 *мк* в сторону меньших длин волн для синих и в сторону больших — для голубых и желто-оранжевых излучений. Так, например, при индуктирующем синем индуктируемым является оранжевый взамен дополнительного к синему желтого. Детальное исследование цветовой индукции было проведено проф. Н. Т. Федоровым совместно с его учениками [Л. 199, 200]. Имя было установлено эмпирическое количественное соотношение различий между значениями цветовых тонов цвета, дополнительного к индуктирующему $\lambda_д$ и индуктированного цвета $\lambda_и$. Это соотношение, являвшееся результатом измерений пятью наблюдателями [Л. 110], приведено в виде зависимости разности значений цветовых тонов $\Delta\lambda = \lambda_д - \lambda_и$ от цветового тона индуктированного цвета (рис. 1-130). Результаты исследований Н. Т. Федорова и др. показали наличие в спектре однородных и чистых пур-

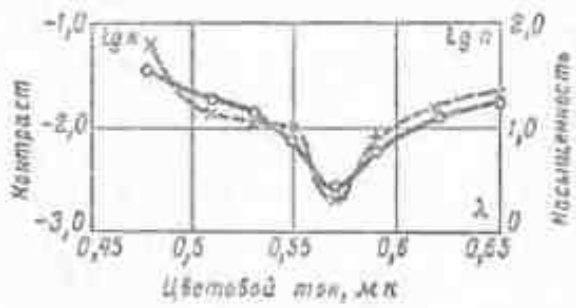


Рис. 1-131.

пурных цветов шести характерных точек, для которых отсутствует различие между значениями цветового тона у цветов индуктированного и дополнительного к индуктирующему. Эти шесть точек характеризуют три пары дополнительных цветов:

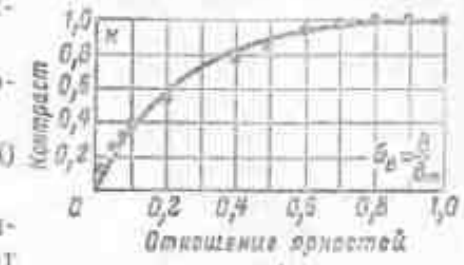
а) синего 0,445 *мк* и желтого 0,571 *мк*;

б) зеленого 0,511 *мк* и пурпурного 0,510 *мк*;

в) пурпурно-красного 0,570 *мк* и голубого 0,498 *мк*.

Синие и зеленые индуктированные цвета всегда имеют цветовой тон меньше дополнительного к индуктирующему, а голубые, желтые, оранжевые и красные — больше.

Индуктирующие цвета однородных излучений, обладающие большей насыщенностью, вызывают во всех без исключения случаях более насыщенные индуктированные цвета (рис. 1-131). Относительное увеличение яркости и площади поля зрения индуктирующего цвета по сравнению с объектом наблюдения приводит к увеличению чистоты индуктируемого цвета при постоянстве его цветового тона (рис. 1-132).



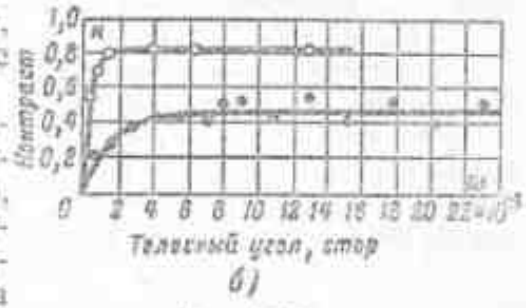


Рис. 1-132.

Изменения индуктируемого цвета в зависимости от соотношения яркостей и размеров индуктирующего и индуктируемого полей зрения по Н. Т. Федорову можно выразить следующим эмпирическим уравнением:

$$\frac{k}{k_m} = 1 - e^{-a_B \varepsilon_B}; \qquad (1\text{-}114)$$

$$\frac{k}{k_m} = 1 - e^{-a_\omega \varepsilon_\omega}, \qquad (1\text{-}114а)$$

где k — индуктивный цветовой контраст, определяемый числом порогов цветоразличения в индуктированном цвете;

k_m — предельно максимальная величина индуктированного цветового контраста;

a_B и a_ω — параметры уравнения, постоянные для заданных условий эксперимента;

$\varepsilon_B = \frac{B}{B_p}$; $\varepsilon_\omega = \frac{\omega}{\omega_p}$ — отношение яркостей и телесных углов индуктирующего и реагирующего полей.

1-14. Зрительный дискомфорт и утомление

Количественный критерий дискомфорта. Результаты многих исследований [Л. 201—215] показывают, что неудовлетворительное распределение яркости в освещаемом пространстве, так же как и неудачный выбор спектра излучения источников света, может приводить к возникновению неприятных ощущений. Эти неприятные ощущения, характеризующиеся чувством неудобства и напряженности, принято называть *зрительным дискомфортом*. Зрительный дискомфорт, возникающий в основном в результате наличия в освещаемом пространстве резких различий яркости, вызывает отвлечение внимания, уменьшение сосредоточенности и приводит к повышенному утомлению при длительном пребывании человека в дискомфортных условиях освещения.

В классификации явлений ослепленности, предложенной Британским национальным комитетом на IX сессии МКО (1935), дискомфорт определен как ощущение неудобств или напряженности (strain). Как показывают исследования многих авторов, ощущение дискомфорта может возникнуть при более благоприятных условиях освещения по сравнению с условиями, вызывающими практически заметное повышение зрительных порогов. Наряду с этим следует отметить, что длительное пребывание человека в дискомфортных условиях освещения может приводить к понижению работоспособности зрительного анализатора в результате утомления.

Большую серию исследований зрительного дискомфорта в условиях различных систем освещения провели Ферри и Рэнд [Л. 201]. Ими впервые была сделана попытка количественной оценки дискомфорта. В качестве критерия такой оценки они приняли время пребывания в исследуемом осветительном режиме, необходимое для возникновения ощущения дискомфорта. Эти исследования проводились в условиях покоя и зрительной работы (чтение печатного текста). Результаты исследований Ферри и Рэнд позволили им сделать вывод о зависимости уровня дискомфорта в основном от соотношения и распределения яркости в поле зрения наблюдателя.

Существенным этапом в определении количественной оценки дискомфорта явились экспериментальные исследования Холлэдея [Л. 202, 203], сделавшего попытку сформулировать количественное выражение качественной оценки зрительного ощущения, возникающего от пятна повышенной яркости на фоне равномерной яркости.

В этих исследованиях светлое пятно, зрительное ощущение которого сопоставлялось с ощущением яркости фона, находилось всегда в центре поля зрения наблюдателя. Исследования проводились в условиях вариации углового размера пятна 18′—7°, его яркости 0,3—320 *нт* и яркости фона (адаптации) 0,3—100 *нт*. При появлении светлого пятна на адаптационном фоне наблюдатели должны были произвести оценку ощущения, отнеся его

к одному из десяти разрядов, установленных Холлэдеем (табл. 11). Как показали эти исследования, качественная оценка зрительных ощущений исследованных вариантов определялась соотношением яркостей пятна и фона, а также размером светящего пятна.

Для сравнительной оценки возникающего зрительного ощущения Холлэдей условно принял цифровое выражение для каждого из десяти разрядов качества ощущений. Пользуясь этим методом, он описал результаты экспериментальных наблюдений следующим эмпирическим уравнением:

$$N = a + \lg B_c + 0{,}25 \lg \omega - 0{,}3 \lg B_a, \qquad (1\text{-}115)$$

где: a — постоянный коэффициент, численно равный 0,35*;
B_c и B_a — яркость исследуемого светлого пятна и фона адаптации, *нт*;
ω — телесный угол светлого пятна, *стер*;
N — количественное выражение качественной характеристики ощущения (табл. 11).

Таблица 11

Количественные выражения качественной оценки зрительного ощущения по Холлэдею

Порядковый номер разряда	I	III	VI	VIII	X
Качественная характеристика ощущения	Едва заметно	Приятно	На границе безразличного и неприятного	Неприятно	Неприятно и болезненно
Значение N	0,3	0,9	1,9	2,4	2,8

Принимая границей комфортности и дискомфортности зрительного ощущения по шкале Холлэдея $N_{к.д} = 1{,}9$, получим путем преобразования уравнения (1-115) следующее выражение для яркости пятна, определяющей границу дискомфорта:

$$B_{к.д} = \frac{178 B_a^{0{,}3}}{\omega^{0{,}25}}. \qquad (1\text{-}116)$$

Уравнение Холлэдея позволяет сделать существенно важный для практики осветительной техники вывод о снижении допус-

* Коэффициент a зависит от выбора единиц яркости:
$a = 0{,}35$ для B_a и B_c, *мсб*;
$a = 2{,}45$ для B_a и B_c, *сб*.

тимого по дискомфорту отношения яркостей светильников и поля адаптации $\frac{B_{к.д}}{B_а}$ по мере увеличения $B_а$.

Практика расчета дискомфорта. Уравнение Холлэдея (1-116) позволяет оценить качество освещения лишь только при наличии одного светящего пятна, расположенного в центре поля зрения наблюдателя. В действительных условиях наблюдатель видит одновременно не один, а несколько светильников, которые, как правило, находятся не в центре, а на периферических участках поля зрения. Исследованию дискомфортного действия светильников, смещенных с линии зрения наблюдателя, а также совокупному действию нескольких светильников было посвящено много работ [Л. 204—216]. Как показали эти исследования, наличие нескольких светильников в поле зрения наблюдателя может вызвать ощущение дискомфорта даже в тех условиях, когда любой из светильников в отдельности дискомфорта не создает.

В. Гаррисон и Ф. Микер [Л. 205, 206], исследовав дискомфортное действие светильника в функции его расположения в поле зрения наблюдателя, телесного угла светильника и соотношения его яркости с яркостью адаптации, установили следующую зависимость:

$$G = c\frac{\omega B_c^a}{\theta^b B_а^d}, \qquad (1\text{-}117)$$

где G — показатель дискомфорта (glare rating);
c — коэффициент, зависящий от выбора единиц яркости (слепящей — B_c и адаптации — $B_а$).

В соответствии с анализом уравнения Холлэдея (1-115) были рекомендованы следующие значения показателей: $a=2$; $b=2$ и $d=0{,}6$. Для практического использования расчетное уравнение (1-117) было заменено Гаррисоном и Микером на (1-118) в предположении оценки качества освещения в условиях яркости окружения светильника, равной яркости адаптации и ориентации линии зрения наблюдателя по горизонту:

$$G = 10^{-4}\omega B_c^2 h^{-2}\varphi_г B_а^{-0{,}6}, \qquad (1\text{-}118)$$

где ω — площадь проекции светильника на плоскость, перпендикулярную направлению к глазу наблюдателя, $м^2$;
h — высота расположения исследуемого светильника над уровнем глаз наблюдателя, $м$;
$\varphi_г$ — показатель расположения светильника в поле зрения.

Согласно (1-118) показатель дискомфорта пропорционален произведению силы света на яркость светильника по направлению к глазу наблюдателя. Величина показателя G, определяемая вероятностью $p_к = 0{,}5$ соответствия исследуемого варианта освещения границе комфорт — дискомфорт, численно равна $G = 55{,}6$. Зависимость вероятности оценки освещения по уровню комфорт—дискомфорт в функции показателя дискомфорта исследуемого варианта освещения по Г. Фраю [Л. 207] представлена кривой $p_к = f(G)$ (рис. 1-133). По этой кривой можно видеть, что практически все наблюдатели оценивают осветительную установку комфортной ($p_к = 0{,}99$) при $G \to 0$, в то время как практически все признают ее дискомфортной ($p_к \leqslant 0{,}01$) при $G \geqslant 500$.

Гаррисон и Микер принимают результирующий показатель дискомфорта в поле нескольких ярких пятен равным сумме показателей, рассчитанных для каждого пятна в отдельности:

$$G_{сум} = \Sigma G_i. \qquad (1\text{-}119)$$



Рис. 1-133.

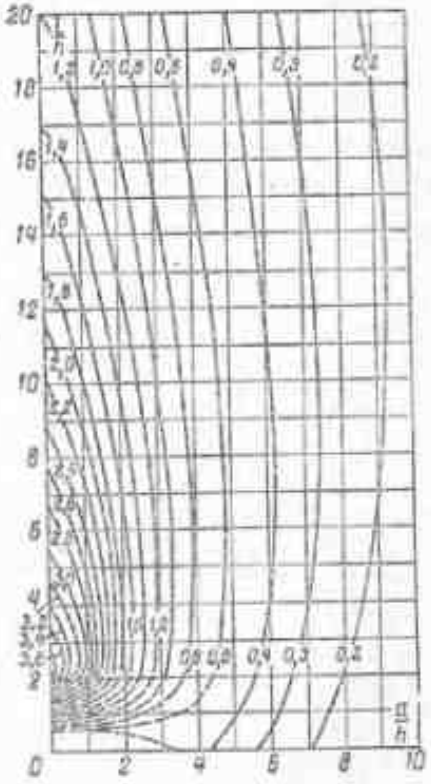


Рис. 1-134.

Показатель расположения светильника в поле зрения наблюдателей $\varphi_г$ Гаррисон и Микер определяют графиком (рис. 1-134) в функции относительных значений смещения светильника от линии зрения по горизонтали $\frac{a}{h}$ и расстояния по направлению линии зрения $\frac{l}{h}$ до плоскости расположения исследуемого светильника (рис. 1-135).

М. Лекиш и С. Гут [Л. 208, 209] исследовали граничные условия комфорт—дискомфорт в адаптационной камере с равномерной яркостью всего поля зрения, на котором появлялись пятна повышенной яркости. Яркость фона адаптационной камеры варьировалась в пределах 3,2—320 $нт$, яркость пятен повышен-

ной яркости — от 80 до 8000 *нт*, их телесный угол 0,0001 — 0,3 *стер*.

Результаты экспериментальных исследований Лекиш и Гут выразили следующим эмпирическим уравнением:

$$M=\frac{B_c}{B_a^{0,44}\varphi_{л.г}(\omega^{-0,21}-1,28)}, \qquad (1\text{-}120)$$

где B_a и B_c — яркости адаптации и слепящих пятен, *нт*;

$\varphi_{л.г}$ — показатель расположения слепящего пятна по Лекишу и Гуту (рис. 1-136).

Статистическая оценка различных вариантов соотношения яркостей B_a и B_c, а также телесного угла светящих пятен позволили Гуту установить величину $M_{к.д}=216$ для границы комфорт—дискомфорт, определяемой с вероятностью $p=0,5$.



Рис. 1-135.

Для определения границы дискомфорта при наличии в поле зрения нескольких светящих пятен, обладающих яркостью B_c, большей яркости поля адаптации B_a, Лекиш и Гут предложили методику расчета, состоящую из трех расчетных операций:

а) Расчет телесного угла, соответствующего границе комфорт—дискомфорт, для каждого светящего пятна. Согласно уравнению (1-120) телесный угол, эквивалентный граничному значению $M_{к.д}=216$, определится как

$$\omega'=\left(\frac{B_c}{216\varphi_{л.г}B_a^{0,44}}+1,28\right)^{-4,76}, \qquad (1\text{-}121)$$

где B_a и B_c — яркость, *нт*.

б) Расчет относительного выражения показателя дискомфорта

$$n=\left(\frac{\omega}{\omega'}\right)^{0,5}, \qquad (1\text{-}122)$$

где ω — телесный угол исследуемого светящего пятна;

ω' — значение угла для того же светящего пятна, соответствующее границе комфорт—дискомфорт [уравнение (1-121)].

в) Расчет показателя *BCD* (bordeline comfort — discomfort):

$$M_{сум}=216\left[\sum\left(\frac{\omega_i}{\omega_i'}\right)^{0,5}\right]^2. \qquad (1\text{-}123)$$

Значение вероятности удовлетворительной оценки освещения по *BCD* можно определить (рис. 1-137) по $M_{сум}$ при помощи кривой $p_к=f(M)$. Освещение принято считать комфортным, если $p_к\geqslant 0,5$, следовательно, если $\left[\sum\left(\frac{\omega_i}{\omega_i'}\right)^{0,5}\right]^2\leqslant 1$ и $M_{сум}\leqslant 216$.

Логан и Ланге [Л. 207 и 210], пользуясь кривыми, построенными в координатных осях $B_c/\varphi=f(\omega)$ для условий оценки качества освещения по границе *BCD* при постоянных значениях яркости адаптации (рис. 1-138), приходят к следующего правилу аддитивности:

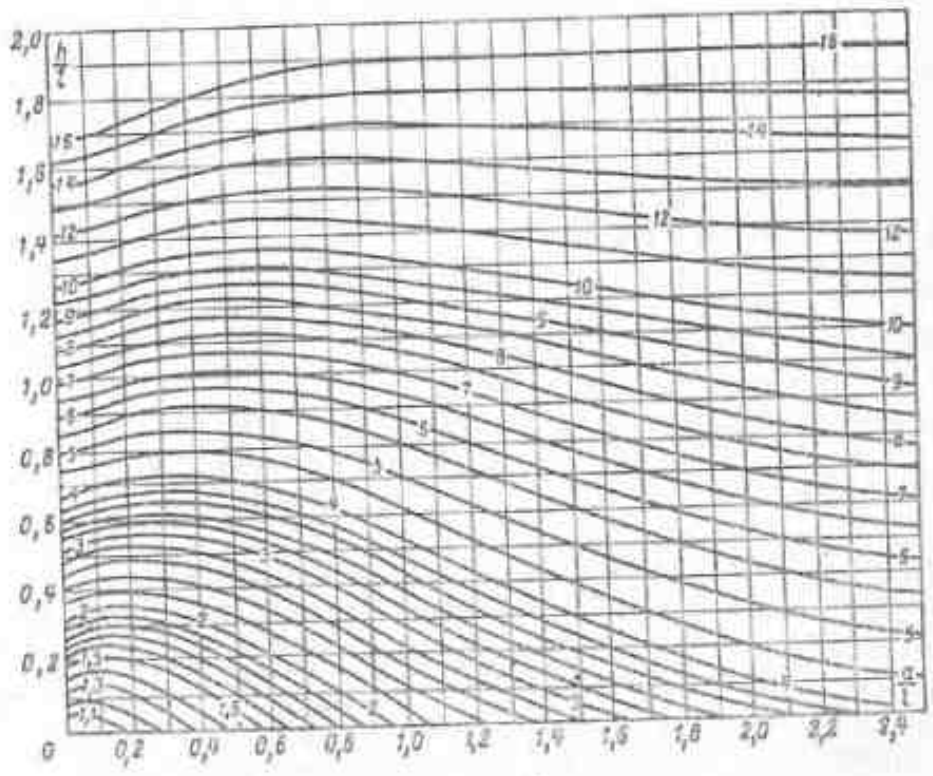


Рис. 1-136.

$$G_{сум}=55,6\sum\frac{\omega_i}{\omega_i'}. \qquad (1\text{-}124)$$

Как показал Фрай [Л. 207], это правило получено из предположения эквивалентности дискомфортного действия двух светильников *1* и *2* (рис. 1-138). и третьего светильника *3*, если обеспечено постоянство P_c/φ при равенстве телесных углов:

$$\omega_3=\omega_1+\omega_2$$

Принимая эквивалентными все возможные варианты B_c/φ и ω, определяемые точками, лежащими на одной кривой $B_a = \text{const}$ (рис. 1-138), можно записать следующие равенства:

$$G_2 = 55{,}6\frac{\omega_3}{\omega_7} = 55{,}6\frac{\omega_4 + \omega_5}{\omega_7} = 55{,}6\left(\frac{\omega_4}{\omega_7} + \frac{\omega_5}{\omega_7}\right) = G_1 + G_2, \quad (1\text{-}124\text{а})$$

где

$$G_1 = 55{,}6\frac{\omega_4}{\omega_8} = G_4;$$

$$G_2 = 55{,}6\frac{\omega_5}{\omega_8} = G_5;$$

так как эквивалентными точками являются *6, 7* и *8*; *1* и *4*, а также *2* и *5*.

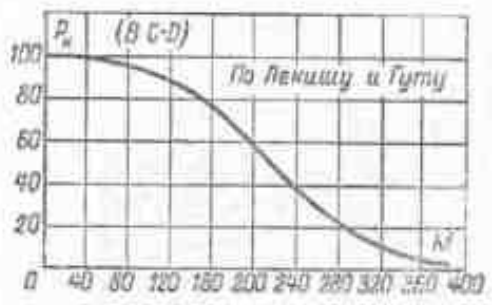


Рис. 1-137.

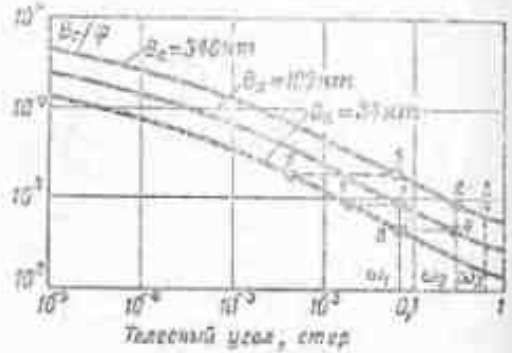


Рис. 1-138.

Р. Гопкинсон [Л. 211, 212] предложил следующую эмпирическую зависимость всех параметров, определяющих показатель дискомфорта,

$$G = \frac{B_c^{1,6}\,\omega^{0,8}}{B_a} f(B_0)\,\varphi(\theta). \quad (1\text{-}125)$$

Зависимость количественного критерия качества освещения от яркости поля окружения B_0 и показателя расположения светящего пятна, вызывающего дискомфорт, определяется согласно (1-125) функциям $f(B_0)$ и $\varphi(\theta)$. Эти функции определяются по Гопкинсону не только их основными аргументами B_0 и θ, но также и другими параметрами осветительной установки, характеризующими ее дискомфортные свойства, в частности ω, B_c и B_a.

Гопкинсон в отличие от других авторов определяет суммарное действие нескольких светильников по аддитивности яркости адаптации, рассчитываемой для каждого светильника из условий обеспечения граничного значения показателя G:

$$G = 55{,}6\frac{\Sigma(B_a)_i}{B_a}, \quad (1\text{-}126)$$

где $(B_a)_1 = \dfrac{(B_c)_1^{1,6}\,\omega^{0,8}}{55{,}6}$ — для первого светильника;

$(B_a)_i = \dfrac{(B_c)_i^{1,6}\,\omega_i^{0,8}}{55{,}6}$ — для i-го светильника.

Д. Вермулен и де-Бур [Л. 213] рекомендуют определять суммарное действие нескольких светильников по аддитивности граничной яркости светящих пятен. При постоянстве яркости адаптации уровень дискомфорта, создаваемый несколькими светильниками, согласно Вермулену и де-Буру определится следующим равенством:

$$G = 55{,}6\frac{B_c}{\Sigma(B_c)_i}, \quad (1\text{-}127)$$

где $(B_c)_i = \dfrac{55{,}6 B_a^{0,75}}{\omega_i^{0,25}}$.

Из (1-121а), (1-125) и (1-127) следует, что условиями эквивалентности по дискомфорту обладают установки, обеспечивающие постоянство следующих отношений:

$$\left.\begin{aligned} &\text{по Фрай} && \frac{\Sigma\omega_i}{\omega} = \text{const};\\ &\text{по Гопкинсону} && \frac{\Sigma(B_a)_i}{B_a} = \text{const};\\ &\text{по Вермулену и де-Буру} && \frac{\Sigma(B_c)_i}{B_c} = \text{const}. \end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}128)$$

Вследствие нелинейной зависимости G от B_c, B_a и ω условия, определяемые уравнениями (1-128), далеко не тождественны, что показывает на недостаточную доработку всех способов учета дискомфорта от нескольких светильников. Вторым вопросом, требующим дополнительного уточнения, является зависимость показателя блескости G от расположения источника дискомфорта в поле зрения наблюдателя. Из всех существующих способов расчета показателя расположения φ наиболее достоверным следует признать способ Лекниша и Гута (рис. 1-136).

Наличие большого числа исследований дискомфорта позволило комитету 3.1.1.2 МКО рекомендовать для практики оценки качества освещения следующую зависимость величин, определяющих показатель дискомфорта:

$$G = c\frac{B_c^{\alpha}\omega^{e}}{B_a^{d}}\varphi(\vartheta, \theta), \quad (1\text{-}129)$$

где показатели $a=1$; $e=0{,}4$ и $d=0{,}6$ и постоянная $c=2{,}2$ при $G_{к.д}=55{,}6$ для $B_c=1\,000$ *нт*; $\omega=0{,}02$ *стер* и $B_a=34{,}2$ *нт*. Показатель расположения светящего пятна $\varphi(\vartheta, \theta)$ МКО рекомендует определять по Лекишу и Гуту (рис. 1-136)

Вполне понятно, что предельно допустимые значения показателя G практически должны определяться условиями зрительной работы. Так, Ф. Микер [Л. 214] рекомендует следующие значения G для производственных условий:

40—100 — производственные помещения;

25—40 — очень точные зрительные операции.

В Чехословацкой Социалистической Республике [Л. 215] регламентированы стандартом следующие значения G:

1. Больницы (в поле зрения лежащих больных) $G \leqslant 10$.

2. Административные помещения, школы, производственные помещения с точной зрительной работой (в поле зрения работающего) $G \leqslant 25$.

3. То же в любом направлении $G \leqslant 70$.

4. Цехи с грубой зрительной работой $G \leqslant 150$.

Комитет по нормам и стандартам общества инженеров-светотехников США рекомендовал [Л. 216] для практики расчета границ дискомфорта метод Лекиша и Гута с модификацией правила аддитивности по Логану и Ланге. Согласно этим рекомендациям, эквивалентный телесный угол каждого светильника, находящегося в поле зрения, рассчитывается при помощи (1-121) или определяется по графикам (рис. 1-138). Расчет суммарного показателя *BCD* осуществляется согласно (1-123):

$$M_{сум}=216\sum\frac{\omega_i}{\omega_i'}, \qquad (1\text{-}130)$$

где ω_i и ω_i' — действительный и эквивалентный телесные углы каждого светильника.

Зрительное утомление. Утомление организма, возникающее в результате производственной деятельности человека, связанной со зрительной работой, принято условно называть *зрительным утомлением*. Зрительное утомление может возникать в результате понижения активности: сетчатой оболочки, глазных мышц и центрального звена зрительного анализатора. Зрительное утомление может сказываться как в снижении зрительной работоспособности, так и в повышении напряженности организма, необходимой для выполнения зрительной работы в условиях утомления.

Характерным примером второй разновидности проявления зрительного утомления могут явиться факты повышения зрительных ошибок при одновременном росте производительности

труда в результате улучшения условий освещенности рабочего места. Так, например, на графиках производительности труда, зрительного утомления и количества ошибок в функции освещенности на рабочем месте (рис. 1-139) отчетливо виден рост утомления и числа ошибок при увеличении освещенности сверх 1 000 *лк* [Л. 217]. Одновременно с этим рост производительности труда не прекращается и при 2 000 *лк*.

Этот пример отчетливо показывает возможность роста утомления за счет дополнительного напряжения организма, возникающего в результате сокращения времени на отдельные зри-

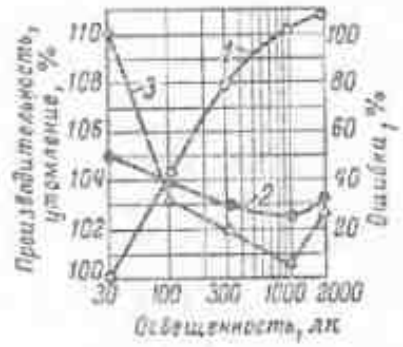


Рис. 1-139.
1 — производительность; *2* — утомление; *3* — ошибки.

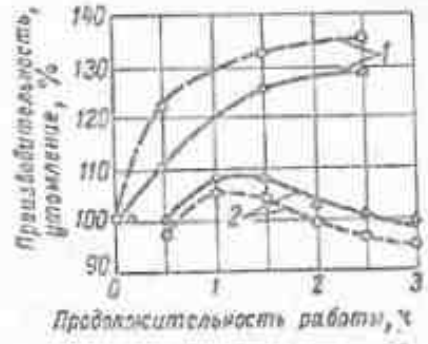


Рис. 1-140.
1 — зрительное утомление; *2* — производительность труда.

тельные операции. Изменение условий освещения, в частности улучшение качества распределения яркости в пространстве, а также спектрального распределения излучения может привести к снятию дополнительного напряжения и дальнейшему снижению утомления и повышению точности выполнения зрительных операций. Оптимальная по показателям зрительного утомления и точности выполнения зрительной работы освещенность 1 000 *лк* характерна лишь для исследуемой зрительной работы[1] и исследуемых качественных показателей освещения. Для других видов зрительной работы и других условий освещения эта цифра может значительно меняться, причем чем труднее зрительная работа, тем выше значение оптимальной освещенности.

Исследование зрительного утомления и производительности труда в процессе работы, как правило, показывает постепенное (в начале более быстрое, а в последующем затухающее) нарастание зрительного утомления (рис. 1-140) и рост производительности в течение первых 1—1,5 *ч* работы с последую-

[1] Исследуемая зрительная работа (достаточно грубая $\alpha \approx 17'$) заключалась в нанизывании на проволоку Ø 1,3 *мм* разноцветных шариков Ø 5 *мм* и кубиков (размер ребра 6,5 *мм*) с отверстием Ø 1,5 *мм*.

щим падением до некоторого устанавливающегося постоянного ее значения. Понижение работоспособности, возникающее в процессе напряженной зрительной работы, может обнаруживаться в световоспринимающем и мышечном двигательном аппаратах глаза, а также на центральных участках зрительного анализатора.

Попытки исследования зрительного утомления путем измерения контрастной чувствительности и остроты различения в процессе зрительной работы не привели к желательным результатам [Л. 218—220]. Постоянство значений этих функций зрения в течение напряженной зрительной работы следует объяснить двумя причинами:

а) зависимостью чувствительности сетчатки в основном от концентрации молекул фотореагентов, определяемой адаптацией, которая неизменна в течение работы;

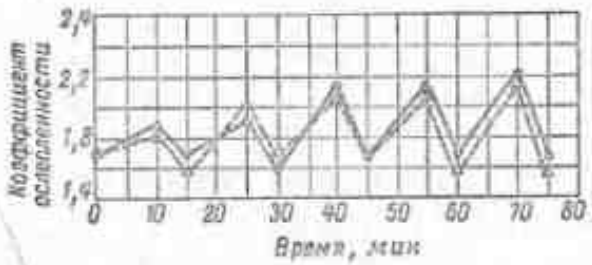


Рис. 1-141.

б) возможностью кратковременного сосредоточения внимания в момент измерения чувствительности глаза, что приводит к значительной компенсации снижения лабильности функций центрального звена анализатора.

Указанные причины позволяют сделать вывод о бесперспективности исследования зрительного утомления методами мгновенных измерений функций зрения. Некоторое исключение из этого общего правила составляет быстрота различения, в формировании которой большую роль играет инерционность зрительного анализатора, в значительной мере определяемая лабильностью центров. Вторым исключением является измерение функций при одновременном индуктивном действии побочного адэкватного или неадэкватного раздражителей. Как показали наши исследования [Л. 220], коэффициент ослепленности увеличивается в процессе зрительной работы за счет увеличения индуктивного действия слепящего источника в результате роста зрительного утомления. Ход изменения коэффициента ослепленности в процессе прерывистой зрительной работы (рис. 1-141) показывает увеличение слепящего действия к концу каждого 10-минутного интервала работы и снижение — к концу 5-минутного перерыва. Рост коэффициента ослепленности за счет увеличения эффекта индуктивного действия слепящего источника следует объяснить также понижением чувствительности и лабильности функций центрального звена анализатора в результате утомления.

Непосредственный контроль чувствительности и лабильности центрального звена при зрительном утомлении возможен при помощи измерения электрической чувствительности зрительного анализатора, потенциала коры головного мозга и критической частоты фосфена. Изменение состояния центрального звена анализатора в результате утомления зрительной работой можно также характеризовать динамикой изменения критической частоты мелькания, измеряемой до и после работы. За последние годы для этой же цели стали применять измерение порогов, не адэкватных свету анализаторов, например порога слышимости [Л. 217].

Как показали исследования С. В. Кравкова [Л. 3], электрическая чувствительность снижается на 30% в результате 2-часовой зрительной работы средней напряженности. Результаты этих исследований показали также, что электрическая чувствительность снижается в процессе работы тем больше, чем сильнее выражено в зрительной работе участие двигательного аппарата глаза, обеспечивающего конвергенцию, аккомодацию и зрачковый рефлекс.

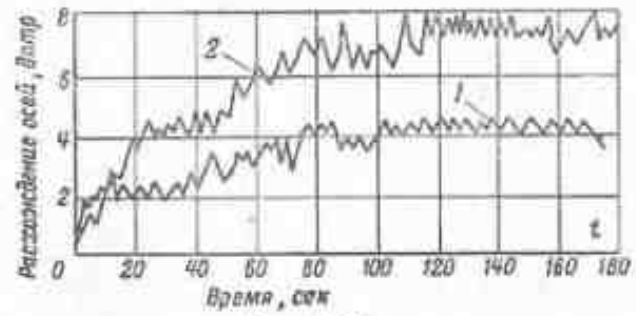


Рис. 1-142.
1—до работы; *2*—после работы.

Непосредственный контроль утомления двигательного аппарата глаза осуществляется путем измерения устойчивости мышечного баланса глаза. Эти измерения производятся при помощи форометра, позволяющего определять нарушение мышечного баланса в результате несведения главных осей после зрительной работы. Несведение осей определяется нарушением мышечного баланса, выраженным в диоптриях. Исследования Д. А. Зильбера и Я. И. Трумпайца [Л. 221] показали, что наиболее точным критерием мышечного зрительного утомления является картина динамики изменения расхождения глазных осей, фиксируемая в течение 3 *мин* до и после работы (рис. 1-142).

Для контроля утомления двигательного аппарата глаза напряженной зрительной работой можно с успехом применить метод записи непроизвольных движений глаза, амплитуда и частота которых существенно меняются при утомлении.

Комплексным методом исследования зрительного утомления является изменение *устойчивости ясного видения*[1] [Л. 201]. Этот метод основан на непрерывном 3-минутном различении кольца Ландольта, размер разрыва которого близок к пороговому. Часть времени наблюдатель отчетливо различает направление его разрыва, некоторую же часть времени тест-объект «расплывается» и становится неразличимым. Отноше-

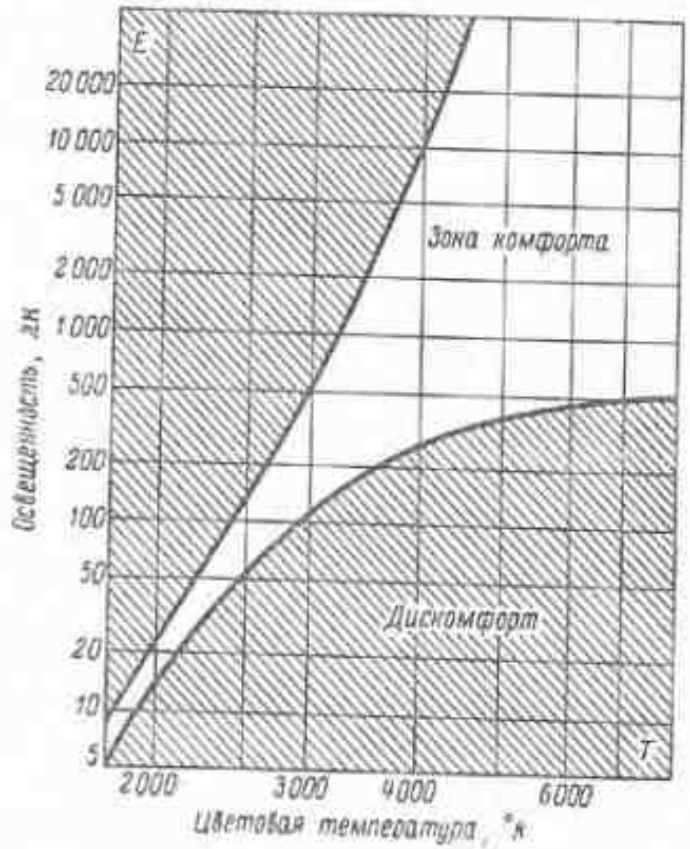


Рис. 1-143.

ние времени четкого различения разрыва кольца к полному времени его наблюдения и является устойчивостью ясного видения. Результаты исследований Ферри и Рэнд и других авторов показали, что устойчивость ясного видения уменьшается по мере роста зрительного утомления.

Как показали исследования, зрительное утомление зависит не только от распределения яркости в поле зрения и от спектрального распределения излучения, но также и от уровня яркости рабочей поверхности. Исследования качественных характеристик освещения показывают также, что зрительное утомле-

[1] Этот метод правильнее называть *устойчивостью четкого различения*.

ние возрастает по мере увеличения времени пребывания в условиях дискомфортного освещения.

Дискомфортные условия могут возникнуть не только в результате наличия ярких пятен в поле зрения наблюдателя, но также и в результате недостаточной яркости поля зрения. Как показали исследования Крюйтхоффа [Л. 222], уровень освещенности на светлой поверхности $\rho = 0{,}7$, определяющий границу дискомфорта, повышается по мере увеличения цветовой температуры источников белого цвета (рис. 1-143). Из графика $E = f(T_ц)$ можно видеть, что нижний дискомфортный уровень освещенности для ламп накаливания не превышает 50—100 *лк*, в то время как для люминесцентных ламп БС и ДС он повышается до 300—500 *лк*.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О ЦВЕТЕ

«Точная наука о цветах относится к труднейшим из тех, кои желательны были бы философу. Я надеюсь на этом примере показать, что значит математика в натуральной философии, и побудить геометров ближе подойти к исследованию природы, а жадных до естественной науки сначала выучиться геометрии, чтобы первые не тратили все время на рассуждения, бесполезные для жизни человеческой...»

И. НЬЮТОН

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2-1. Цвет и его компоненты

КЗС-компоненты цвета. В соответствии с принятым определением (§ 1-10) цвет следует рассматривать как некоторую трехмерную величину, характеризующую излучение по количественному и качественному показателям его действия на средний глаз. Из ранее изложенного также следует, что количественная характеристика действия излучения на средний глаз однозначно определяется яркостью, а качественная, называемая цветностью излучения, — соотношением уровней возбуждения трех *кзс*-приемников среднего глаза.

Оценивая уровни возбуждения каждого из *кзс*-приемников соответственной эффективной величиной исследуемого излучения (§ 1-10), напишем выражения компонентов цвета [Л. 83]:

$$\Phi_К = K\int b(\lambda)\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda;\quad \Phi_З = З\int b(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda;\quad \Phi_С = C\int b(\lambda)\bar{c}(\lambda)\,d\lambda \qquad (2\text{-}1)$$

и

$$\Phi \equiv \Phi_К + \Phi_З + \Phi_С, \qquad (2\text{-}2)$$

где Φ, $\Phi_К$, $\Phi_З$, $\Phi_С$ — цвет излучения, характеризуемого функцией спектральной интенсивности яркости $b(\lambda)$, и его *КЗС*-компоненты;

$\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{з}(\lambda)$, $\bar{c}(\lambda)$ — функции относительной спектральной чувствительности *кзс*-приемников среднего глаза;

$К$, $З$, $С$ — единичные значения компонентов цвета, определяемые единичными значениями уровней возбуждения *кзс*-приемников среднего излучения.

Яркостные (количественные) выражения каждого компонента цвета можно рассматривать как составляющие (доли) яркости исследуемого излучения:

$$B = B_К + B_З + B_С. \qquad (2\text{-}2а)$$

Согласно уравнениям (1-65) и (2-1) *КЗС*-составляющие яркости определятся:

$$\left.\begin{aligned} B_К &= \psi L_К \int b(\lambda)\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda;\\ B_З &= \psi L_З \int b(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda;\\ B_С &= \psi L_С \int b(\lambda)\bar{c}(\lambda)\,d\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}1а)$$

где $L_К$, $L_З$, $L_С$ — относительные яркостные выражения единичных компонентов цвета;

ψ — переводной коэффициент, численно равный максимальному значению световой отдачи излучения (для практической системы световых единиц $\psi = 683$ *лм·вт*$^{-1}$).

Различие уравнений (2-1) и (2-1а) заключается в том, что компоненты цвета, являясь эффективными величинами, определяющими уровни действия излучения на три различных приемника, качественно неодинаковы, в то время как составляющие яркости могут отличаться друг от друга лишь только по величине. Следовательно, *КЗС*-составляющие яркости являются величинами, количественно характеризующими *КЗС*-компоненты цвета.

Из сопоставления (2-1а) и (1-66) можно написать следующие зависимости, определяющие связь между абсолютными и относительными значениями спектральной чувствительности *кзс*-приемников среднего глаза:

$$g_к(\lambda) = \psi L_К \bar{\kappa}(\lambda);\quad g_з(\lambda) = \psi L_З \bar{з}(\lambda);\quad g_с(\lambda) = \psi L_С \bar{c}(\lambda). \qquad (2\text{-}1б)$$

Согласно определению среднего глаза (§ 1-10) значения спектральной чувствительности каждого из трех его приемников $\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{з}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ зависят только от длины волны, следовательно, функции спектральной чувствительности $\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{з}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ не зависят от соотношения уровней возбуждения каждого приемника. Эта особенность спектральной характеристики среднего глаза отличает его от зрительного анализатора, у которого уровни чувствительности рецепторов при неизменности ее относительных спектральных значений определяются соотноше-

нием уровней предшествующего возбуждения каждого рецептора, а также долей участия палочкового аппарата в зрительном процессе. Неизменность формы кривых спектральной чувствительности *кзс*-рецепторов зрительного анализатора при любых уровнях их возбуждения определяется неизменностью оптических свойств молекул *кзс*-фотореагентов.

Уравнение (2-2а), определяющее уровень реакции среднего глаза как сумму реакции трех его приемников, позволяет предполагать наличие линейной зависимости между значениями относительной видности излучения K_λ и относительных чувствительностей *кзс*-приемников. Эту зависимость можно получить, написав уравнение (2-2а) в развернутом виде для цвета произвольно выбранного однородного излучения с длиной волны λ:

$$B_\lambda = 683\,(\bar{\kappa}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{K} + \bar{з}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{З} + \bar{c}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{C}), \qquad (2\text{-}2б)$$

так как для любого однородного излучения яркостные выражения единичных компонентов цвета определяются в соответствии с (2-1а) следующими равенствами:

$$B_\mathrm{K} = 683\bar{\kappa}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{K};\ B_\mathrm{З} = 683\bar{з}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{З} \text{ и } B_\mathrm{C} = 683\bar{c}_\lambda \mathrm{B}_\lambda L_\mathrm{C}.$$

Написав уравнения цвета однородного излучения с лучистой яркостью $\mathrm{B}_\lambda = 1$ *вт·м*$^{-2}$*·стер*$^{-1}$, получим искомую зависимость:

$$K_\lambda = \bar{\kappa}_\lambda L_\mathrm{K} + \bar{з}_\lambda L_\mathrm{З} + \bar{c}_\lambda L_\mathrm{C}, \qquad (2\text{-}3)$$

где K_λ — значение относительной видности однородного излучения с длиной волны λ.

Из определения цвета следует, что колориметрическое сопоставление (§ 1-12) двух излучений основано на сравнении их по условиям зрительного тождества, определяемого равенствами уравнений возбуждения каждого из трех *кзс*-приемников среднего глаза. Следовательно, тождественность двух излучений по цвету можно записать следующими равенствами [Л. 84, гл. 1]:

$$\left.\begin{aligned} \int b_1(\lambda)\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\,\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{c}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\,\bar{c}(\lambda)\,d\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}4)$$

где $b_1(\lambda)$ и $b_2(\lambda)$ — функции спектральной интенсивности яркости излучений полей сравнения.

Условия тождественности излучения по цвету, записанные системой (2-4), позволяют сформулировать основные правила одноцветности сравниваемых излучений:

а) два поля сравнений одинаковой цветности остаются одноцветными при неизменности спектральных составов излучений, заполняющих поля, и любом одинаковом изменении их яркости в диапазоне дневного зрения;

б) поля сравнения могут оставаться одноцветными и при изменении спектрального состава излучения одного из полей, если излучение с новым спектральным составом обеспечивает прежние значения *КЗС*-компонентов цвета.

Из (2-4) и вытекающих из него правил одноцветности излучений следует, что заданный спектральный состав излучения однозначно определяет его цветность, в то время как заданной цветности может соответствовать множество различных спектральных составов.

В соответствии с (2-4) и сформулированными правилами условия одноцветности разноярких излучений можно записать следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \int b_1(\lambda)\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\,\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda); \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{c}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\,\bar{c}(\lambda)\,d\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}4а)$$

где $a = \frac{B_1}{B_2}$ — безразмерный коэффициент, определяющий отношение яркостей B_1 и B_2 сравниваемых одноцветных излучений.

Система (2-4) определяет работу среднего глаза в условиях колориметрического сравнения излучений как нулевого измерительного прибора, фиксирующего тождественность измеряемых величин. Как и любой нулевой прибор, средний глаз человека, обладая конечным значением цветоразличительной чувствительности, устанавливает зрительное тождество полей сравнения приближенно. Приближенность установки зрительного тождества по сравнению с его теоретическим значением, определяемым (2-4), можно характеризовать средним статистическим значением отклонений зрительного тождества от его теоретического значения.

Средние статистические значения различий зрительного (практического) тождества от теоретического в условиях колориметрического сопоставления равноярких полей сравнения определяют *пороги цветоразличения*. Из этого следует, что пороги цветоразличения определяются погрешностью среднего глаза, работающего в режиме нулевого измерительного прибора — в режиме установления колориметрического тождества. Из этого следует также, что индивидуальные пороги цветоразличения определяются погрешностью зрительного анализатора наблюдателя, устанавливающего с заданной достоверностью различия цветности оптически смежных полей сравнения.

Для количественной оценки порогов цветоразличения или сверхпорогового различия сравниваемых цветов, так же как и для решения многих других инженерных вопросов колориметрии, необходимо иметь техническую систему обозначения и количественного выражения цвета любого излучения. В основу построения такой цветовой системы можно положить *КЗС*-компоненты цвета, характеризующие уровни возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза.

Цветовые уравнения. При построении системы количественного выражения цвета уравнение тождества цвета и трех его компонентов (2-2) удобнее записывать в единицах, количественно различных для каждого компонента:

$$\Phi \equiv \frac{\Phi_К}{К} К + \frac{\Phi_З}{З} З + \frac{\Phi_С}{С} С, \qquad (2\text{-}4б)$$

где $К$, $З$ и $С$ — единичные значения *КЗС*-компонентов цвета. Обозначив число единиц каждого компонента цвета через $к'$, $з'$ и $с'$, получим новый вид цветового тождества исследуемого цвета и его *КЗС*-компонентов:

$$\Phi \equiv к'К + з'З + с'С. \qquad (2\text{-}5)$$

Из сопоставления (2-1), (2-2) и (2-5) следует:

$$\left.\begin{aligned} к' &= \int b(\lambda)\,\bar{к}(\lambda)\,d\lambda; \\ з' &= \int b(\lambda)\,\bar{з}(\lambda)\,d\lambda; \\ с' &= \int b(\lambda)\,\bar{с}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}6)$$

Вследствие одинаковой размерности компонентов цвета и их единичных значений величины $к' = \frac{\Phi_К}{К}$; $з' = \frac{\Phi_З}{З}$ и $с' = \frac{\Phi_С}{С}$ являются безразмерными коэффициентами. Эти безразмерные *коэффициенты цвета* характеризуют уровни возбуждения каждого из *кзс*-приемников среднего глаза в единицах, различных для каждого компонента цвета. Учитывая, что коэффициенты цвета $к'$, $з'$ и $с'$ определяют уровни возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза, цветовую систему *КЗС* принято называть *физиологической цветовой системой* [Л. 1].

Уравнение, определяющее тождество цвета и его компонентов, выраженных количеством единичных значений каждого компонента, принято называть *цветовым уравнением*. Из этого определения следует, что цветовое уравнение (2-5) определяет качественное и количественное соотношение (тождество) цвета исследуемого излучения и трех его компонентов.

Цветовое уравнение, написанное для исследуемого излучения, характеризует однозначно его цвет, следовательно, его

яркость, определяемую (2-1а) и (2-2а), и цветность. Как известно (§ 1-10), цветность излучения определяется соотношением уровней реакции трех *кзс*-приемников среднего глаза. Следовательно, цветность однозначно оценивается любой парой из трех отношений каждого коэффициента цвета к сумме всех трех коэффициентов этого же цвета:

$$к = \frac{к'}{к'+з'+с'}; \quad з = \frac{з'}{к'+з'+с'}; \quad с = \frac{с'}{к'+з'+с'}, \qquad (2\text{-}7)$$

где $к$, $з$, $с$ — *трехцветные коэффициенты* в системе *КЗС*.

Необходимость и достаточность для характеристики цветности любых двух коэффициентов из трех определяются тем, что их сумма для любого излучения равна единице, следовательно, лишь два из трех являются независимыми:

$$к + з + с = 1. \qquad (2\text{-}8)$$

Из этого следует, что цветность является двухмерной величиной, однозначно определяемой любой парой трехцветных коэффициентов.

Цветность излучения однозначно определяют также отношения двух любых коэффициентов цвета к третьему:

$$\alpha = \frac{к'}{з'} \text{ и } \beta = \frac{с'}{з'}. \qquad (2\text{-}9)$$

Из (2-8) и (2-9) можно видеть:

$$к = \frac{\alpha}{1+\alpha+\beta};$$

$$з = \frac{\beta}{1+\alpha+\beta} \text{ и } с = \frac{1}{1+\alpha+\beta}. \qquad (2\text{-}10)$$

Широкое использование системы количественного выражения цвета через его *КЗС*-компоненты затруднено отсутствием точных данных о средних значениях функций спектральной чувствительности *кзс*-рецепторов зрительного анализатора человека (§ 2-8).

Для устранения указанной трудности в практике колориметрии принято *КЗС*-компоненты заменять тремя исходными цветами *колориметрической системы*. Колориметрической системой принято называть систему количественного выражения любого исследуемого цвета тремя цветами, качественно постоянными для данной системы. Возможность выразить любой исследуемый цвет тремя цветами определяется трехкомпонентностью цветового зрения и подтверждается результатами исследований Д. К. Максвелла по смешению цветов (§ 1-10). Согласно этим исследованиям любой цвет можно выразить через три цвета си-

стемы, взятые в таких количествах m', n' и p', которые обеспечивают цветовое тождество

$$\Phi \equiv \Phi_M + \Phi_N + \Phi_P \qquad (2\text{-}11)$$

или

$$\Phi \equiv m'M + n'N + p'P, \qquad (2\text{-}12)$$

где Φ_M, Φ_N и Φ_P — MNP-компоненты цвета исследуемого излучения;

$m' = \frac{\Phi_M}{M}$; $n' = \frac{\Phi_N}{N}$; $p' = \frac{\Phi_P}{P}$ — коэффициенты цвета колориметрической системы MNP;

M, N и P — единичные значения исходных цветов, называемые *основными цветами системы*[1].

Цветность исследуемого излучения в системе MNP с произвольно выбранными основными цветами MN и P определится в соответствии с уравнениями (2-7) также любыми двумя трехцветными коэффициентами:

$$m = \frac{m'}{m' + n' + p'}; \; n = \frac{n'}{m' + n' + p'}; \; p = \frac{p'}{m' + n' + p'}, \qquad (2\text{-}7а)$$

так как для любого излучения сумма всех трехцветных коэффициентов равна единице:

$$m + n + p = 1. \qquad (2\text{-}8а)$$

Это позволяет сделать вывод о двухмерности цветности в любой колориметрической системе.

Результаты исследования Максвелла (§ 1-10) показывают, что один, а иногда и два из трех компонентов исследуемого цвета могут быть отрицательными. Отрицательный компонент цвета характеризует (§ 1-10) возможность получения зрительного тождества полей сравнения, одно из которых заполнено исследуемым цветом в смеси с его отрицательным компонентом, а второе — смесью двух положительных компонентов цвета. Следовательно, цветовое уравнение в трехцветной колориметрической системе необходимо рассматривать в общем случае как некоторое выражение исследуемого цвета через три основных цвета, взятых в определенных количествах m', n' и p', обеспечивающих тождество исследуемого цвета и трех его MNP-компонентов. Из сказанного следует также, что цветовое уравнение (2-12), представляющее исследуемый цвет алгебраической суммой трех его MNP-компонентов, нельзя в общем виде рассматривать как оптическую смесь трех исходных цветов, зрительно тождественную исследуемому цвету.

[1] Согласно решению XIII сессии Международной комиссии по освещению (МКО) основные цвета системы принято обозначать прописными буквами, заключенными в скобки (M), (N) и (P), а коэффициенты цвета — теми же буквами без скобок M, N и P. Следовательно, цветовое уравнение в обозначениях МКО для системы MNP будет иметь следующий вид:

$$\Phi \equiv M(M) + N(N) + P(P).$$

Вследствие того, что цветовые уравнения исследуемого цвета, записанные с помощью любой тройки основных цветов, математически выражают зрительные тождества, любое такое уравнение должно иметь линейную связь с цветовым уравнением физиологической системы (2-5), определяющим цвет уровнями возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза. Для доказательства этого достаточно очевидного положения возьмем три произвольно выбранных основных цвета M, N, P и запишем цветовые уравнения (2-5) каждого компонента исследуемого цвета Φ в физиологической системе:

$$\left.\begin{aligned} \Phi_M &\equiv \kappa'_M K + з'_M З + с'_M C; \\ \Phi_N &\equiv \kappa'_N K + з'_N З + с'_N C; \\ \Phi_P &\equiv \kappa'_P K + з'_P З + с'_P C. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}13)$$

Сопоставляя полученную систему цветовых уравнений, написанных для MNP-компонентов исследуемого цвета, с цветовым уравнением (2-5) этого же цвета в физиологической системе, получим уравнения, подтверждающие предположение о линейной связи любой колориметрической системы с физиологической цветовой системой:

$$\left.\begin{aligned} \kappa' &= \kappa'_M + \kappa'_N + \kappa'_P; \\ з' &= з'_M + з'_N + з'_P; \\ с' &= с'_M + с'_N + с'_P. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}13а)$$

Эти уравнения подтверждают возможность построения такой MNP-системы обозначения цвета, в которой компонентами являются некоторые три исходных цвета Φ_M, Φ_N и Φ_P. Возможность однозначного выражения любого цвета в системе трех произвольно выбранных основных цветов M, N и P определяется однозначным выражением каждого основного цвета этой системы тремя уровнями возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза, характеризуемыми тремя коэффициентами цвета физиологической системы: κ'_M, $з'_M$ и $с'_M$ — для цвета M; κ'_N, $з'_N$ и $с'_N$ — для N и κ'_P, $з'_P$ и $с'_P$ — для P.

Наличие линейной однозначной связи любой колориметрической системы с физиологической цветовой системой позволяет условно рассматривать последнюю как одну из множества воз-

можных колориметрических систем. При таком рассмотрении *КЗС*-системы единичные уровни возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза K, $З$ и C следует рассматривать в качестве основных цветов колориметрической системы *КЗС*. Преимущество колориметрической системы, построенной на трех основных цветах M, N и P, выбранных с достаточной степенью произвольности (§ 2-4), заключается в возможности качественной и количественной оценок цвета любого излучения без точного знания функций спектральной чувствительности трех *кзс*-приемников среднего глаза. Трехцветная колориметрическая система позволяет определять коэффициенты исследуемого цвета m', n' и p', пользуясь экспериментально установленными законами смешения цветов (§ 1-10 и 2-4). Как будет показано далее (§ 2-7), удовлетворение некоторых условий при выборе основных цветов колориметрической системы позволяет значительно упростить цветовые расчеты (§ 2-13), что является также несомненным преимуществом систем с произвольно выбранными основными цветами.

2-2. Цветовое пространство

Вектор цвета. Вследствие трехкомпонентности цветового зрения полная характеристика цвета определяется тремя числами. Этими числами, как известно, могут являться три коэффициента цвета m', n' и p' или $к'$, $з'$ и c'. Необходимость и достаточность трех чисел для полной характеристики цвета позволяет его рассматривать как вектор в трехмерном пространстве, так как любую величину, требующую для полной характеристики i чисел, принято называть векторной величиной в i-мерном пространстве [Л. 2].

Вектор цвета любого исследуемого излучения можно выразить цветовым уравнением, написанным в векторной форме, приняв основные цвета MNP за единичные векторы $\vec{M}$, $\vec{N}$ и $\vec{P}$ *основных цветов* системы:

$$\vec{\Phi} = m'\vec{M} + n'\vec{N} + p'P. \qquad (2\text{-}14)$$

В соответствии с (2-14) единичные векторы основных цветов следует направлять по координатным осям трехмерного пространства, в котором расположено все многообразие векторов цвета (рис. 2-1). В этом случае коэффициенты цвета m', n' и p' будут определять проекции вектора цвета Φ на координатные оси цветового пространства. Начало всех векторов цвета расположено в общей точке 0, являющейся началом системы координат *цветового пространства*. Направление координатных осей цветового пространства можно выбирать для любой цветовой системы произвольно, вследствие чего удобнее принимать любую цветовую координатную систему прямоугольной.

Вследствие того, что все векторы цвета имеют общее начало, их можно рассматривать как радиус-векторы точек, каждая из которых будет однозначно определять цвет. При такой интерпретации цветового пространства каждой его точке будут соответствовать определенные значения яркости и цветности. Координаты каждой точки цветового пространства, численно равные коэффициентам цвета, можно рассматривать как *координаты цвета*. Следовательно, координаты цвета m', n' и p' численно

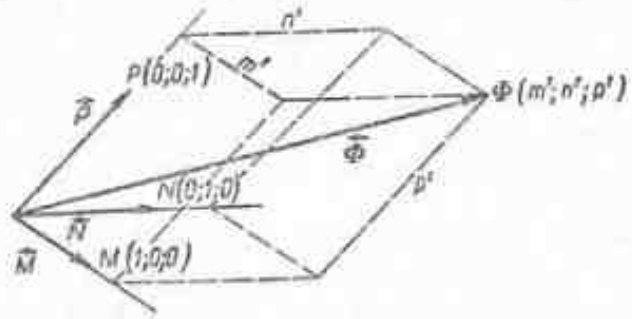


Рис. 2-1.

равны проекциям вектора цвета на координатные оси системы MNP. Из этого следует, что все векторы цветов, обладающих одинаковой цветностью, имеют одинаковое направление в цветовом пространстве, так как одинаковым соотношениям координат цвета, следовательно, одинаковым трехцветным коэффициентам, соответствует единственно возможное направление в пространстве данной цветовой системы.

В соответствии с (2-3), написанным в системе *КЗС* для яркости цвета любого однородного излучения с единичной лучистой яркостью $B_\lambda = 1$ *вт·м⁻²·стер⁻¹*, можно написать аналогичное уравнение в системе произвольно выбранных основных цветов MNP:

$$K_\lambda = \bar{m}_\lambda L_M + \bar{n}_\lambda L_N + \bar{p}_\lambda L_P, \qquad (2\text{-}14а)$$

где L_M, L_N и L_P — относительные яркостные выражения основных цветов $\vec{M}$, $\vec{N}$ и $\vec{P}$.

Из (2-14а) следует, что значения $\bar{m}_\lambda$, $\bar{n}_\lambda$ и $\bar{p}_\lambda$ можно рассматривать как *удельные координаты цвета* однородного излучения, численно равные координатам цвета однородного излучения с длиной волны λ и лучистой яркостью $B_\lambda = 1$ *вт·м⁻²·стер⁻¹*. Сравнение (2-3) и (2-14а) позволяет сделать вывод о возможности рассматривать относительные значения спектральной чувствительности *кзс*-приемников среднего глаза $\bar{к}_\lambda$, $\bar{з}_\lambda$ и $\bar{c}_\lambda$ как удельные координаты цвета однородного излучения в системе *КЗС*.

Соответствие каждой точки цветового пространства вполне определенному цвету заставляет предполагать наличие в цветовом пространстве точки нулевой яркости — точки черного цвета. Вполне понятно, что эта точка соответствует началу координат цветового пространства для любой колориметрической системы, следовательно, точка черного цвета является общей для всех колориметрических систем.

Пространство реальных цветов. Из начала координат колориметрической системы выходит множество векторов цвета, каждому из которых соответствует вполне определенная цветность, определяемая направлением вектора исследуемого цвета в цветовом пространстве. Один из множества этих векторов — вектор белого цвета равноинтенсивного излучения представляет особый интерес с точки зрения выбора основных цветов системы.

Для обеспечения достаточно равномерного расположения векторов цвета различной цветности желательно, чтобы вектор белого цвета располагался по направлению оси пучка всевозможных векторов цвета. Это условие формулируется требованием равноудаленности вектора белого цвета равноинтенсивного излучения от векторов основных цветов системы, следовательно, от ее координатных осей. Нетрудно видеть, что равноудаленность вектора цвета от координатных осей цветового пространства определяется равенством всех трех координат белого цвета:

$$\Phi_E \equiv m'_E M + n'_E N + p'_E P$$

или

$$\Phi_E \equiv \kappa'_E K + з'_E З + c'_E C,$$

где

$$\left.\begin{aligned} m'_E &= n'_E = p'_E; \\ \kappa'_E &= з'_E = c'_E \end{aligned}\right\}$$ —координаты цвета Φ_E в системах MNP и $KЗC$.

Трехцветные коэффициенты белого цвета равноинтенсивного излучения также равны друг другу, следовательно, каждый из них равен одной трети:

$$m_E = n_E = p_E = 0{,}3(3);$$

$$\kappa_E = з_E = c_E = 0{,}3\,(3).$$

Наиболее удаленными от вектора белого цвета являются векторы цветов однородных излучений. Наибольшая удаленность цветов однородных излучений от вектора белого цвета определяется их наибольшей чистотой (§ 1-10). Вследствие того, что каждый *реальный цвет* — цвет излучения, существующего в природе,

можно воспроизвести (§ 1-10) смешением белого и однородного, одинакового цветового тона с исследуемым цветом, векторы реальных цветов располагаются в цветовом пространстве между векторами белого и соответствующего по тону однородного цвета. Это свойство позволяет сформулировать общее правило для всех без исключения колориметрических систем: векторы всех реальных цветов расположены в пределах части цветового пространства, ограниченной конической поверхностью (рис. 2-2), образующими которой являются векторы цветов однородных излучений и чистых пурпурных цветов (смесь фиолетового $\lambda=0{,}4$ *мк* и красного $\lambda=0{,}68$ *мк*). Таким образом, совокупность направлений множества векторов реальных цветов представляет собой пучок прямых, ограниченный телесным углом, значительно меньшим 2π, имеющим вершину в точке черного цвета. Совокупность направлений векторов реальных цветов, определяющую *пространство реальных цветов*, принято называть *конусом реальных цветов*[1] (рис. 2-2).

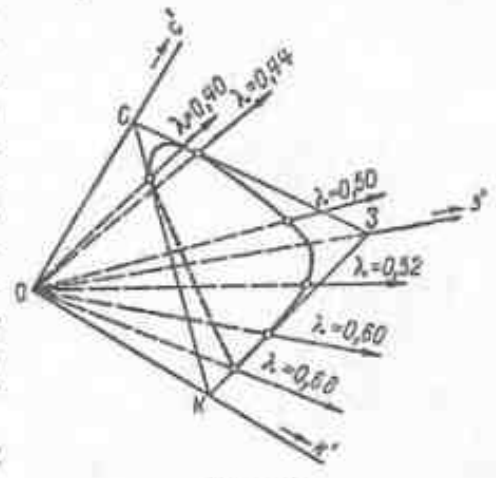


Рис. 2-2.

Все цвета, векторы которых лежат вне конуса реальных цветов, не существуют в природе, вследствие чего их принято называть *нереальными цветами*. Нереальность этих цветов определяется тем, что никаким спектральным составом излучения невозможно обеспечить такое соотношение уровней возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза, которое соответствует координатам любого нереального цвета. Следовательно, нереальные цвета являются математической условностью. Понятие о нереальных цветах необходимо для выбора таких основных цветов колориметрической системы, при которых любой реальный цвет характеризуется положительными значениями координат цвета. Для доказательства этого положения рассмотрим сечение пучка векторов цвета плоскостью (рис. 2-2).

Диаграмма цветности. Одной из характерных плоскостей цветового пространства является *плоскость единичных цветов*. Под понятием «единичный цвет» в колориметрии принято считать любой цвет, сумма координат которого равна единице. Цветовое уравнение любого единичного цвета можно записать в следующем виде:

$$\Phi^0 \equiv \kappa K + з З + c C \qquad (2\text{-}15)$$

[1] Э. Шредингер [Л. 3] назвал телесный угол цветового пространства фулликом реальных цветов (reele Farbdütte).

или

$$\Phi^\circ \equiv mM + nN + pP. \qquad (2\text{-}15а)$$

Равенство координат любого единичного цвета соответствующим трехцветным коэффициентам определяется тем, что сумма координат любого единичного цвета равна единице по определению. Из (2-15) и (2-15а) следует, что каждый из трех основных цветов любой колориметрической системы является единичным цветом.

Условия соответствия геометрического места точек концов векторов единичных цветов плоскости следует из общего уравнения плоскости в отрезках координат

$$\frac{m'}{a_m} + \frac{n'}{a_n} + \frac{p'}{a_p} = 1, \qquad (2\text{-}16)$$

где m', n', p' — текущие координаты цвета;

a_m, a_n, a_p — отрезки, отсекаемые плоскостью на координатных осях цветового пространства системы MNP.

Как можно видеть из (2-16), соответствующего любому расположению плоскости в цветовом пространстве системы MNP, плоскость единичных цветов определяется единичными значениями отрезков a_m, a_n и a_p. Следовательно, плоскость, пересекающая оси координат в точках $M(m'=1;\ n'=0;\ p'=0)$, $N(m'=0;\ n'=1;\ p'=0)$ и $P(m'=0;\ n'=0;\ p'=1)$, является геометрическим местом точек единичных цветов в цветовом пространстве MNP (рис. 2-3), так как сумма координат любой точки этой плоскости согласно (2-16) равна единице:

$$\sigma = m' + n' + p' = 1,$$

где σ — сумма координат цвета.

Каждой точке плоскости единичных цветов соответствует вполне определенное направление цветового вектора, пронизывающего в этой точке плоскость $\sigma=1$. Следовательно, цветности любого излучения соответствует единственно возможная точка этой плоскости. Это правило позволяет использовать плоскость единичных цветов для графического изображения всего многообразия цветностей. Треугольник MNP, образованный следами пересечения плоскости $\sigma=1$ с координатными плоскостями системы, является координатным треугольником цветности. Графическая интерпретация цветности точкой

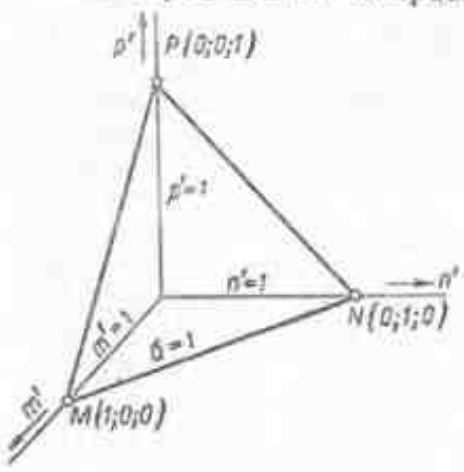


Рис. 2-3.

на плоскости вполне соответствует двухмерности качественной характеристики цвета — цветности.

При симметричной, в частности при прямоугольной, системе координат цвета координатный треугольник цветности является равносторонним (рис. 2-4). Координатами точки A, характеризующими цветность некоторого излучения в заданной системе, например $КЗС$, будут служить трехцветные коэффициенты $к_A$, $з_A$ и $с_A$. Вследствие этой особенности трехцветных коэффициентов их принято называть *координатами цветности*. В трехкоординатной системе[1] координатами цветности принято считать расстояния от сторон координатного треугольника (рис. 2-4,*а*). Следовательно, вершинам координатного треугольника системы $КЗС$

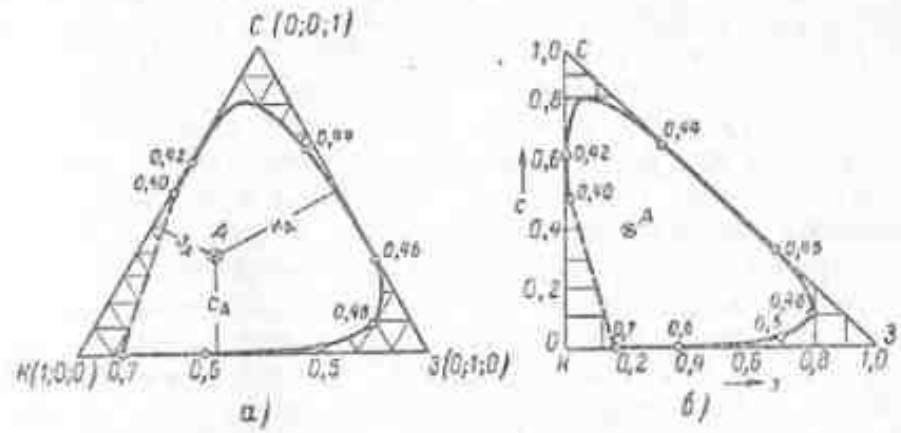


Рис. 2-4.

соответствуют цветности основных цветов системы $К$, $З$ и $С$. Такое расположение точек цветности с координатами ($к=1$; $з=0$; $с=0$), ($к=0$; $з=1$; $с=0$) и ($к=0$; $з=0$; $с=1$) соответствует направлению векторов основных цветов системы.

Вследствие того, что сумма координат цветности любого излучения равна единице, любая пара координат трехцветных коэффициентов может служить координатами точки в прямоугольной системе координат на плоскости (рис. 2-4,*б*). Как можно видеть из сопоставления трех- и двухкоординатных диаграмм цветности (рис. 2-4,*а* и *б*), последняя является проекцией плоскости единичных цветов на соответствующую координатную плоскость цветового пространства (рис. 2-3).

Нанеся на плоскость $\sigma=1$ точки с координатами цветности однородных излучений различных длин волн, получим кривую (рис. 2-4,*а* и *б*), являющуюся геометрическим местом точек цветности однородных излучений (локус). Эта кривая разомкну-

[1] Использование трехкоординатной системы для графического изображения цветности было впервые предложено Д. К. Максвеллом (§ 1-10).

та и имеет граничные точки, соответствующие цветностям однородных излучений с длинами волн $\lambda=0{,}4$ *мк* и $\lambda=0{,}7$ *мк*. Соединяя прямой эти граничные точки, получим геометрическое место точек цветностей чистых пурпурных цветов как результат смешения спектрально-чистых цветов: красного ($\lambda=0{,}7$ *мк*) и фиолетового ($\lambda=0{,}4$ *мк*). Это правило, говорящее в общем виде о том, что точка цветности смеси двух любых цветов находится на прямой, соединяющей точки цветности смешиваемых компонентов, определяется расположением в одной плоскости векторов двух смешиваемых и результирующего цветов.

Сетку координат цветности с нанесенной на нее кривой спектральных цветов и прямой чистых пурпурных цветов принято называть *диаграммой цветности*. На всех участках локуса цветности однородных излучений кривая обращена выпуклостью наружу. Это свойство локуса характерно для любой цветовой системы, так как локус любой системы является следом пересечения плоскости с конической поверхностью, образованной векторами цветов однородных излучений и чистых пурпурных цветов. Следовательно, вариации формы локуса различных колориметрических систем возможны лишь только в результате проективного преобразования диаграмм цветности.

Благодаря аддитивности световых и лучистых величин цвет любого излучения можно представить суммой цветов однородных излучений. Учитывая это и принимая во внимание форму кривой цветности однородных излучений, можно сделать вывод, что все точки, расположенные на участке, ограниченном локусом однородных излучений и чистых пурпурных цветов, охватывают цветности всех существующих в природе излучений, следовательно, всех реальных цветов. Это позволяет подтвердить вывод о нереальности всех цветов, характеризуемых на диаграмме цветности точками за пределами локуса.

Расположение всех точек цветности реальных цветов внутри поля, ограниченного кривой цветности однородных излучений, позволяет считать эту кривую граничной для поля реальных цветов. Эта граничная кривая поля реальных цветов на участке $\lambda \geqslant 0{,}56$ *мк* прямолинейна. Прямолинейность этого участка цветности однородных излучений подтверждается результатами экспериментов с достаточной для практики точностью (погрешность не превышает 0,005 в цифровом выражении цветности). Отсутствие отрицательных координат цветности для любого реального цвета возможно лишь в том случае, когда все поле реальных цветов, ограниченное локусом, лежит в пределах координатного треугольника цветности. Удовлетворение этого требования вызывает необходимость расположения вершин координатного треугольника за пределами локуса, следовательно, необходимость выбора нереальных основных цветов системы.

Количественные значения основных цветов. Как было показано ранее, для более равномерного заполнения цветового пространства желательно обеспечить равноудаленность белого цвета равноинтенсивного излучения. Это условие определяется равенством координат этого белого цвета, следовательно, равенством координат его цветности.

Нетрудно убедиться в том, что расположение точки белого цвета определяется соотношением количественных выражений выбранных основных цветов системы. Для доказательства этого положения условимся в качестве основных цветов системы выбирать цвета однородных излучений: красный — $\lambda_R=0{,}700$ *мк*, зеленый — $\lambda_G=0{,}5461$ *мк* и синий — $\lambda_B=0{,}4358$ *мк**. Эти основные цвета были обозначены R (red — красный), G (green—зеленый) и B (blue — синий). Из опыта смешения цветов известно (§ 2-6), что для получения цвета белого равноинтенсивного излучения необходимо обеспечить следующую количественную пропорцию смеси:

$$(B_R)_E:(B_G)_E:(B_B)_E=1:4{,}5907:0{,}061. \qquad (2\text{-}17)$$

В соответствии с (2-1а) и (2-6) количественное соотношение компонентов смеси можно записать в следующем виде:

$$L_R r'_E:L_G g'_E:L_B b'_E=1:4{,}5907:0{,}061, \qquad (2\text{-}18)$$

где L_R, L_G и L_B — относительные яркостные выражения основных цветов R, G и B;

r'_E, g'_E и b'_E — координаты белого цвета равноинтенсивного излучения в системе RGB.

Принимая количественные значения основных цветов одинаковыми $L_R=L_G=L_B$, получим положение точки исходного белого цвета на диаграмме цветности вблизи к RG-стороне координатного треугольника цветности (рис. 2-5,*а*). Как можно видеть из приведенной диаграммы, для излучений с цветностями, промежуточными между белым равноинтенсивным (точка E) и однородным $\lambda=0{,}570$ *мк*, практически не остается места. Такое асимметричное расположение точки цветности белого излучения может привести к значительным погрешностям системы RGB, если количественные выражения всех трех основных цветов будут приняты одинаковыми.

Из (2-18) следует, что расположению точки E в центре $r'_E=g'_E=b'_E$ соответствует условие:

$$L_R:L_G:L_B=1:4{,}5907:0{,}061.$$

* Эти цвета были приняты основными в 1931 г. на VIII сессии МКО.

Следовательно, расположение точки белого E в центре координатного треугольника произвольной системы MNP можно получить, выбрав количественные значения ее основных цветов пропорциональными количественным выражениям RGB-компонентов исходного белого E:

$$L_M : L_N : L_P = (B_M)_E : (B_N)_E : (B_P)_E. \tag{2-19}$$

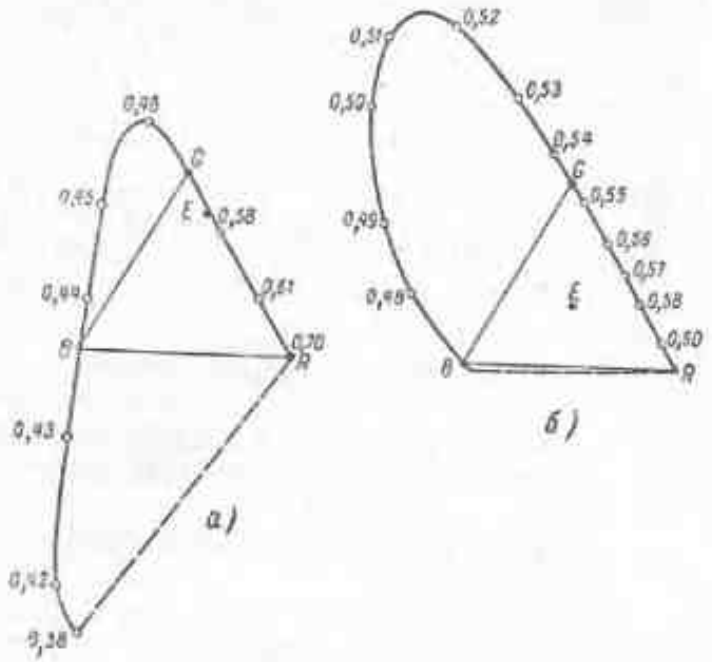


Рис. 2-5.

Для определения количественных (яркостных) выражений основных цветов какой-либо системы воспользуемся уравнением (2-3), обязательным для любой колориметрической системы. Запишем это уравнение в системе RGB для цвета однородного излучения с длиной волны $\lambda = 0{,}555$ *мк*, приняв найденное опытом соотношение $L_R : L_G : L_B$

$$1 = (\bar{r}_{0,555} + 4{,}5901\bar{g}_{0,555} + 0{,}061\bar{b}_{0,555})\, L_R.$$

Подставив в полученное равенство значения удельных координат цвета $\bar{r}_{0,555} = 0{,}05514$; $\bar{g}_{0,555} = 0{,}20588$ и $\bar{b}_{0,555} = -0{,}00105$, найденные из опыта смешения цветов, получим $L_R = 1$, $L_G = 4{,}59$ и $L_B = 0{,}06$. При удовлетворении условий, определяемых (2-19), исходный белый цвет располагается в центре диаграммы, что отчетливо видно (рис. 2-5,*б*) на примере системы RGB.

Яркостный коэффициент цвета. Вследствие того, что координаты цветности всех одноцветных излучений одинаковы, также одинаковы и соотношения компонентов этих цветов. Следовательно, значения яркости одноцветных излучений пропорциональны модулям векторов их цветов. Значения яркости разноцветных излучений, векторы цвета которых имеют различные направления в цветовом пространстве, непропорциональны модулям.

Это правило объясняется тем, что любому направлению в цветовом пространстве соответствует свойственное только ему соотношение компонентов цвета, каждый из которых имеет свое собственное единичное значение, численно равное соответствующему основному цвету системы. Для характеристики переменного соотношения между величиной вектора цвета и яркостью излучения, обладающего этим цветом, введем понятие о *яркостном коэффициенте цвета* [Л. 4], численно равном яркости единичного значения этого цвета, выраженной в единицах, больших в 683 раза по сравнению с единицей яркости нитом (*нт*). Напишем выражение яркостного коэффициента произвольного цвета Ф в произвольно выбранной колориметрической системе MNP:

$$L = \frac{B}{683\sigma} = \frac{B^0}{683}, \tag{2-20}$$

где $\sigma = m' + n' + p'$ — сумма координат исследуемого цвета Ф;

$B^0 = \frac{B}{\sigma}$ — яркость единичного цвета.

Заменяя яркость исследуемого цвета ее MNP-составляющими в соответствии с уравнениями (2-1а) и (2-2а), получим:

$$L = mL_M + nL_N + pL_P. \tag{2-21}$$

Решая совместно (2-8а) и (2-21), будем иметь:

$$L = m(L_M - L_P) + n(L_N - L_P) + L_P, \tag{2-22}$$

где L_M, L_N и L_P — относительные количественные выражения единичных MNP-компонентов цвета.

Приняв за исследуемый цвет Ф один из основных цветов системы, например M, будем иметь $m_M = 1$, $n_M = 0$ и $p_M = 0$. В этом случае (2-21) примет вид тождества:

$$L = L_M.$$

Из этого тождества следует, что относительные количественные выражения единичных MNP-компонентов L_M, L_N и L_P численно равны яркостным коэффициентам основных цветов этой же системы MNP.

Плоскость равной яркости. Для исследования формы поверхности, представляющей геометрическое место точек концов

векторов цвета равной яркости, напишем на основе (2-1а) и (2-2а) уравнение, охватывающее все многообразие цветов одинаковой яркости:

$$B = 683\,(m'L_M + n'L_N + p'L_P). \qquad (2\text{-}23)$$

Сопоставляя полученное уравнение с уравнением плоскости в цветовом пространстве (2-16), можно сделать вывод, что поверхность равной яркости в цветовом пространстве является плоскостью, отсекающей на координатных осях отрезки

$$a_m = \frac{B}{683L_M};\ a_n = \frac{B}{683L_N} \text{ и } a_p = \frac{B}{683L_P},$$

так как в этом случае

$$m'\frac{683L_M}{B} + n'\frac{683L_N}{B} + p'\frac{683L_P}{B} = 1. \qquad (2\text{-}24)$$

Плоскости, являющиеся геометрическим местом точек концов векторов цвета одинаковой яркости, принято называть *плоскостями равной яркости* (рис. 2-6). Семейство плоскостей равной яркости является семейством параллельных плоскостей, так как

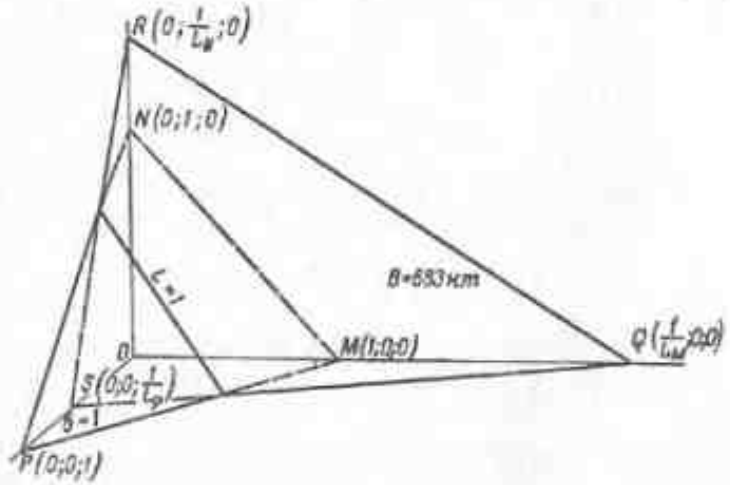


Рис. 2-6.

отрезки, отсекаемые плоскостью $B = \text{const}$ на координатных осях, согласно уравнению (2-24) пропорциональны значениям яркости. Из этого же уравнения можно видеть, что плоскость единичной яркости $L = 1$, следовательно, $B = 683$ *нт* пересекает оси координат в точках: $Q\left(m' = \frac{1}{L_M};\ n' = 0;\ p' = 0\right)$; $R\left(m' = 0;\ n' = \frac{1}{L_N};\ p' = 0\right)$ и $S\left(m' = 0;\ n' = 0;\ p' = \frac{1}{L_P}\right)$, каждой из которых соответствует конец вектора исходного цвета единичной яркости.

Алихна. Следы пересечения семейства $B = \text{const}$ плоскостью диаграммы цветности являются линиями постоянных значений яркостного коэффициента $L = \text{const}$, так как плоскость диаграммы цветности является плоскостью единичных цветов, яркость которых численно равна их яркостным коэффициентам, умноженным

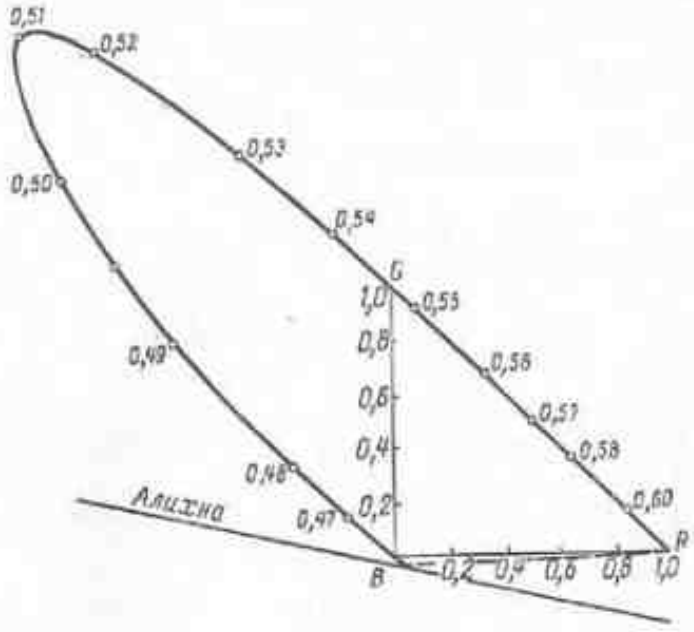


Рис. 2-7.

на постоянный множитель 683. Особый интерес представляет плоскость нулевой яркости, параллельная семейству плоскостей $B = \text{const}$ и проходящая через начало координат цветового пространства. След пересечения плоскости нулевой яркости, проходящей через начало координат, с плоскостью диаграммы цветности, называемой *алихной*, характеризуется нулевым значением яркостного коэффициента. Вследствие того, что любому единичному реальному цвету соответствует значение яркости $B \neq 0$, все точки алихны характеризуют цветности нереальных цветов.

Уравнение алихны можно получить, приравнивая нулю яркостный коэффициент исследуемого цвета $L = 0$ в (2-22)

$$m\,(L_M - L_P) + n\,(L_N - L_P) + L_P = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

или совместным решением уравнений плоскостей нулевой яркости и единичных цветов:

$$m'L_M + n'L_N + p'L_P = 0;\ m' + n' + p' = 1.$$

В системе RGB на диаграмме цветности rg уравнение алихны (2-25) имеет следующий вид:

$$r\,(L_R - L_B) + g\,(L_G - L_B) + L_B = 0. \qquad (2\text{-}26)$$

векторов цвета равной яркости, напишем на основе (2-1а) и (2-2а) уравнение, охватывающее все многообразие цветов одинаковой яркости:

$$B = 683\,(m'L_M + n'L_N + p'L_P). \qquad (2\text{-}23)$$

Сопоставляя полученное уравнение с уравнением плоскости в цветовом пространстве (2-16), можно сделать вывод, что поверхность равной яркости в цветовом пространстве является плоскостью, отсекающей на координатных осях отрезки

$$a_m = \frac{B}{683L_M};\ a_n = \frac{B}{683L_N} \text{ и } a_p = \frac{B}{683L_P},$$

так как в этом случае

$$m'\frac{683L_M}{B} + n'\frac{683L_N}{B} + p'\frac{683L_P}{B} = 1. \qquad (2\text{-}24)$$

Плоскости, являющиеся геометрическим местом точек концов векторов цвета одинаковой яркости, принято называть *плоскостями равной яркости* (рис. 2-6). Семейство плоскостей равной яркости является семейством параллельных плоскостей, так как

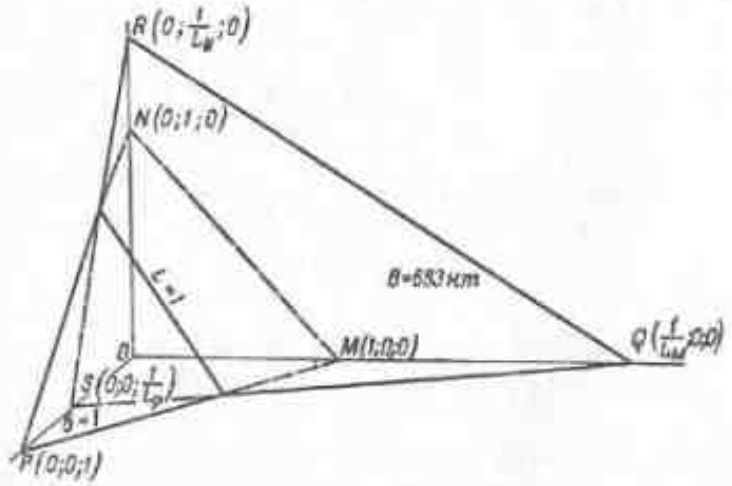


Рис. 2-6.

отрезки, отсекаемые плоскостью $B = \text{const}$ на координатных осях, согласно уравнению (2-24) пропорциональны значениям яркости. Из этого же уравнения можно видеть, что плоскость единичной яркости $L = 1$, следовательно, $B = 683$ *нт* пересекает оси координат в точках: $Q\left(m' = \frac{1}{L_M};\ n' = 0;\ p' = 0\right)$; $R\left(m' = 0;\ n' = \frac{1}{L_N};\ p' = 0\right)$ и $S\left(m' = 0;\ n' = 0;\ p' = \frac{1}{L_P}\right)$, каждой из которых соответствует конец вектора исходного цвета единичной яркости.

Алихна. Следы пересечения семейства $B = \text{const}$ плоскостью диаграммы цветности являются линиями постоянных значений яркостного коэффициента $L = \text{const}$, так как плоскость диаграммы цветности является плоскостью единичных цветов, яркость которых численно равна их яркостным коэффициентам, умноженным

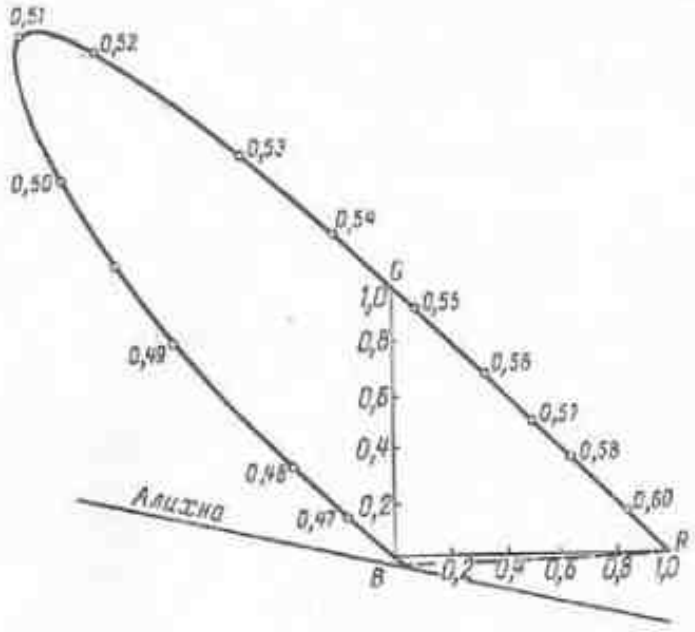


Рис. 2-7.

на постоянный множитель 683. Особый интерес представляет плоскость нулевой яркости, параллельная семейству плоскостей $B = \text{const}$ и проходящая через начало координат цветового пространства. След пересечения плоскости нулевой яркости, проходящей через начало координат, с плоскостью диаграммы цветности, называемой *алихной*, характеризуется нулевым значением яркостного коэффициента. Вследствие того, что любому единичному реальному цвету соответствует значение яркости $B \neq 0$, все точки алихны характеризуют цветности нереальных цветов.

Уравнение алихны можно получить, приравнивая нулю яркостный коэффициент исследуемого цвета $L = 0$ в (2-22)

$$m\,(L_M - L_P) + n\,(L_N - L_P) + L_P = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

или совместным решением уравнений плоскостей нулевой яркости и единичных цветов:

$$m'L_M + n'L_N + p'L_P = 0;\ m' + n' + p' = 1.$$

В системе RGB на диаграмме цветности rg уравнение алихны (2-25) имеет следующий вид:

$$r\,(L_R - L_B) + g\,(L_G - L_B) + L_B = 0. \qquad (2\text{-}26)$$

критическую частоту мелькания. Согласно закону Талбота (§ I-12) последовательное смешение цветов можно рассматривать как суммирование исходных цветов смеси. Цветность смеси излучения в этом случае определится, как и при оптическом смешении, цветностью смешиваемых исходных излучений и соотношением их яркостей (координат цвета).

Пространственное смешение исходных цветов основано на слитном восприятии разноцветных штрихов, точек, полосок или других фигур, угловые размеры которых меньше разрешаемого угла (§ I-9). Этот способ смешения цветов возможен в тех случаях, когда на каждое рецепторное поле возбуждаемого участка сетчатки попадают изображения разноцветных элементов (точек, штрихов и пр.) объекта. Ощущение цветности поля зрения, состоящего из разноцветных элементов, определится исходными цветами системы воспроизведения и соотношением площадей, занятых элементами каждого цвета в пределах рецепторного поля.

Пространственное смешение цветов широко применяется в цветовой полиграфии, где устройство, определяющее форму и взаимное расположение разноцветных элементов, принято называть *растром*[1]. В зависимости от формы и расположения разноцветных растровых пятен, растры могут быть регулярные и нерегулярные. Пространственный способ аддитивного смешения цветов используется также в современном цветном телевидении с одновременной передачей трех сигналов. Цветность излучения смеси люминофоров также воспринимается глазом как цветность совокупности излучения микроскопических кристаллов отдельных компонентов смеси. Вследствие того, что размеры излучающих кристаллов значительно меньше размеров, минимально различимых глазом, происходит пространственное смешение цветов отдельных компонентов смеси.

Первые исследования аддитивного оптического смешения цветов и формулировка основных положений о цвете сложного излучения принадлежат И. Ньютону [Л. 5—7]. Результаты экспериментальных исследований разложения белого излучения на однородные при прохождении пучка лучей через призму, а также оптического смешения цветов однородного излучения с помощью собирательной линзы были положены Ньютоном в основу учения о цвете однородных и сложных излучений.

Ньютоном были сформулированы некоторые основные положения колориметрии, в частности:

а) разделены качественная и количественная оценки излучения;

б) сформулированы понятия о физической основе цвета и о физиологической сущности его ощущения;

в) сформулировано понятие о цвете сложного излучения как цвете смеси цветов однородных излучений;

[1] Rastrum — грабли (лат.)

г) дано понятие о дополнительных цветах однородных излучений.

Закон Грассмана. Векторное изображение цвета, впервые предложенное немецким математиком Г. Грассманом (1809—1877), позволило ему сформулировать положение о необходимости и достаточности трех основных цветов для однозначного определения любого исследуемого цвета. Положение о трехмерности цветового пространства было положено Г. Грассманом в основу *закона аддитивного смешения цветов*, определяющего правило выбора основных цветов любой колориметрической системы. Этот *закон*, носящий имя *Грассмана*, был сформулирован на основе трехкомпонентной теории цветового зрения с учетом предшествующих экспериментальных работ по смешению цветов, в первую очередь работ И. Ньютона.

Основой закона аддитивного смешения цветов являются положения о трехмерности цвета и об аддитивности световых величин, определяющих количественную характеристику любого компонента цвета. Возможность изображения любого цвета трехмерным вектором позволила Грассману сформулировать закон о качественных свойствах трех цветов, необходимых и достаточных для однозначного определения любого четвертого цвета. Этот закон был записан [Л. 6] в следующей формулировке:

Любые четыре цвета линейно зависимы на основании наличием неограниченного числа линейно независимых систем из трех цветов.

Математическую формулировку основного закона аддитивного смешения цветов можно записать уравнением

$$m'\vec{M} + n'\vec{N} + p'\vec{P} + q'\vec{Q} = 0, \qquad (2\text{-}27)$$

где $\vec{M}$, $\vec{N}$, $\vec{P}$ и $\vec{Q}$ — единичные векторы смешиваемых цветов;
m', n', p' и q' — модули векторов смешиваемых цветов.

Уравнение (2-27) показывает, что любой из четырех цветов однозначно определяется тремя остальными, если они линейно независимы, следовательно, если аддитивная смесь любой пары из них в любой пропорции не может быть тождественной третьему цвету. Линейная независимость трех цветов в векторной интерпретации определяется невозможностью провести одну плоскость через векторы этих трех цветов.

Модули векторов трех смешиваемых цветов, однозначно описывающих четвертый, следует рассматривать как координаты этого цвета, а единичные векторы этих трех цветов как основные цвета системы:

$$\vec{\Phi}_Q = m'_Q\vec{M} + n'_Q\vec{N} + p'_Q\vec{P}, \qquad (2\text{-}27а)$$

где $\vec{\Phi}_Q = -q'\vec{Q}$ — исследуемый цвет;

m_Q, n_Q' и p_Q' — координаты цвета $\vec{\Phi}_Q$ в системе MNP;

$\vec{M}$, $\vec{N}$, $\vec{P}$ — основные цвета системы.

Анализ закона Грассмана позволяет сделать некоторые выводы, существенно важные для теории построения колориметрических систем.

1-й вывод. Трехмерность цветового пространства определяет возможность выражения любого реального или нереального цвета тремя цветами, выбранными с большой степенью произвольности.

2-й вывод. Произвольность выбора трех единичных цветов $\vec{M}$, $\vec{N}$ и $\vec{P}$ в (2-27а) гарантирует возможность создания множества колориметрических систем, в каждой из которых любой заданный цвет однозначно выражается цветовым уравнением типа (2-27а).

3-й вывод. Обязательным условием выбора основных цветов системы является отсутствие между ними линейной зависимости, что можно записать следующим неравенством, обязательным при любых значениях m', n' и p':

$$m'\vec{M} + n'\vec{N} + p'\vec{P} \neq 0. \qquad (2\text{-}28)$$

Пользуясь правилом суммирования векторов цвета, нетрудно показать, что любому цвету в произвольно выбранной цветовой системе соответствует одно единственное цветовое уравнение. Для доказательства этого предположим, что одному цвету могут соответствовать два цветовых уравнения с различными координатами цвета:

$$\vec{\Phi} = m_1'\vec{M} + n_1'\vec{N} + p_1'\vec{P};$$

$$\vec{\Phi} = m_2'\vec{M} + n_2'\vec{N} + p_2'\vec{P}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим:

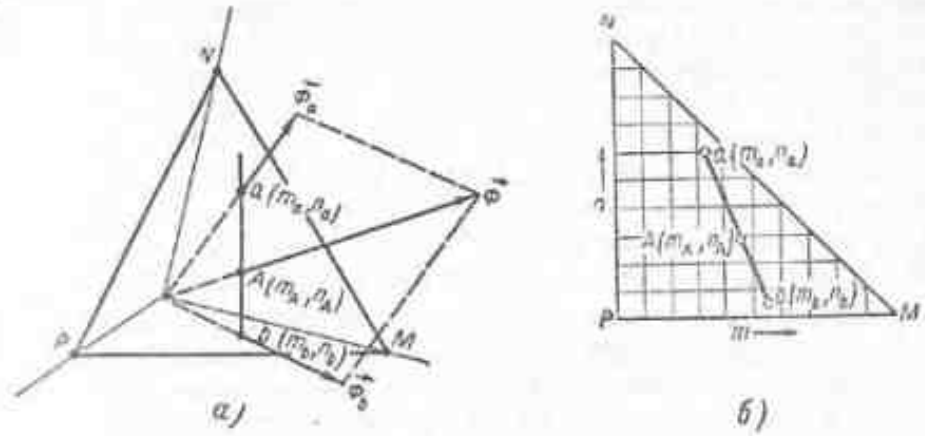
$$(m_1' - m_2')\vec{M} + (n_1' - n_2')\vec{N} + (p_1' - p_2')\vec{P} = 0.$$

В том случае, если три основных цвета системы линейно независимы, следовательно, их векторы не лежат в одной плоскости, это цветовое уравнение возможно лишь при следующих условиях:

$$m_1' = m_2';\ n_1' = n_2';\ p_1' = p_2'.$$

Полученное равенство координат цвета доказывает однозначность определения цвета любого излучения его цветовым уравнением. Следовательно, цветовыми уравнениями принято называть такие уравнения, которые однозначно определяют цвет любого излучения через основные цвета системы и координаты этого цвета.

Цветность смеси излучений. Возможность выражения цвета тремя его компонентами определяется аддитивно-



а) б)

Рис. 2-9.

стью световых величин любых излучений, в том числе и разноцветных. Правило аддитивности компонентов цвета позволяет применять векторное суммирование смешиваемых цветов (рис. 2-9,*а*):

$$\vec{\Phi}_A = \vec{\Phi}_a + \vec{\Phi}_b \qquad (2\text{-}29)$$

или

$$\Phi_A \equiv (m_a' + m_b')\,M + (n_a' + n_b')\,N + (p_a' + p_b')\,P, \qquad (2\text{-}29а)$$

где

m_a', n_a', p_a';
m_b', n_b' p_b' } — координаты смешиваемых цветов $\vec{\Phi}_a$ и $\vec{\Phi}_b$.

Цвет смеси q цветов определится координатами, равными алгебраической сумме координат смешиваемых цветов

$$m' = \sum_{i=1}^{i=q} m_i';\ n' = \sum_{i=1}^{i=q} n_i';\ p' = \sum_{i=1}^{i=q} p_i' \qquad (2\text{-}30)$$

и

$$\sigma = \sum_{i=1}^{i=q} \sigma_i. \qquad (2\text{-}30а)$$

Следовательно, при сложении цветов (аддитивное смешение) и вычитании цветов (*субтрактивное смешение*) с цветовыми уравнениями смешиваемых цветов допустимы алгебраические опера-

ции. При аддитивном смешении цветов цветовое уравнение смеси можно получить суммированием уравнений смешиваемых цветов. При субтрактивном смешении, осуществляемом с помощью одного или нескольких цветных светофильтров, располагаемых последовательно по пути исследуемого излучения, необходимо из уравнения цвета исследуемого излучения вычесть цветовые уравнения, соответствующие цветам поглощенных фильтрами излучений. Возможность алгебраических операций с цветовыми уравнениями при определении результирующего цвета смешения, а также наличие в природе одноцветных разноспектральных излучений позволяют сформулировать следующее общее правило смешения цветов: цвет смеси нескольких излучений определяется цветами смешиваемых излучений, а не их спектральными составами.

В соответствии с правилом векторного суммирования векторы цветов, находящихся в линейной зависимости, расположены в одной плоскости, следовательно, вектор цвета смеси двух цветов находится всегда в плоскости расположения векторов смешиваемых цветов. Расположение векторов трех линейно зависящих цветов в одной плоскости определяет, как было показано ранее (§ 2-2), многообразие точек, характеризующих цветность смеси двух цветов и определяемое прямой, соединяющей точки цветностей смешиваемых цветов на диаграмме цветности (рис. 2-9,*б*).

Для доказательства этого правила напишем уравнения двух смешиваемых и результирующего цветов:

$$\begin{aligned} \Phi_a &\equiv m_a' M + n_a' N + p_a' P \\ +\ \Phi_b &\equiv m_b' M + n_b' N + p_b' P \\ \hline \Phi_A &\equiv \Phi_a + \Phi_b \equiv (m_a' + m_b')\, M + (n_a' + n_b')\, N + (p_a' + p_b')\, P. \end{aligned}$$

Обозначив сумму координат смешиваемых и результирующего цветов через σ_a, σ_b и σ_A, напишем выражение координат цветности результирующего цвета:

$$\left.\begin{aligned} m_A &= \frac{m_a' + m_b'}{\sigma_A} = \frac{m_a \sigma_a + m_b \sigma_b}{\sigma_a + \sigma_b}; \\ n_A &= \frac{n_a' + n_b'}{\sigma_A} = \frac{n_a \sigma_a + n_b \sigma_b}{\sigma_a + \sigma_b}, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}31)$$

откуда

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_b} = \frac{m_b - m_A}{m_A - m_a} = \frac{n_b - n_A}{n_A - n_a}. \qquad (2\text{-}32)$$

Полученное уравнение (2-32) позволяет сделать три вывода:

1) Точка $A(m_A, n_A)$, характеризующая цветность смеси, лежит на прямой, соединяющей точки $a(m_a, n_a)$ и $b(m_b, n_b)$ цветностей смешиваемых цветов (рис. 2-9).

2) Расстояния точки $A(m_A, n_A)$ от точек $a(m_a, n_a)$ и $b(m_b, n_b)$ обратно пропорциональны суммам координат смешиваемых цветов.

3) В зависимости от соотношения сумм координат смешиваемых цветов цветность смеси может характеризоваться любой точкой прямой ab.

Как известно (§ 2-2), локус цветности однородных излучений на диаграммах цветности любой цветовой системы криволинеен, причем выпуклость кривой монотонно обращена наружу для всех длин волн, за исключением желто-красного участка спектра $\lambda \geqslant 0{,}56$ *мк*. Вследствие прямолинейности этого участка локуса (§ 2-2) цвет смеси двух однородных излучений с длинами волн $\lambda \geqslant 0{,}56$ *мк* обладает чистотой, практически равной единице. Такой результат является исключением из общего правила, заключающегося в том, что цвет смеси двух однородных излучений всегда обладает чистотой, меньшей единицы. Это правило в соответствии с выводами из (2-32) определяется формой локуса цветности однородных излучений.

2-4. Основы построения колориметрических систем

Основные цвета системы. Цветовые уравнения, записанные в любой трехцветной системе, однозначно определяют исследуемый цвет тремя его координатами:

$$\Phi \equiv m'M + n'N + p'P;$$

$$\Phi \equiv \kappa'K + s'S + c'C.$$

В любой колориметрической системе координаты цвета m', n' и p' выражают количества основных цветов, записанные в их единичных значениях, определяющие зрительное тождество исследуемого цвета с совокупностью[1] исходных цветов системы $m'\vec{M}$, $n'\vec{N}$ и $p'\vec{P}$. В физиологической цветовой системе координаты κ', s' и c' дополнительно к этому непосредственно выражают уровни возбуждения трех *кзс*-приемников среднего глаза. Так же как компоненты цвета принято выражать в основных (единичных) цветах, уровни возбуждения записываются в их единичных значениях.

Как было показано ранее (§ 2-1), физиологическую систему *КЗС* можно рассматривать как одну из множества возможных

[1] Совокупность реальных основных цветов, тождественную исследуемому цвету, возможно рассматривать как их аддитивную смесь с учетом знака каждой координаты цвета.

колориметрических систем. Основные цвета $\vec{K}$, $\vec{S}$ и $\vec{C}$ такой колориметрической системы выбираются так, чтобы их совокупность, взятая в пропорции $\bar{k}_\lambda:\bar{s}_\lambda:\bar{c}_\lambda$, зрительно отождествлялась (§ 2-1) с цветом любого однородного излучения λ аналогично зрительной тождественности цвета этого однородного излучения совокупности основных цветов любой колориметрической системы MNP, взятых в пропорции $\bar{m}_\lambda:\bar{n}_\lambda:\bar{p}_\lambda$. Исходя из этого, в соответствии с (2-1) можно сделать вывод, что функции $\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$, так же как и функции $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{n}(\lambda)$ и $\bar{p}(\lambda)$, графически характеризуются кривыми, ординаты которых определяют пропорции смесей основных цветов, тождественных однородным излучениям одинаковой мощности или узким спектральным полосам равноинтенсивного белого излучения.

Эта особенность функций $\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$, так же как $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{n}(\lambda)$ и $\bar{p}(\lambda)$, позволяет называть их *функциями сложения* (*функциями смешения*), а их графическое изображение в прямоугольной системе координат — *кривыми сложения* (*кривыми смешения*). Значения ординат кривых сложения принято также называть *удельными координатами цвета однородного излучения*, так как они в соответствии с (2-14а) численно равны координатам цвета однородного излучения, обладающего лучистой яркостью $B_\lambda = 1$ *вт·м⁻²·стер⁻¹*. Ординаты кривых сложения могут быть положительными и отрицательными. Когда все три ординаты для какого-либо значения λ положительны и основные цвета системы реальны, цвет однородного излучения этой длины волны может быть воспроизведен тождественной смесью трех основных цветов системы. В тех случаях, когда одна или две ординаты из трех отрицательны, основные цвета с отрицательными значениями удельных координат должны смешиваться с исследуемым цветом. Вполне понятно, что каждой тройке основных цветов, следовательно, каждой колориметрической системе соответствуют свои собственные кривые сложения.

Согласно закону Грассмана выбор основных цветов системы практически произволен и ограничивается лишь условием их линейной независимости. В колориметрической практике приходится предусматривать некоторые дополнительные условия, определяемые в основном требованиями точности и простоты пользования колориметрической системой. Одним из таких условий является достаточное заполнение цветового пространства выбираемой колориметрической системы конусом реальных цветов. Для исследования этого условия рассмотрим возможности тождественного воспроизведения исследуемого цвета аддитивной смесью трех реальных цветов.

Пусть цветности трех смешиваемых излучений, единичные цвета которых мы примем за основные цвета системы, заданы на диаграмме цветности системы RGB (рис. 2-10) точками

$$M(r_M, g_M);\ N(r_N, g_N);\ P(r_P, g_P).$$

Как следует из правил определения цветности аддитивной смеси двух цветов, цветность смеси основных цветов новой системы M и N, взятых в различных пропорциях, может характеризоваться любой точкой на прямой MN. Согласно (2-33) цветность смеси определится точкой M при $\sigma_N = 0$ и точкой N при $\sigma_M = 0$. В соответствии с этим же правилом цветность

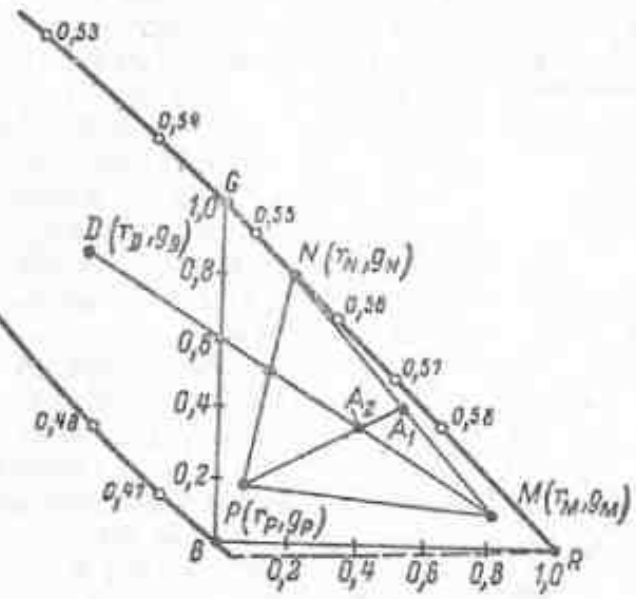


Рис. 2-10.

смеси третьего основного цвета P со смесью M и N может характеризоваться любой точкой в пределах треугольника MNP. Такое расположение точки цветности смеси трех цветов определяется возможностью расположения прямой A_1P в пределах от MP до NP, а точки A_2, характеризующей цветность искомой смеси трех цветов, — в пределах от P до A_1.

Все точки, лежащие за границей треугольника смеси MNP, нельзя воспроизвести аддитивной смесью трех цветов M, N и P. Несмотря на невозможность их воспроизведения аддитивной смесью, математическая запись любого цвета, точки цветности которого расположены за пределами треугольника MNP, вполне возможна в любой колориметрической системе MNP. Как нетрудно видеть, все цвета, обладающие цветностью, ха-

рактеризуемой точкой D, должны обладать отрицательной координатой m':

$$\Phi_D \equiv -m'_D M + n'_D N + p'_D P.$$

Отрицательное значение координаты m' для цвета Φ_D определяется тем, что зрительная тождественность возможна лишь при смешении исследуемого цвета Φ_D с основным цветом M и остальных двух основных цветов друг с другом (рис. 2-10):

$$\Phi_D + m'M \equiv n'N + p'P.$$

Наличие отрицательных координат цвета вносит некоторые затруднения в расчет цвета по заданному спектральному распределению. Для устранения этих трудностей необходимо выбирать основные цвета системы такими, чтобы локус цветности однородных излучений располагался внутри треугольника MNP (рис. 2-11). Такое расположение основных цветов системы гарантирует положительные значения координат любого реального цвета, так как все точки цветностей реальных цветов будут расположены в пределах цветового треугольника.

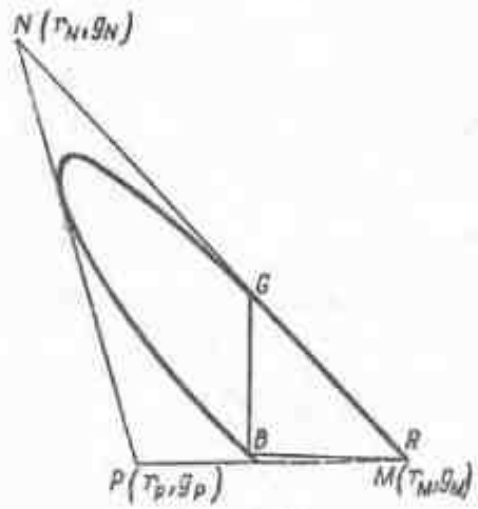


Рис. 2-11.

Вследствие того, что такое расположение основных цветов делает их нереальными, колориметрическая система с такими основными цветами условна. Условность такой системы определяется тем, что цветовое уравнение любого реального цвета в этой системе записывается в математических символах. Непосредственная экспериментальная проверка тождества правой и левой частей такого уравнения невозможна вследствие нереальности основных цветов такой системы.

Несмотря на это, колориметрическая система с нереальными основными цветами позволяет однозначно выражать любой реальный цвет, так как любой нереальный цвет, в том числе и каждый из трех нереальных основных цветов выбранной системы, можно записать цветовым уравнением в физиологической цветовой системе. Следовательно, каждый нереальный цвет можно выразить в *кзс*-координатах, что позволит каждый реальный цвет, математически записанный совокупностью трех нереальных компонентов, записать действительными уровнями возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза.

Применение нереальных цветов в качестве основных цветов колориметрической системы позволяет использовать еще одно преимущество такой системы, заключающееся в возможности выбора цветов с яркостным коэффициентом, равным нулю. Если два основных цвета из трех будут выбраны исходя из этого условия, количественная характеристика любого цвета будет сосредоточена только в одном его компоненте, для которого яркостный коэффициент не равен нулю. Применение такой системы, примером которой является международная цветовая система $X\breve{Y}Z$, значительно облегчает расчеты количественных характеристик цвета (§ 2-7).

При выборе основных цветов с яркостными коэффициентами, равными нулю, необходимо концы их векторов располагать на плоскости нулевой яркости, следовательно, точки цветности этих основных цветов, определяющие две вершины треугольника MNP, располагать на алихне (рис. 2-18). В цветовом пространстве направление векторов основных цветов соответствует направлению координатных осей, так как только в этом случае количественное выражение компонентов любого цвета будет определять координаты вектора этого цвета.

Возможность произвольного выбора направления координатных осей позволяет выбирать для колориметрической системы прямоугольную систему координат, вследствие чего векторы одного и того же цвета в разных системах имеют различные направления. Модули векторов одного и того же цвета в разных колориметрических системах также различны вследствие различия количественных выражений основных цветов каждой системы. Общей точкой для всех колориметрических систем, как уже было показано, является точка черного цвета с яркостью $B_ч = 0$. Общим направлением в цветовом пространстве для всех систем принято направление исходного белого цвета, за который принят цвет излучения с равноинтенсивным спектром.

Кривые сложения. Значительная произвольность выбора основных цветов, ограниченная лишь условием отсутствия линейной связи между ними, позволяет иметь неограниченно большое количество колориметрических систем, одной из которых является основная физиологическая цветовая система. Каждая колориметрическая система характеризуется тройкой основных цветов, однозначно определяющих три кривые сложения. Следовательно, любая система, в том числе и физиологическая, должна иметь: диаграмму цветности с локусом цветности однородных цветов, количественные значения трех основных цветов и три кривые сложения.

Из ранее изложенного следует, что все эти параметры системы определяются ее основными цветами, заданными их цветностью, и количественными значениями (яркость, световой поток). В том случае, когда все три основных цвета системы

реальны, кривые сложения могут быть определены непосредственно из колориметрических экспериментов путем подбора аддитивной смеси трех основных цветов, тождественной цветам однородных излучений. Вполне понятно, что экспериментально найденные три кривые сложения будут определяться выбранными реальными основными цветами, следовательно, таких кривых может быть множество. Несмотря на множество таких троек кривых, они линейно взаимосвязаны, так как все они выражают через свои основные цвета соотношение уровней возбуждения трех цветовоспринимающих приемников среднего глаза каждым исследуемым однородным излучением.

Согласно (2-1) и (2-2) имеем:

$$\bar{\kappa}_\lambda K + \bar{s}_\lambda S + \bar{c}_\lambda C \equiv \bar{m}_\lambda M + \bar{n}_\lambda N + \bar{p}_\lambda P \equiv$$

$$\equiv \bar{u}_\lambda U + \bar{v}_\lambda V + \bar{w}_\lambda W, \qquad (2\text{-}33)$$

где $\bar{\kappa}_\lambda$, $\bar{s}_\lambda$ и $\bar{c}_\lambda$ — удельные координаты цвета исследуемого однородного излучения в системе *КЗС*, определяющие уровни возбуждения *кзс*-приемников среднего глаза однородным излучением единичной яркости (светового потока) и длиной волны λ;

$\bar{m}_\lambda$, $\bar{n}_\lambda$ и $\bar{p}_\lambda$ — удельные координаты цвета однородного излучения, найденные экспериментально для систем с реальными основными цветами $\vec{M}$, $\vec{N}$, $\vec{P}$;

$\bar{u}_\lambda$, $\bar{v}_\lambda$ и $\bar{w}_\lambda$ — то же для систем с нереальными основными цветами $\vec{U}$, $\vec{V}$, $\vec{W}$.

Уравнение (2-33), подчеркивающее общность всех кривых сложения, показывает, что достаточно определить экспериментально лишь одну тройку кривых сложения. Все остальные кривые сложения для любых основных цветов, включая и нереальные, могут быть найдены решением систем уравнений типа (2-33), если известны основные цвета системы. Следовательно, для обеспечения возможности знать все многообразие кривых сложения необходимо и достаточно определить экспериментально только одну тройку кривых. Так как кривые сложения физиологической системы, определяющие спектральную чувствительность *кзс*-приемников, также принадлежат этому многообразию, их можно найти по экспериментально найденным кривым сложения любых трех основных цветов, однако лишь в том случае, если известны три основных цвета $\vec{K}$, $\vec{S}$ и $\vec{C}$ физиологической системы. Трудности, встречающиеся при прямом экспериментальном определении кривых чувствительности каждого

кзс-приемника, так же как и при косвенном определении основных цветов $\vec{K}$, $\vec{S}$, $\vec{C}$, не позволили до последнего времени с достаточной достоверностью определить эти основные кривые сложения. Попытки экспериментального изучения кривых сложения реальных основных цветов были предприняты многими исследователями [Л. 7—9]: Максвеллом (1860), Кенигом и Дитеричи (1886—1893), Эбнеем (1899—1905), Кенигом и Эбнеем (1922), Райтом (1927—1930), Гилдом (1931) и др.

Исследования В. Райта [Л. 10] были выполнены на спектральной установке, схема которой приведена на рис. 2-12. Задача эксперимента заключалась в нахождении цветового равенства между цветами четырех однородных излучений, три из которых были качественно постоянными (основные цвета) и четвертый — исследуемый. Основными цветами В. Райт принял цвета однородных излучений с длинами волн $\lambda_1 = 0{,}650$ *мк*, $\lambda_2 = 0{,}530$ *мк* и

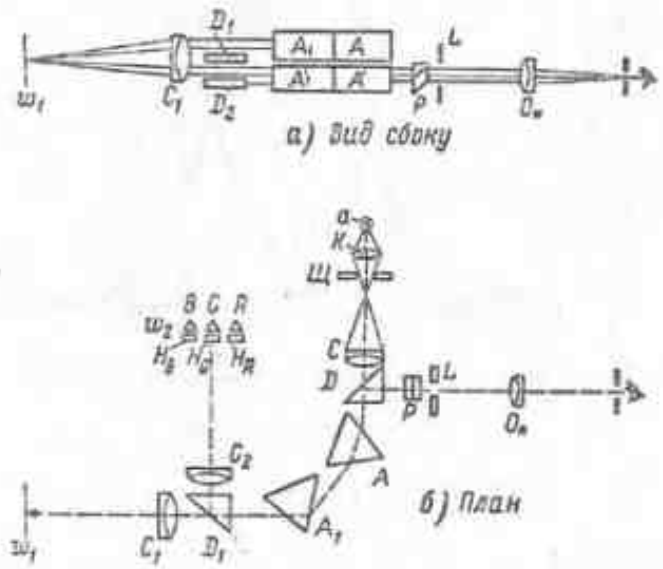


Рис. 2-12.

$\lambda_3 = 0{,}460$ *мк*. Длина волны излучения исследуемого цвета варьировалась экспериментатором по всему видимому участку спектра.

Излучение точечной вольфрамовой лампы *а* с постоянным спектральным составом, проходя через оптический конденсор *К*, входную щель *Щ* и коллиматорную линзу *С*, попадало на дисперсионные призмы *А* и A_1, проходя параллельным пучком над призмой *D*. Верхняя половина пучка, прошедшего над прямоугольной призмой D_1, фокусируется линзой C_1 в плоскости w_1, образуя спектральную полосу.

Нижняя половина пучка после полного внутреннего отражения в прямоугольной призме D_2, проходя через линзу C_2, образует в плоскости w_2 вторую спектральную полосу. В плоскости w_2 расположены три небольшие призмочки полного внутреннего отражения, прямоугольные ребра которых совпадают с линиями $\lambda_1 = 0{,}460$ *мк*, $\lambda_2 = 0{,}530$ *мк* и $\lambda_3 = 0{,}650$ *мк*. Каждая из этих трех призмочек после двукратного полного внутреннего отражения от катетных граней возвращает красный, зеленый и синие пучки обратно на линзу C_2. После отражения от гипотенузной грани прямоугольной приз-

мы D_2, расположенной непосредственно под призмой D_1, пучок проходит через дисперсионные призмы A' и A_1', идентичные с призмами A и A_1 и расположенные непосредственно под ними. Вторичное прохождение излучения через дисперсионные призмы создает параллельный пучок смешанного излучения. Цвет этого смешанного излучения определяется величиной и соотношением потоков, возвращенных призмочками в плоскости ω_2 на призмы A' и A_1'. Для регулирования цвета смешанного излучения перед каждой из трех возвращающих призмочек в ω_2 установлены нейтральные клиновые фильтры H. Угловые размеры участков спектра, вырезаемых возвращающими призмочками, равны 6 *нм* для красного излучения, 3,5 *нм* для зеленого и 1,6 *нм* для синего.

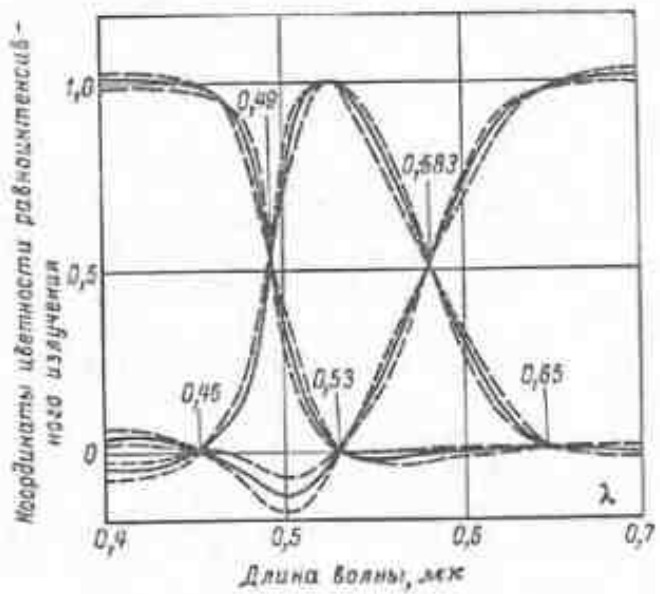


Рис. 2-13.

После отражения от гипотенузной грани призмы D смешанный пучок излучения попадает на призму сравнения P. Эта призма склеена из двух, причем нижняя половина поверхности соприкосновения посеребрена, вследствие чего нижняя часть поля зрения заполняется смесью трех основных однородных излучений. Прямоугольная диафрагма L и оптика окуляра определяют угловой размер поля зрения, который был в опытах Райта равен $2°\times2°$.

В плоскости ω_1 расположены две возвращающие призмочки, одна из которых располагалась на спектральной полосе, соответствующей длине волны одного из основных цветов[1]. Вторая призмочка, предназначенная для возвращения исследуемого однородного излучения, могла перемещаться по всему спектру. Перед этими двумя призмочками также располагались нейтральные клиновые фильтры. Возвращенные пучки, пройдя между призмами D_1 и D_2 и попадая на дисперсионные призмы A_1' и A', направлялись в верхнюю часть поля зрения наблюдателя призмами D и P. Наблюдатель должен был устанавливать цветовое равенство нижней и верхней половин

[1] Это было необходимо для получения отрицательных значений компонентов исследуемого цвета.

поля зрения путем регулирования величины основных цветов с помощью перемещения клиновых фильтров. Все исследования проводились в условиях темновой адаптации при яркости полей сравнения $B\geqslant8$ *нт*.

Результаты, полученные Райтом для десяти наблюдателей (рис. 2-13), приведены в виде кривых координат цветности однородных излучений в системе с основными цветами $\lambda_C=0{,}460$ *мк*, $\lambda_З=0{,}530$ *мк* и $\lambda_К=0{,}650$ *мк*. Экстремальные (пунктир) и средние (сплошная линия) значения показывают очень хорошее совпадение результатов эксперимента Райта для различных наблюдателей.

Н. Гилд [Л. 11] проводил исследование смешения цветов в условиях, одинаковых с условиями эксперимента В. Райта (угловой размер поля зрения 2° и темновая адаптация), однако методика исследования, принятая Гилдом, значительно отличалась от методики Райта. Смешение цветов осуще-

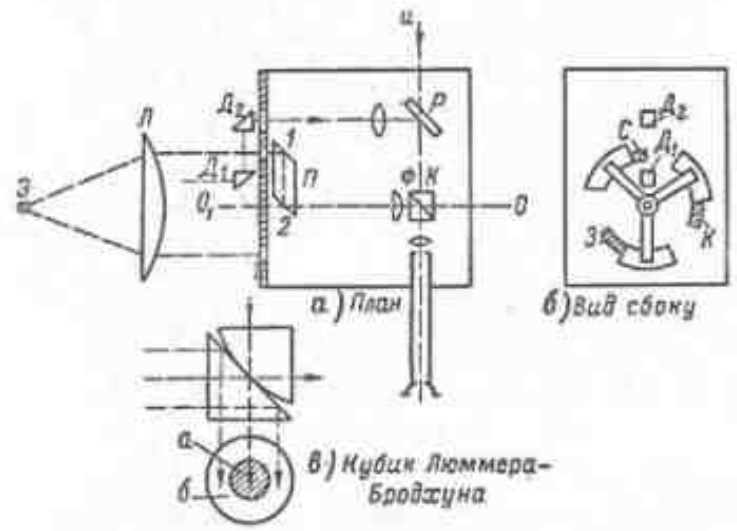


Рис. 2-14.
а—план; *б*—вид сбоку; *в*—кубок Люммера-Бродхуна.

ствлялось на колориметре Гилда. В этом приборе смешиваемые цвета попадают в глаз наблюдателя попеременно с частотой мелькания выше критической. Такой принцип смешения цветов осуществлен в колориметре Гилда вращением призмы $П$ вокруг оси O_2O (рис. 2-14,*а* и *б*). На первую грань призмы $П$ падает пучок лучей от эталонного источника света $Э$, предварительно пройдя конденсорную линзу $Л$ и один из трех вырезов в передней крышке корпуса прибора в виде кольцевых сегментов. Каждый из этих сегментов перекрыт цветным фильтром: красным, зеленым и синим. Излучение, прошедшее сквозь один из этих фильтров, падая на грань *1* призмы $П$, отражается на грань *2* и от нее направляется по оси O_1O на фотометрический кубик $ФК$.

Фотометрический кубик Люммер-Бродхуна склеен из двух прямоугольных призм в центральной части *а* гипотенузных граней, одна из которых сошлифована (рис. 2-14,*в*). На периферии гипотенузной части вследствие отсутствия оптического контакта луч претерпевает полное отражение и направляется в окуляр прибора. Вследствие того, что на грань *1* быстро вращающейся призмы $П$ поочередно попадают излучения, прошедшие через синий, зеленый и красный фильтры, периферическая часть *б* (рис. 2-14,*а* и *б*) поля зрения наблюдателя будет заполняться поочередно тремя цветными

излучениями, воспринимаемыми глазом при сверхкритической частоте их мелькания как их оптическая смесь.

Цвет смеси трех излучений регулируется уменьшением угловых размеров сегментов (красного, зеленого и синего) с помощью непрозрачных заслонок и этим подравнивается с цветом исследуемого излучения, поступающим в глаз наблюдателя через пришлифованную и склеенную центральную часть гипотенузных граней двух призм. Для уравнения цвета центральной и периферической частей поля зрения при исследовании однородных излучений предусмотрена возможность уменьшения их чистоты путем подмешивания к ним белого, отраженного от двух прямоугольных призм $Д_1$, $Д_2$, и плоско-параллельной пластинки P. Схема опытов Гилда показывает, что он пользовался в качестве основных цветов не однородными излучениями,

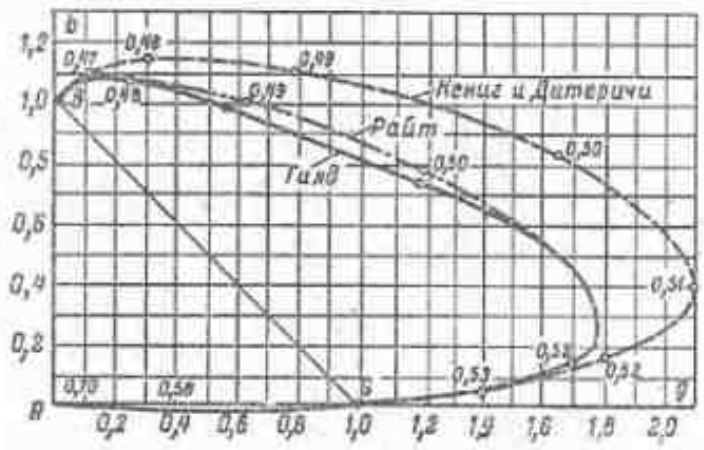


Рис. 2-15.

а сложными цветами, получаемыми после прохождения эталонного белого излучения через красный, зеленый и синий фильтры.

Преобразовывая полученные результаты, так же как и результаты исследования Райта, на основные цвета однородных излучений R, G и B ($\lambda_B = 0{,}4358$ *мк*, $\lambda_G = 0{,}5461$ *мк* и $\lambda_R = 0{,}700$ *мк*), принятые МКО, Гилд получил вполне удовлетворительное согласование (рис. 2-15).

На этой же диаграмме нанесена кривая цветности однородных излучений по данным Кенига и Дитеричи. Сопоставление трех кривых цветности позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении данных Гилда и Райта также и со старыми данными Кенига и Дитеричи для излучений с длинами волн $\lambda \geqslant 0{,}53$ *мк*. Резкое расхождение прежних данных с результатами опытов Гилда и Райта в области голубых и синих излучений $\lambda < 0{,}53$ *мк* следует объяснить недостаточной точностью измерений в этой области спектра, что особенно имело место в то время, когда проводились исследования Кенигом и Дитеричи. Хорошее согласование результатов двух исследований, проведенных двумя авторами различными методами, позволило МКО рекомендовать результаты работы Райта и Гилда в качестве цветовых характеристик среднего глаза.

Результаты колориметрического сравнения смеси трех основных реальных цветов системы MNP с исследуемым однородным излучением длиной волны λ позволяют установить MNP-компоненты исследуемого цвета и расчетом определить

его координаты — m'_λ, n'_λ и p'_λ и удельные координаты $\bar{m}_\lambda$, $\bar{n}_\lambda$ и $\bar{p}_\lambda$:

$$m'_\lambda = \frac{(B_M)_\lambda}{683 L_M};\quad n'_\lambda = \frac{(B_N)_\lambda}{683 L_N} \text{ и } p'_\lambda = \frac{(B_P)_\lambda}{683 L_P},$$

где $(B_M)_\lambda$, $(B_N)_\lambda$ и $(B_P)_\lambda$ — яркостные значения MNP-компонентов цвета однородного излучения λ.

Для определения удельных координат исследуемого цвета необходимо значения его координат цвета m'_λ, n'_λ и p'_λ, полученные из опыта, привести к $B_\lambda = 1$ *вт·м*$^{-2}$*·стер*$^{-1}$:

$$\bar{m}_\lambda = \frac{m'_\lambda}{B_\lambda};\quad \bar{n}_\lambda = \frac{n'_\lambda}{B_\lambda} \text{ и } \bar{p}_\lambda = \frac{p'_\lambda}{B_\lambda}$$

или

$$\bar{m}_\lambda = 683 K_\lambda \frac{m'_\lambda}{B_\lambda};\quad \bar{n}_\lambda = 683 K_\lambda \frac{n'_\lambda}{B_\lambda} \text{ и } \bar{p}_\lambda = 683 K_\lambda \frac{p'_\lambda}{B_\lambda}, \qquad (2\text{-}34)$$

где B_λ — лучистая яркость исследуемого однородного излучения, *вт·м*$^{-2}$*·стер*$^{-1}$;

$B_\lambda = (B_M)_\lambda + (B_N)_\lambda + (B_P)_\lambda$ — яркость того же излучения, *нт*;

K_λ — значение относительной видности исследуемого однородного излучения.

Так как координаты любого единичного цвета равны его координатам цветности, а его яркость численно равна яркостному коэффициенту, умноженному на 683, получим:

$$\bar{m}_\lambda = K_\lambda \frac{m_\lambda}{L_\lambda};\quad \bar{n}_\lambda = K_\lambda \frac{n_\lambda}{L_\lambda} \text{ и } \bar{p}_\lambda = K_\lambda \frac{p_\lambda}{L_\lambda}, \qquad (2\text{-}35)$$

где L_λ — яркостный коэффициент исследуемого однородного излучения.

Как было показано, ординаты кривых сложения численно определяют количество m', n' и p' компонентов смеси, выраженное в единицах основных цветов системы, необходимое для воспроизведения цвета однородного излучения мощностью 1 *вт·м*$^{-2}$*·стер*$^{-1}$.

Следовательно, расчет координат цвета любого однородного излучения с лучистой яркостью B_λ определится согласно (2-34), как

$$m'_\lambda = \bar{m}_\lambda B_\lambda;\quad n'_\lambda = \bar{n}_\lambda B_\lambda;\quad p'_\lambda = \bar{p}_\lambda B_\lambda \qquad (2\text{-}36)$$

или

$$dm'(\lambda) = \bar{m}(\lambda)\, b(\lambda)\, d\lambda;\quad dn'_\lambda = \bar{n}(\lambda)\, b(\lambda)\, d\lambda;\quad dp'_\lambda = \bar{p}(\lambda)\, b(\lambda)\, d\lambda, \qquad (2\text{-}37)$$

где $b(\lambda)$ — функция спектральной интенсивности лучистой яркости, $вт \cdot м^{-2} \cdot стер^{-1} \cdot мк^{-1}$, исследуемого излучения;

$\bar{m}(\lambda)$, $\bar{n}(\lambda)$ и $\bar{p}(\lambda)$ — функции сложения в системе MNP.

Взаимосвязь функций сложения любых колориметрических систем, выбор основных цветов которых должен удовлетворять лишь только закону Грассмана, позволяет записывать условия одинаковой яркости, одноцветности и тождественности цветов двух сравниваемых излучений не только в системе *КЗС*, но также в любой другой колориметрической системе. В соответствии с (2-4), (2-4а) и (2-37) можно записать эти условия в произвольно выбранной колориметрической системе MNP для излучений со спектральными составами $b_1(\lambda)$ и $b_2(\lambda)$ следующими равенствами:

а) условие равенства яркости $B_1 = B_2$

$$L_M \int b_1(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda + L_N \int b_1(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda + L_P \int b_1(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda =$$

$$= L_M \int b_2(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda + L_N \int b_2(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda + L_P \int b_2(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,p\lambda; \quad (2\text{-}38)$$

б) условие одноцветности излучений $m_1 = m_2$ и $n_1 = n_2$

$$\left.\begin{aligned} \int b_1(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda &= a\int b_2(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda; \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}39)$$

в) условия тождественности цвета излучений $m_1' = m_2'$, $n_1' = n_2'$ и $p_1' = p_2'$

$$\left.\begin{aligned} \int b_1(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda; \\ \int b_1(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda &= \int b_2(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}40)$$

Приемники колориметрической системы. Функции сложения $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{n}(\lambda)$ и $\bar{p}(\lambda)$ можно рассматривать согласно системе (2-1) не только как пропорции смеси основных цветов $\vec{M}\vec{N}\vec{P}$, зрительно тождественной цвету соответствующего однородного излучения, но так же и как кривые спектральной чувствительности трех приемников. Реакции каждого из трех приемников системы согласно (2-6) пропорциональны соответствующим компонентам цвета, выраженным в единичных значениях основных цветов. Следовательно, реакции таких приемников на излучение любого спектрального состава будут пропорциональны координатам цвета этого излучения. Совокупность трех таких

приемников, например трех фотоэлементов с цветными корригирующими фильтрами, позволит устанавливать колориметрическое тождество, так же как и путем визуального колориметрического эксперимента.

В том случае, когда коэффициенты пропорциональности между значениями спектральной чувствительности таких фотоэлементов $g_M(\lambda)$, $g_N(\lambda)$, $g_P(\lambda)$ и ординатами кривых сложения будут одинаковы, показания измерительных приборов, включенных в цепи этих фотоэлементов, определят координаты цвета m', n' и p':

$$\left.\begin{aligned} m' &= \int b(\lambda)\,\bar{m}(\lambda)\,d\lambda = c\int b(\lambda)\,g_M(\lambda)\,d\lambda = ci_M; \\ n' &= \int b(\lambda)\,\bar{n}(\lambda)\,d\lambda = c\int b(\lambda)\,g_N(\lambda)\,d\lambda = ci_N; \\ p' &= \int b(\lambda)\,\bar{p}(\lambda)\,d\lambda = c\int b(\lambda)\,g_P(\lambda)\,d\lambda = ci_P. \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}41)$$

где i_M, i_N и i_P — токи в цепи фотоэлементов со спектральными чувствительностями $g_M(\lambda)$, $g_N(\lambda)$ и $g_P(\lambda)$.

Этот способ широко применяется при измерении цвета с помощью фотоэлектрических колориметров (§ 2-23).

Соответствие кривых сложения с кривыми спектральной чувствительности приемников позволяет сделать следующие выводы [Л. 12]:

1. Три приемника с кривыми спектральной чувствительности, подобными любым из возможных трех кривых сложения, позволяют устанавливать зрительную тождественность сравниваемых излучений (для среднего глаза).

2. Все кривые сложения, имеющие отрицательные ветви, не могут являться кривыми спектральной чувствительности трех приемников колориметрической измерительной системы, так как понятие отрицательной чувствительности приемника нереально[1].

3. Неизбежность наличия отрицательных координат цвета в любой системе с реальными основными цветами вызывает необходимость применения нереальных цветов в любой трехкомпонентной *колориметрической измерительной системе.*

Колориметрические характеристики и цветовые ощущения. Из предыдущего следует, что любой цвет можно выразить уравнением через основные цвета, взятые в количествах, определяемых кривыми сложения. Любой цвет можно выразить также совокупностью реакций трех приемников, кривые спектральной чувствительности которых соответствуют одной из множества троек кривых сложения. Эти принципы, по-

[1] Отрицательную ветвь кривой чувствительности можно воспроизвести применением двух приемников (фотоэлементов), включенных навстречу друг другу.

ложенные в основу современной колориметрии, определяются трехмерностью и аддитивностью цвета. Все колориметрические системы, имеющие в своей основе три основных цвета и соответствующие им три кривые сложения, трехмерны вследствие того, что любой цвет выражается через три качественно различных основных цвета, подчиняющихся правилу аддитивности.

Измерительные колориметрические системы, имеющие в своей основе три приемника со спектральными чувствительностями, подобными одной из возможных троек кривых сложения, также трехмерны. Их трехмерность определяется выражением любого цвета тремя реакциями приемников, аддитивными в силу аддитивности самого понятия эффективных величин излучения, определяемых с учетом спектральной чувствительности приемников (ч. I, § 1-23).

В колориметрической практике расчетная и измерительная системы могут быть общими, если кривые спектральной чувствительности приемников подобны кривым сложения основных цветов. Эти системы могут быть неодинаковыми при различии основных цветов расчетной и измерительной систем. Понятие об основных цветах измерительной системы определяется взаимозаменяемостью понятий о кривых сложения и кривых спектральной чувствительности. Как показал Мак-Адам [Л. 13], форма кривой сложения для каждого основного цвета колориметрической системы определяется положением прямой, соединяющей точки цветностей двух других основных цветов на плоскости диаграммы цветности (§ 2-23).

Вполне понятно, что различие основных цветов измерительной и расчетной колориметрических систем требует пересчета результатов измерения для определения координат цвета и цветности в расчетной системе. Такое различие измерительной и расчетной систем имеет место в практике цветовых измерений (§ 2-23), цветового телевидения (§ 2-22), цветного кино (§ 2-20) и в других областях применения цвета.

Инженерные методы оценки и характеристики цвета, основанные на его аддитивности и трехмерности, построены на применении колориметрических систем. Численные выражения цвета тремя его координатами или другими колориметрическими характеристиками, например яркостью, цветовым тоном и чистотой цвета, могут отличаться от характеристик ощущения цвета в результате индивидуального отличия спектральных характеристик глаза наблюдателя от трех кривых спектральной чувствительности *кзс*-приемников среднего глаза. Такое отличие действительных кривых спектральной чувствительности от стандартизованных наиболее резко выражено у лиц с некормальным цветовым зрением (§ 1-10).

Отличие кривых наблюдается также в условиях неустановившихся зрительных процессов цветовой адаптации, когда чувствительность какого-либо из трех *кзс*-рецепторов зрительного анализатора может быть значительно понижена в результате предшествующего интенсивного возбуждения. Следовательно, цветность излучения тождественна ощущению цветности во всех случаях, когда соотношение чувствительностей *кзс*-рецепторов сохраняется таким же, как и в условиях определения кривых сложения. Как было показано (§ 1-10), соотношение уровней чувствительности *кзс*-рецепторов, изменяющееся в процессах цветовой адаптации, в основном определяется концентрацией молекул *кзс*-реагентов. Следует также указать, что цветность исследуемого излучения однозначно определяет ощущение цветности в условиях яркости такого же порядка, как и при измерениях функций спектральной чувствительности $\bar{\kappa}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$ при отсутствии резко контрастирующих смежных цветовых полей, а также при достаточных угловых размерах полей сравнения.

Для максимального приближения колориметрических характеристик цвета к характеристикам его зрительного ощущения необходимо принять некоторые условия экспериментального определения исходных данных для колориметрических систем, а также для визуальных колориметрических сопоставлений цветов и их смесей.

К числу этих условий в первую очередь необходимо отнести:

а) уровень яркости полей сравнения, равный или больший 10 *нт* для обеспечения преимущественно колбочкового зрения;

б) неограниченное время сравнения исследуемых цветов для обеспечения установившегося зрительного процесса;

в) достаточно большой угловой размер полей сравнения $\alpha = 10°$ для максимального приближения колориметрических сопоставлений с действительными условиями цветового зрения;

г) наличие нескольких наблюдателей, участвующих в колориметрических сравнениях цветов и их смесей.

ПРАКТИЧЕСКИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

2-5. Преобразование систем

Расчет координат основных цветов новой системы. Различные требования, выдвигаемые практикой воспроизведения цвета перед современной колориметрией, привели к созданию и использованию нескольких практических систем количественного выражения и классификации всего многообразия цветов. В каждой практической колориметрической системе любой цвет однозначно определяется тремя координатами, выражающими количества основных цветов этой системы. Математическое выражение любого цвета тождественной совокупностью трех основных цветов записывается цветовым урав-

нением (2-5) или (2-14). Основные цвета каждой колориметрической системы выбираются (§ 2-4) в соответствии с условиями практики использования диаграммы цветности и всей системы в целом.

Практическая целесообразность использования нескольких колориметрических систем выдвигает необходимость наличия методов перехода от количественных выражений цвета в одной системе на аналогичные выражения того же цвета в другой системе. Перевод координат цвета одной системы на координаты того же цвета другой системы является основой преобразования колориметрических систем. Вследствие невозможности определения опытным путем координат любого цвета в системе с нереальными основными цветами метод преобразования является единственным способом определения кривых сложения для таких колориметрических систем. Из закона Грассмана следует, что между координатами любого цвета в разных системах должна быть линейная зависимость. Согласно этому основой аналитических методов преобразования колориметрических систем должно являться решение систем линейных уравнений [Л. 14—18 и 4].

Рассмотрим некоторый общий случай преобразования колориметрической системы, основные цвета которой M, N и P нам известны. Будем в последующем называть эту систему прежней в отличие от новой колориметрической системы с основными цветами U, V и W, определение которых и составляет задачу преобразования прежней системы MNP в новую — UVW. Для решения этой задачи напишем цветовые уравнения новых основных цветов в пространственных координатах прежней колориметрической системы:

$$\left.\begin{aligned} U &\equiv m'_U M + n'_U N + p'_U P; \\ V &\equiv m'_V M + n'_V N + p'_V P; \\ W &\equiv m'_W M + n'_W N + p'_W P, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}42)$$

где M, N, P — основные цвета прежней системы;
U, V, W — основные цвета новой системы;
$m'_U m'_V m'_W$; $n'_U n'_V n'_W$; $p'_U p'_V p'_W$ — координаты основных цветов новой системы в прежней колориметрической системе.

Приведенная система уравнений (2-42) показывает, что для преобразования одной колориметрической системы в другую необходимо знать девять прежних координат основных цветов новой системы. Выбор этих девяти координат цвета, полностью

определяющий свойства новой системы, удобнее всего начинать с выбора направлений векторов основных цветов новой системы $\vec{U}$, $\vec{V}$, $\vec{W}$ в цветовом пространстве прежней колориметрической системы.

Согласно закону Грассмана, векторы основных цветов новой системы не должны располагаться в одной плоскости. Из соображений удобства пользования желательно, чтобы сумма новых основных цветов создавала белый цвет, такой же как и сумма прежних основных цветов. Вполне понятно, что выполнение этого условия определяется выбором не только направления основных цветов новой системы, но также и их яркости. Обычно основные цвета системы располагаются в красной, зеленой и синей частях цветового пространства, что обеспечивает наиболее полное заполнение цветового пространства конусом реальных цветов и минимум отрицательных координат в колориметрических системах с реальными основными цветами. Для обеспечения полного отсутствия отрицательных координат любого реального цвета, как было показано ранее (§ 2-4), основные цвета системы необходимо выбирать нереальными (§ 2-2). Выбранные направления векторов новых основных цветов фиксируются их координатами цветности на плоскости единичных цветов прежней колориметрической системы, т. е. на прежней диаграмме цветности (рис. 2-10 и 2-11).

Выбором шести координат цветности основных цветов новой системы m_U, n_U, m_V, n_V, m_W и n_W уменьшаем число неизвестных новой системы в (2-42) до трех — σ_U, σ_V и σ_W:

$$\left.\begin{aligned} U &\equiv m_U \sigma_U M + n_U \sigma_U N + p_U \sigma_U P; \\ V &\equiv m_V \sigma_V M + n_V \sigma_V N + p_V \sigma_V P; \\ W &\equiv m_W \sigma_W M + n_W \sigma_W N + p_W \sigma_W P, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}43)$$

где $\sigma_U = m'_U + n'_U + p'_U$; $\sigma_V = m'_V + n'_V + p'_V$ и $\sigma_W = m'_W + n'_W + p'_W$.

Для аналитического определения суммы координат новых основных цветов воспользуемся условием тождественности исходных белых цветов равноинтенсивного излучения в прежней и новой системах. Для удобства построения новой колориметрической системы часто тождественность единичных белых цветов заменяется требованием одинакового направления их векторов в цветовом пространстве, следовательно, равенством их координат цветности. В этом случае яркости исходных белых цветов прежней и новой систем будут отличаться в a раз. Это условие может быть записано следующим равенством:

$$M + N + P = (U + V + W)\,a \qquad (2\text{-}44)$$

или

$$L_M + L_N + L_P = (L_U + L_V + L_W)\,a, \qquad (2\text{-}44а)$$

где a — количественное соотношение исходных белых цветов прежней и новой системы.

Условию тождества исходных белых цветов двух систем соответствует $a = 1$.

Решая совместно уравнения (2-43) и (2-44), получим новую систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\left.\begin{aligned} m_U\sigma_U + m_V\sigma_V + m_W\sigma_W &= \frac{1}{a};\\ n_U\sigma_U + n_V\sigma_V + n_W\sigma_W &= \frac{1}{a};\\ p_U\sigma_U + p_V\sigma_V + p_W\sigma_W &= \frac{1}{a}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}45)$$

Определитель вновь полученной системы уравнений с неизвестными σ_U, σ_V и σ_W имеет вид[1]:

$$D_1 = \begin{vmatrix} m_U & m_V & m_W \\ n_U & n_V & n_W \\ p_U & p_V & p_W \end{vmatrix}. \qquad (2\text{-}46)$$

Суммы координат основных цветов новой системы, определяющие при выбранном их направлении величины этих цветов, находим из следующих соотношений:

$$\sigma_U = \frac{1}{aD_1}\begin{vmatrix} 1 & m_V & m_W \\ 1 & nv & n_W \\ 1 & p_V & p_W \end{vmatrix};\ \sigma_V = \frac{1}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & 1 & m_W \\ n_U & 1 & n_W \\ p_U & 1 & p_W \end{vmatrix};\ \sigma_W = \frac{1}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & m_V & 1 \\ n_U & n_V & 1 \\ p_U & p_V & 1 \end{vmatrix}. \qquad (2\text{-}47)$$

Искомые значения координат основных цветов новой системы в координатном пространстве прежней системы определяют-

[1] Определитель системы имеет индекс «1» потому, что он определяет суммы координат новых основных (единичных) цветов.

ся произведением выбранных координат цветности на соответствующую сумму координат цвета, найденную из (2-47):

$$\left.\begin{aligned} m'_U &= \frac{m_U}{aD_1}\begin{vmatrix} 1 & m_V & m_W \\ 1 & n_V & n_W \\ 1 & p_V & p_W \end{vmatrix};\ n'_U = \frac{n_U}{aD_1}\begin{vmatrix} 1 & m_V & m_W \\ 1 & n_V & n_W \\ 1 & p_V & p_W \end{vmatrix};\ p'_U = \frac{p_U}{aD_1}\begin{vmatrix} 1 & m_V & m_W \\ 1 & n_V & n_W \\ 1 & p_V & p_W \end{vmatrix};\\ m'_V &= \frac{m_V}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & 1 & m_W \\ n_U & 1 & n_W \\ p_U & 1 & p_W \end{vmatrix};\ n'_V = \frac{n_V}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & 1 & m_W \\ n_U & 1 & n_W \\ n_U & 1 & n_W \end{vmatrix};\ p'_V = \frac{p_V}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & 1 & m_W \\ n_U & 1 & n_W \\ p_U & 1 & p_W \end{vmatrix};\\ m'_W &= \frac{m_W}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & m_V & 1 \\ n_U & n_V & 1 \\ p_U & p_V & 1 \end{vmatrix};\ n'_W = \frac{n_W}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & m_V & 1 \\ n_U & n_V & 1 \\ p_U & p_V & 1 \end{vmatrix};\ p'_W = \frac{p_W}{aD_1}\begin{vmatrix} m_U & m_V & 1 \\ n_U & n_V & 1 \\ p_U & p_V & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}48)$$

Расчет координат цвета в новой системе. Вычисленные значения координат новых основных цветов полностью определяют новую колориметрическую систему. Для иллюстрации этого рассмотрим примеры расчета координат цвета и координат цветности в новой системе произвольно выбранного цвета по заданным его координатам в прежней системе MNP.

Напишем цветовые уравнения заданного (произвольно выбранного) цвета в новой и старой системах:

$$\Phi \equiv m'M + n'N + p'P; \qquad (2\text{-}49)$$

$$\Phi \equiv u'U + v'V + w'W. \qquad (2\text{-}50)$$

Подставляя в (2-50) выражения новых основных цветов через прежние основные цвета (2-42), получим:

$$\Phi \equiv (m'_U u' + m'_V v' + m'_W w')\,M + (n'_U u' + n'_V v' + n'_W w')\,N + (p'_U u' + p'_V v' + p'_W w')\,P. \qquad (2\text{-}51)$$

Из сопоставления (2-49) и (2-51) получим систему уравнений, позволяющую рассчитать координаты любого цвета в новой системе UVW, если известны координаты этого цвета в прежней системе MNP:

$$\left.\begin{aligned} m' &= m'_U u' + m'_V v' + m'_W w';\\ n' &= n'_U u' + n'_V v' + n'_W w';\\ p' &= p'_U u' + p'_V v' + p'_W w'. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}52)$$

Определитель полученной системы уравнений найдем из следующего выражения:

$$D = \begin{vmatrix} m'_U & m'_V & m'_W \\ n'_U & n'_V & n'_W \\ p'_U & p'_V & p'_W \end{vmatrix}. \qquad (2\text{-}53)$$

Нетрудно убедиться, что определитель D отличается от определителя D_1 системы уравнений (2-45) лишь постоянным множителем $\sigma_U\sigma_V\sigma_W$:

$$D = \sigma_U\sigma_V\sigma_W D_1. \qquad (2\text{-}54)$$

Решая систему уравнений (2-52) относительно новых координат цвета Ф, получим:

$$u' = \frac{1}{D}\begin{vmatrix} m' & m'_V & m'_W \\ n' & n'_V & n'_W \\ p' & p'_V & p'_W \end{vmatrix}; \quad v' = \frac{1}{D}\begin{vmatrix} m'_U & m' & m'_W \\ n'_U & n' & n'_W \\ p'_U & p' & p'_W \end{vmatrix};$$

$$w' = \frac{1}{D}\begin{vmatrix} m'_U & m'_V & m' \\ n'_U & n'_V & n' \\ p'_U & p'_V & p' \end{vmatrix}. \qquad (2\text{-}55)$$

Развертывая определители и производя простейшие перегруппироаки членов, получим расчетные уравнения:

$$\left.\begin{aligned} u' &= \frac{1}{D}[m'(n'_V p'_W - n'_W p'_V) - n'(m'_V p'_W - m'_W p'_V) + \\ &\quad + p'(m'_V n'_W - m'_W n'_V)]; \\ v' &= \frac{1}{D}[-m'(n'_U p'_W - n'_W p'_U) + n'(m'_U p'_W - m'_W p'_U) - \\ &\quad - p'(m'_U n'_W - m'_W n'_U)]; \\ w' &= \frac{1}{D}[m'(n'_U p'_V - n'_V p'_U) - n'(m'_U p'_V - m'_V p'_U) + \\ &\quad + p'(m'_U n'_V - m'_V n'_U)]. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}56)$$

Нетрудно видеть, что (2-56), определяющие новые координаты цвета, линейны относительно прежних координат цвета

того же излучения. Эти линейные уравнения принято записывать в следующем более общем виде:

$$\left.\begin{aligned} u' &= a_{11}m' + a_{12}n' + a_{13}p'; \\ v' &= a_{21}m' + a_{22}n' + a_{23}p'; \\ w' &= a_{31}m' + a_{32}n' + a_{33}p', \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}57)$$

где коэффициенты a_{ij} зависят лишь от координат новых основных цветов в старой координатной системе [уравнение (2-56)]. Сопоставляя полученное семейство уравнений с семейством (2-52), можно видеть, что коэффициенты a_{ij} являются новыми координатами прежних основных цветов:

$$\left.\begin{aligned} a_{11} &= u'_M;\ a_{12} = u'_N;\ a_{13} = u'_P; \\ a_{21} &= v'_M;\ a_{22} = v'_N;\ a_{23} = v'_P; \\ a_{31} &= w'_M;\ a_{32} = w'_N;\ a_{33} = w'_P. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}58)$$

Пользуясь (2-57), можно рассчитать новые координаты цвета любого однородного излучения, следовательно, можно рассчитать ординаты кривых сложения новой системы по значениям удельных координат цвета прежней системы:

$$\left.\begin{aligned} \bar{u}(\lambda) &= a_{11}\bar{m}(\lambda) + a_{12}\bar{n}(\lambda) + a_{13}\bar{p}(\lambda); \\ \bar{v}(\lambda) &= a_{21}\bar{m}(\lambda) + a_{22}\bar{n}(\lambda) + a_{23}\bar{p}(\lambda); \\ \bar{w}(\lambda) &= a_{31}\bar{m}(\lambda) + a_{32}\bar{n}(\lambda) + a_{33}\bar{p}(\lambda). \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}59)$$

Расчет координат цветности в новой системе. Для расчета координат цветности заданного излучения определим сумму координат его цвета в новой цветовой системе. Применяя для этой цели свойства сумму определителей, получим на основе системы уравнений (2-55):

$$u' + v' + w' = \frac{1}{D}\begin{vmatrix} m' & (m'_U - m'_V) & (m'_U - m'_W) \\ n' & (n'_U - n'_V) & (n'_U - n'_W) \\ p' & (p'_U - p'_V) & (p'_U - p'_W) \end{vmatrix}. \qquad (2\text{-}60)$$

Координаты цветности заданного излучения определяются частным деления (2-55) на (2-60):

$$u = \frac{1}{d}\begin{vmatrix} m & m'_V & m'_W \\ n & n'_V & n'_W \\ p & p'_V & p'_W \end{vmatrix}; \quad v = \frac{1}{d}\begin{vmatrix} m'_U & m & m'_W \\ n'_U & n & n'_W \\ p'_U & p & p'_W \end{vmatrix}; \quad w = \frac{1}{d}\begin{vmatrix} m'_U & m'_V & m \\ n'_U & n'_V & n \\ p'_U & p'_V & p \end{vmatrix}, \qquad (2\text{-}61)$$

где m, n, p — координаты цветности заданного излучения в прежней системе MNP;

$$d = \begin{vmatrix} m & (m'_U - m'_V) & (m'_U - m'_W) \\ n & (n'_U - n'_V) & (n'_U - n'_W) \\ p & (p'_U - p'_V) & (p'_U - p'_W) \end{vmatrix} \cdot \qquad (2\text{-}62)$$

В определителях (2-55) координаты цвета m', n', p' заменены координатами цветности того же излучения m, n, p, что вполне допустимо, так как такая замена соответствует делению числителя (2-61) и знаменателя (2-62) на сумму координат $\sigma = m' + n' + p'$.

Структура уравнений преобразования координат цветности является дробно-линейной [Л. 23], так как координаты цветности прежней системы входят в числитель и знаменатель расчетных уравнений (2-61) и (2-62):

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{(a_{11} - a_{12})\,m + (a_{12} - a_{13})\,n + a_{13}}{(a_1 - a_2)\,m + (a_2 - a_3)\,n + a_3}; \\ v &= \frac{(a_{21} - a_{22})\,m + (a_{22} - a_{23})\,n + a_{23}}{(a_1 - a_2)\,m + (a_2 - a_3)\,n + a_3}; \\ w &= \frac{(a_{31} - a_{32})\,m + (a_{32} - a_{33})\,n + a_{33}}{(a_1 - a_2)\,m + (a_2 - a_3)\,n + a_3} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}63)$$

где

$$a_1 = a_{11} + a_{21} + a_{31};$$
$$a_2 = a_{12} + a_{22} + a_{32};$$
$$a_3 = a_{13} + a_{21} + a_{33}.$$

Пользуясь (2-63), можно рассчитать координаты цветности однородных излучений с различными длинами волн и построить в новой координатной плоскости граничную кривую поля реальных цветов.

Преобразование прежней колориметрической системы в новую требует расчета трех функций сложения новых основных цветов, для точного определения каждой из которых необходимо рассчитать не менее сорока удельных координат монохроматических излучений. Расчет каждой координаты цвета требует согласно (2-57) выполнения четырех расчетных операций. Из этого следует, что аналитическое преобразование одной системы в другую связано с очень большим числом расчетных операций. Для освобождения от большого количества кропотливых расчетов при необходимости пересчета многих координат пользуются графиками или номограммами. Графические методы преобразования колориметрических систем основаны на теоремах проективной геометрии [Л. 19—21].

2-6. Система *RGB*

Основные цвета R, G и B. До 1931 г. не существовало единой колориметрической системы. Выбор основных цветов для

количественного выражения описываемого цвета производился почти каждым исследователем по своему усмотрению, часто определяемому лишь удобством проведения колориметрического сопоставления на экспериментальной установке.

Так, Д. К. Максвелл [Л. 17] выбрал основными цвета однородных излучений с длинами волн $\lambda_M = 0{,}457$ *мк*, $\lambda_N = 0{,}528$ *мк* и $\lambda_P = 0{,}630$ *мк*. А. Кенг и Дитерици [Л. 8] пользовались в качестве основных цветов пересальными цветами, среди которых наибольшей чистотой обладал зеленый цвет. С 1922 г. в США основными цветами были приняты два крайних цвета спектра—красный и фиолетовый и третьим — монохроматический цвет зеленый с длиной волны $\lambda = 0{,}503$ *мк*.

Наличие многих цветовых систем в значительной мере затрудняло пользование результатами экспериментальных исследований, так как сопоставление результатов двух экспериментов требовало перехода от одних основных цветов к другим. В связи с этими неудобствами на VIII сессии МКО (Международная комиссия по освещению) в 1931 г. было принято решение о выборе в качестве основных трех цветов однородных излучений с длинами волн $\lambda_R = 0{,}700$ *мк*, $\lambda_G = 0{,}5461$ *мк* и $\lambda_B = 0{,}4358$ *мк*. Выбор двух последних цветов определялся наличием в спектре излучения паров ртути мощных линий с длинами волн λ_G и λ_B, что в значительной мере облегчало задачу экспериментального исследования кривых сложения. Значения ординат кривых сложения (рис. 2-16) были приняты МКО усредненными по результатам двух работ — В. Райта [Л. 10] и И. Гилда [Л. 11].

Диаграмма цветности *r, g*. Как уже было показано (§ 2-5), для расположения точки белого равноинтенсивного излучения в центре диаграммы цветности, яркости основных цветов системы *RGB* было принято: $B_R = 683$ *нт*, $B_G = 3\,135$ *нт* и $B_B = 41$ *нт*. Такие количественные значения основных цветов системы обеспечивают также более благоприятное расположение на диаграмме цветности локуса однородных излучений (рис. 2-5). Анализируя расположение поля ре-

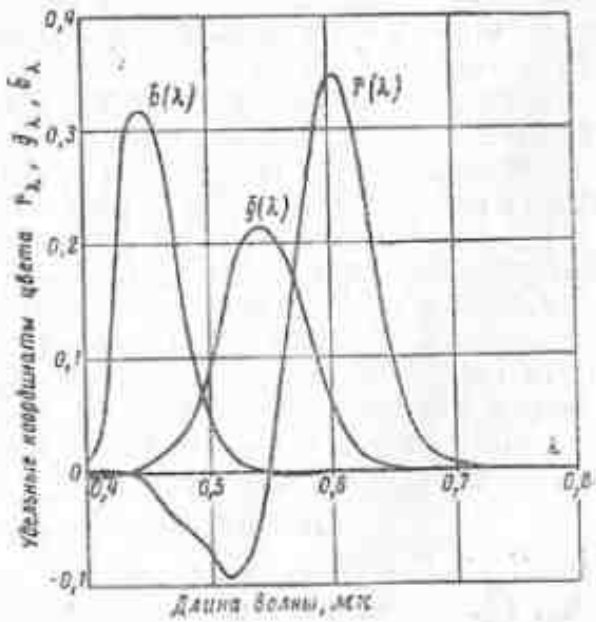


Рис. 2-16.

альных цветов на диаграмме *rgb* (рис. 2-17), можно сделать некоторые выводы:

1. Точки цветности однородных излучений на участке от $\lambda=0{,}77$ *мк* до $\lambda=0{,}56$ *мк* практически лежат на прямой $b=0$, вследствие чего при смешении однородных излучений на этом участке спектра получается цвет, чистота которого практически равна единице.

2. Векторы цветов однородных излучений с длинами волн $\lambda \geqslant 0{,}690$ *мк* имеют практически одинаковое направление, вследствие чего цветность совокупности этих цветов обозначена на цветовом графике одной точкой ($r=1$, $g=0$, $b=0$).

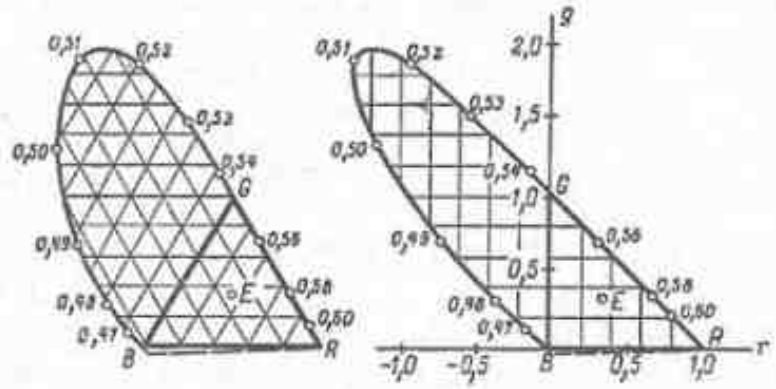


Рис. 2-17.

3. Для зеленых, голубых, синих и фиолетовых излучений красный компонент цвета отрицателен как для однородных излучений, так и для сложных с большой чистотой цвета. Цветности этих излучений характеризуются отрицательной координатой $r<0$.

4. Цветность чистых пурпурных излучений характеризуется отрицательной координатой $g<0$, что определяется отрицательным значением этой координаты цветности крайнего коротковолнового однородного излучения $\lambda \leqslant 0{,}40$ *мк*.

Из приведенных выводов следует, что основным недостатком системы *RGB* является наличие отрицательных координат (рис. 2-16 и 2-17) для большой группы реальных цветов (приложение 1). Отрицательные координаты затрудняют расчеты цвета излучения по его спектральному составу. Вторым недостатком системы *RGB* является необходимость расчета всех трех компонентов цвета при определении количественной характеристики по цветовому уравнению

$$B=683\,(r'L_R+g'L_G+b'L_B), \qquad (2\text{-}64)$$

где r', g', b' — координаты цвета;
L_R, L_G, L_B — яркостные коэффициенты основных цветов системы.

Координаты цветности определятся в соответствии с (2-7) и (2-7а):

$$\left.\begin{aligned} r&=\frac{r'}{r'+g'+b'};\\ g&=\frac{g'}{r'+g'+b'}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}65)$$

Для устранения второго недостатка системы необходимо иметь два основных цвета с яркостными коэффициентами, равными нулю. Вполне понятно, что устранение и первого и второго недостатков системы *RGB* требует, чтобы все три основных цвета новой системы были нереальными. Такая система с нереальными основными цветами *XYZ* была также принята на VIII сессии МКО в 1931 г.

Опыт практического применения колориметрических систем со времени утверждения первой системы в 1931 г. показал недостаточную точность кривых сложения, рассчитываемых по результатам экспериментов Райта и Гилда, что было отмечено в 1955 г. решением XIII сессии МКО. Отмечая недостаточную точность экспериментальных данных для расчета кривых сложения, в особенности в области коротких волн, XIII сессия МКО рекомендовала для дальнейших исследований функций сложения принимать:

а) угловые размеры полей сравнения 10°;

б) участие в экспериментах не менее десяти наблюдателей с нормальным цветовым зрением — средним для лиц 30-летнего возраста;

в) определение зрительного тождества полей сравнения из условий равенства цветностей.

2-7. Международная система *XYZ*

Основные цвета *X*, *Y* и *Z*. В основу построения системы *XYZ*, рекомендованной VIII сессией МКО для колориметрической практики, были положены следующие условия:

1. Координаты цветности всех реальных цветов должны лежать внутри координатного треугольника, следовательно, все реальные цвета должны иметь только положительные координаты: $x'\geqslant 0$; $y'\geqslant 0$; $z'\geqslant 0$.

2. Количественная характеристика цвета должна полностью определяться одним его компонентом (*Y*-компонент цвета).

3. Координаты белого цвета равноинтенсивного излучения должны быть равными, следовательно, точки цветности этого излучения должны лежать в центре тяжести цветового треугольника.

Цветовое уравнение в системе *XYZ* можно записать аналогично (2-5) и (2-12):

$$\left.\begin{aligned} \Phi&\equiv x'X+y'Y+z'Z;\\ \vec{\Phi}&=x'\vec{X}+y'\vec{Y}+z'\vec{Z}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}66)$$

Следовательно, в соответствии с (2-23) яркость исследуемого цвета определится как

$$B = 683\,(x'L_X + y'L_Y + z'L_Z), \qquad (2\text{-}66а)$$

где x', y' и z' — координаты цвета;
X, Y и Z — основные цвета системы;
L_X, L_Y и L_Z — яркостные коэффициенты основных цветов.



Рис. 2-18.

В соответствии со вторым условием построения колориметрической системы XYZ яркостные коэффициенты основных цветов X и Z должны быть равны нулю:

$$L_X = 0 \text{ и } L_Z = 0.$$

Это требование обеспечивается расположением X, Z (вершин координатного треугольника новой системы) на алихне (рис. 2-18). Такой выбор основных цветов X и Z в значительной мере упрощает количественные расчеты, так как при $L_y = 1$ получим:

$$B = 683\,y'. \qquad (2\text{-}66б)$$

Цветность исследуемого излучения в системе XYZ определится, как и в любой другой системе, двумя координатами цветности:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{x'}{x' + y' + z'}; \\ y &= \frac{y'}{x' + y' + z'}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}67)$$

Для выбора направления $\vec{X}$, $\vec{Y}$ и $\vec{Z}$ рассмотрим возможное расположение точек цветности основных цветов в координатах прежней системы RGB*. Нанесем на цветовой прямоугольный график r, g (рис. 2-18) алихну, уравнение которой (2-26а)

$$g = -0{,}208\,r - 0{,}013.$$

Располагая точки X ($x = 1$; $y = 0$; $z = 0$) и Z ($x = 0$; $y = 0$; $z = 1$) на алихне, определяем расположение одной из сторон XZ

* Система RGB принята исходной (прежней) потому, что ее параметры можно определять экспериментально.

нового координатного треугольника, совпадающее с направлением алихны. Выбор расположения двух других сторон треугольника XYZ определится первым условием и стремлением максимального заполнения нового цветового треугольника полем реальных цветов. Согласно этим требованиям остальные две стороны координатного треугольника XYZ должны касаться или быть близко расположенными к граничной линии однородных излучений. Сторону XY принимаем касательной к граничной кривой на ее прямолинейном участке длинноволнового излучения. Такое расположение стороны XY координатного треугольника новой цветовой системы упрощает расчеты цвета по спектральному составу излучения, так как Z-компонент цвета на участке $\lambda \geqslant 0{,}56$ *мк* практически будет равен нулю. Выбор расположения третьей YZ-стороны треугольника произведем подбором, исходя из необходимости выполнения первого и третьего условий, положенных в основу новой системы. Условие $x_E = y_E = z_E = 0{,}3\,(3)$ выполняется при координатах точки Y ($r_Y = -1{,}739$; $g_Y = +2{,}767$) и точки Z ($r_Z = -0{,}743$; $g_Z = 0{,}141$). Выбранное расположение стороны YZ обеспечивает минимальное расстояние ее от граничной кривой цветности однородных излучений в точке $\lambda = 0{,}505$ *мк*. Координаты всех трех вершин координатного треугольника XYZ можно найти попарным совместным решением уравнений его сторон:

сторона XZ (алихна) $g + 0{,}208r + 0{,}013 = 0$;
сторона XY $g + 1{,}09r - 1{,}09 = 0$;
сторона YZ $g + 2{,}64r + 1{,}82 = 0$.

Выбранное расположение сторон координатного треугольника XYZ характеризуется следующими точными значениями координат цветности основных цветов новой системы в плоскости единичных цветов системы RGB:

$$r_X = 1{,}2750; \quad g_X = -0{,}2778; \quad b_X = 0{,}0028;$$

$$r_Y = -1{,}7393; \quad g_Y = 2{,}7673; \quad b_Y = -0{,}0280;$$

$$r_Z = -0{,}7431; \quad g_Z = 0{,}1409; \quad b_Z = 1{,}6022.$$

Для определения координат основных цветов новой системы дополнительно к их направлениям, зафиксированным девятью координатами цветности, необходимо вычислить суммы координат каждого основного цвета [уравнения (2-45)]. Решение этой системы уравнений возможно при известном значении коэффициента a, определяющего отношение сумм яркостных коэффициентов основных цветов прежней и новой систем. Зная яркостные

коэффициенты основных цветов новой системы $L_X=0$; $L_Y=1$ и $L_Z=0$, определим по (2-44а) коэффициент a:

$$a=\frac{L_R+L_G+L_B}{L_X+L_Y+L_Z}=5{,}65.$$

Решение системы уравнений (2-47) по выбранным координатам цветности и $a=5{,}65$ дает следующие значения сумм координат трех основных цветов в прежней координатной системе:

$$\sigma_X=0{,}3281;\ \sigma_Y=0{,}0912;\ \sigma_Z=0{,}1115.$$

Умножением координат цветностей основных цветов на сумму координат соответствующего основного цвета определим их координаты и запишем связь между основными цветами прежней и новой систем цветовыми уравнениями (2-42):

$$\left.\begin{aligned} X&=\ \ 0{,}4185R-0{,}0912G+0{,}0009B;\\ Y&=-0{,}1588R+0{,}2524G-0{,}0025B;\\ Z&=-0{,}0829R+0{,}0157G+0{,}1786B, \end{aligned}\right\}\qquad (2\text{-}68)$$

где $r'_X=0{,}4185$; $g'_X=-0{,}0912$; $b'_X=0{,}0009$;
$r'_Y=-0{,}1588$; $g'_Y=0{,}2524$; $b'_Y=-0{,}0025$;
$r'_Z=-0{,}0829$; $g'_Z=0{,}0157$; $b'_Z=0{,}1786$

— координаты основных цветов международной цветовой системы в координатном пространстве RGB.

Кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$. Пользуясь полученными значениями координат основных цветов X, Y, Z, напишем систему уравнений (2-57), позволяющую рассчитать новые координаты цвета любого излучения по его прежним координатам:

$$\left.\begin{aligned} x'&=a_{11}r'+a_{12}g'+a_{13}b';\\ y'&=a_{21}r'+a_{22}g'+a_{23}b';\\ z'&=a_{31}r'+a_{32}g'+a_{33}b', \end{aligned}\right\}\qquad (2\text{-}69)$$

где коэффициенты a_{ij} определяется согласно (2-56):

$$\left.\begin{aligned} a_{11}D&=g'_Yb'_Z-g'_Zb'_Y;\quad a_{12}D=r'_Zb'_Y-r'_Yb'_Z;\quad a_{13}D=r'_Yg'_Z-r'_Zg'_Y;\\ a_{21}D&=g'_Zb'_X-g'_Xb'_Z;\quad a_{22}D=r'_Xb'_Z-r'_Zb'_X;\quad a_{23}D=r'_Zg'_X-r'_Xg'_Z;\\ a_{31}D&=g'_Xb'_Y-g'_Yb'_X;\quad a_{32}D=r'_Yb'_X-r'_Xb'_Y;\quad a_{33}D=r'_Xg'_Y-r'_Yg'_X; \end{aligned}\right\}$$

(2-70)

Определитель D, входящий в каждое уравнение, найдем, пользуясь матрицей (2-53):

$$D=\begin{vmatrix} r'_X & r'_Y & r'_Z\\ g'_X & g'_Y & g'_Z\\ b'_X & b'_Y & b'_Z \end{vmatrix}=0{,}01629.$$

Подставляя в (2-70) соответствующие значения координат основных цветов X, Y и Z, получим:

$$\begin{aligned} a_{11}&=2{,}7689;\ a_{12}=1{,}7517;\ a_{13}=1{,}1302;\\ a_{21}&=1{,}0000;\ a_{22}=4{,}5907;\ a_{23}=0{,}0601;\\ a_{31}&=0{,}0000;\ a_{32}=0{,}0565;\ a_{33}=5{,}5943. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\left.\begin{aligned} x'&=2{,}7689r'+1{,}7517g'+1{,}1302b';\\ y'&=1{,}0000r'+4{,}5907g'+0{,}0601b';\\ z'&=0{,}0565g'+5{,}5943b'. \end{aligned}\right\}\qquad (2\text{-}71)$$

Рассмотрим в качестве примера расчет новых координат цветности однородного излучения $\lambda=0{,}510$ *мк* по заданным прежним их значениям. Из таблицы приложения 1 находим значения координат цветности в прежней системе:

$$r_{\lambda=0{,}51}=-1{,}3371;\ g_{\lambda=0{,}51}=1{,}9318;\ b_{\lambda=0{,}51}=0{,}4053.$$

Подставляя полученные значения r, g и b взамен r', g' и b' в уравнение (2-71), получим:

$$\begin{aligned} x'&=-2{,}7689\cdot1{,}3371+1{,}7517\cdot1{,}9318+1{,}1302\cdot0{,}4053=0{,}1484\\ y'&=-1{,}0000\cdot1{,}3371+4{,}5907\cdot1{,}9318+0{,}0601\cdot0{,}4053=7{,}5556\\ z'&=\qquad\quad+0{,}0565\cdot1{,}9318+5{,}5943\cdot0{,}4053=2{,}3765\\ &\qquad\qquad\qquad

значениями координат цветности однородных излучений. Согласно (2-21) яркостный коэффициент однородного излучения в системе XYZ определится как

$$L_\lambda = x_\lambda L_X + y_\lambda L_Y + z_\lambda Z_Z. \qquad (2\text{-}72)$$

Следовательно,

$$L_\lambda = y_\lambda, \qquad (2\text{-}72а)$$

так как $L_X = 0$; $L_Y = 1$; $L_Z = 0$.

Решая (2-72) и (2-35) совместно, получим значения удельных координат цвета однородных излучений:

$$\bar{x}_\lambda = K_\lambda \frac{x_\lambda}{y_\lambda}; \quad \bar{y}_\lambda = K_\lambda; \quad \bar{z}_\lambda = K_\lambda \frac{z_\lambda}{y_\lambda}, \qquad (2\text{-}73)$$

где K_λ — относительная видность однородного излучения.

Удельные координаты цвета $\bar{x}_\lambda$, $\bar{y}_\lambda$ и $\bar{z}_\lambda$, полученные расчетом для однородных излучений единичной мощности, представлены графически (рис. 2-19) в виде кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$. Кривая $\bar{x}(\lambda)$ имеет два резко выраженных максимума ($\lambda = 0{,}44$ *мк* и $\lambda = 0{,}60$ *мк*) с глубоким минимумом в области $\lambda = 0{,}505$ *мк*. Такая форма кривой $\bar{x}(\lambda)$ определяется расположением стороны YZ цветового треугольника (рис. 2-18). Максимальное приближение стороны YZ к граничной кривой цветностей однородных излучений в точке $\lambda = 0{,}505$ *мк* вызвало появление в этой области спектра минимума кривой смешения $\bar{x}(\lambda)$. В соответствии с уравнениями (2-73) кривая $\bar{y}(\lambda)$ в точности совпадает с кривой относительной видности излучения в условиях дневного зрения. Форма третьей кривой смешения $\bar{z}(\lambda)$ близка к форме коротковолнового участка кривой $\bar{x}(\lambda)$, вследствие чего их иногда с некоторым приближением принимают подобными, что упрощает фотоэлектрическую схему для измерения цвета (§ 2-23).

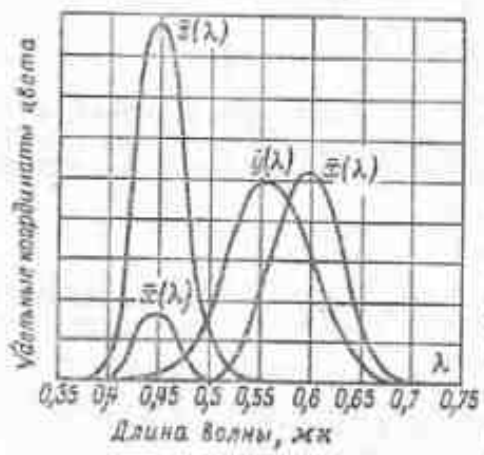


Рис. 2-19.

Диаграмма цветности x, y. Располагая координатами цветности однородных излучений, полученными преобразованием величин r_λ, g_λ, b_λ, наносим на диаграмму цветности xy граничную кривую однородных излучений. Как и в других колориметрических системах, цветовой треугольник XYZ можно строить в трехлинейной или прямоугольной системе координат (рис. 2-20). Наиболее широкое распространение в практике цветовых расчетов получил прямоугольный треугольник с координатами цветности

x и y (рис. 2-20,*б*). Анализируя расположение кардинальных точек на диаграмме цветности xy, можно сделать некоторые выводы:

1. В соответствии с условием построения системы XYZ граничная кривая цветности реальных цветов расположена внутри цветового треугольника, что наглядно иллюстрирует нереальность всех трех основных цветов системы X, Y и Z, расположенных вне поля реальных цветов.

2. Совпадение прямолинейного участка граничной кривой цветности однородных излучений ($\lambda \geqslant 0{,}56$ *мк*) с гипотенузой

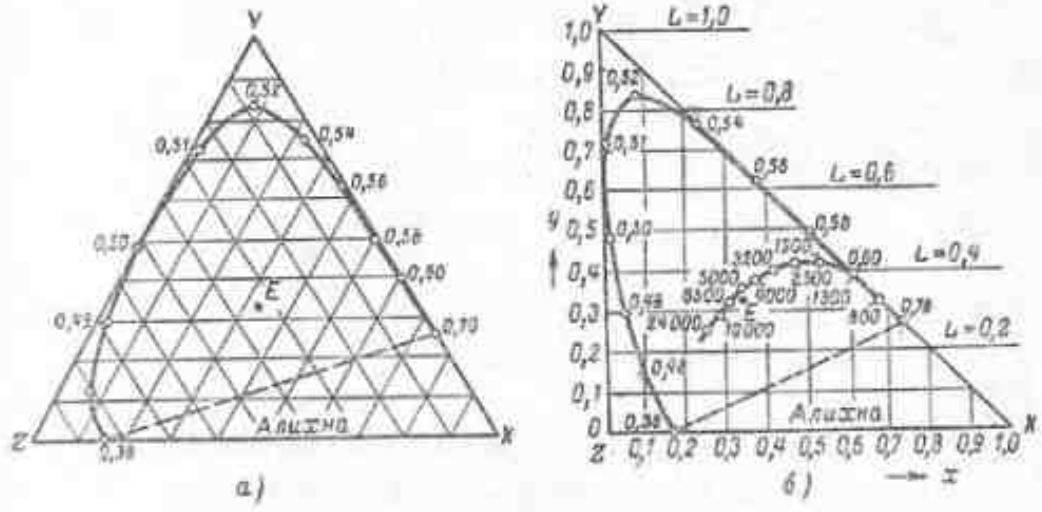


Рис. 2-20.

а — диаграмма цветности x, y, z; *б* — диаграмма цветности x, y.

цветового треугольника обеспечивает близкое к нулю значение удельных координат $\bar{z}(\lambda)$ на этом участке спектра.

3. Геометрическим местом точек цветностей излучений различной цветовой температуры является кривая, проходящая вблизи от точки E белого равноинтенсивного излучения. По мере уменьшения цветовой температуры излучения его цветность приближается к цветности однородных оранжево-красных излучений, вследствие чего кривая $T_ц = \text{var}$ асимптотически приближается к прямолинейному участку граничной кривой.

4. Вследствие совмещения плоскости нулевой яркости с координатной плоскостью XOZ аличной служит ось x (рис. 2-21). При этом геометрическими местами точек с постоянными значениями яркостных коэффициентов на диаграмме цветности xy являются прямые, параллельные оси x. Линии $L = \text{const}$ являются следами пересечения плоскости диаграммы цветности ($\sigma = 1$) с семейством плоскостей $L = \text{const}$, которые в цветовом пространстве XYZ параллельны координатной плоскости XOZ.

5. Распределение длин волн однородных излучений по граничной линии цветового поля очень неравномерно. С наибольшими интервалами расположены излучения в средней части спектра, особенно на интервале голубых и зеленых излучений с длинами волн 0,48—0,51 *мк*. С наименьшими интервалами расположены однородные излучения по краям спектра в длинноволновой и коротковолновой его частях, причем все однородные излучения с длиной волны $\lambda \geqslant 0{,}69$ *мк* имеют одинаковую цветность.

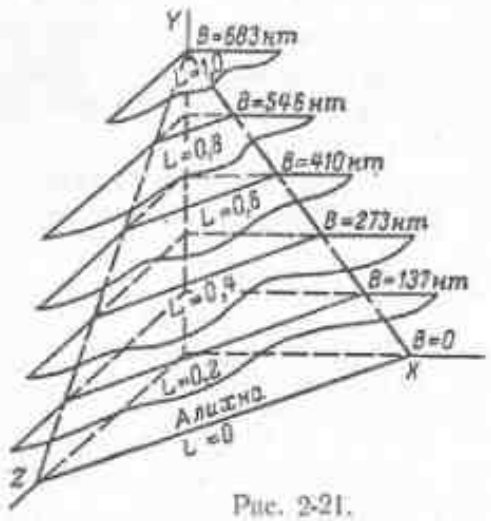


Рис. 2-21.

6. Отсутствие отрицательных удельных координат цвета и совмещение одной из координатных плоскостей с плоскостью нулевой яркости обеспечили удобства при практическом пользовании системой *XYZ*, вследствие чего она получила общее признание и утверждение МКО как международной системы.

2-8. Основная физиологическая система *КЗС*

Основные цвета *К*, *З* и *С*. В физиологической системе координаты цвета κ', $з'$ и c' определяют уровни возбуждения трех селективных приемников среднего глаза в единичных значениях *кзс*-компонентов цвета. Эта особенность основной физиологической системы определяет ее отличие от всех других систем, заключающееся в том, что в ней любой цвет выражается не только суммой трех основных цветов, а также уровнем и соотношениями реакций трех цветовоспринимающих аппаратов глаза. Как было показано ранее (§ 2-1), кривые сложения в системе *КЗС* являются одновременно и функциями спектральной чувствительности каждого из трех приемников глаза. Указанная отличительная особенность основной физиологической системы определяет большое ее значение во всех случаях, когда встречается необходимость анализа изменения соотношения концентрации молекул *кзс*-фотореагентов (индуктивное действие цвета, цветовая адаптация и пр.).

Трудности построения такой системы определяются невозможностью непосредственного точного измерения спектральной чувствительности каждого из трех цветовоспринимающих аппаратов. Для решения этого вопроса еще в конце прошлого столетия Кениг и Дитеричи [Л. 8] предложили использовать дихроматов. Напишем цветовое уравнение для дихромата, состоящее в правой части из двух членов, соответствующих двум цветовоспринимающим аппаратам:

$$\Phi \equiv c'C + a'A, \tag{2-74}$$

где c' — координата цвета, определяющая уровень реакции синеощущающего аппарата;

a' — координата цвета, определяющая уровень реакции второго цветовоспринимающего аппарата дихромата.

Предположим в общем виде, что спектральная чувствительность второго цветовоспринимающего аппарата дихромата определяется спектральными чувствительностями красно- и зеленочувствительных аппаратов глаза трихромата:

$$\bar{a}(\lambda) = \alpha\bar{\kappa}(\lambda) + \beta\bar{з}(\lambda) \tag{2-75}$$

или

$$a' = \alpha\kappa' + \beta з', \tag{2-75а}$$

где $\bar{\kappa}(\lambda)$ и $\bar{з}(\lambda)$ — функции сложения *К* и *З* основных цветов физиологической системы;

κ' и $з'$ — координаты цвета, определяющие уровни реакции красно- и зеленоощущающих аппаратов;

α и β — коэффициенты, характеризующие долю участия *k*- и *з*-приемников в формировании спектральной чувствительности второго цветовоспринимающего аппарата дихромата.

Приняв сумму коэффициентов α и β равной единице $\alpha + \beta = 1$, рассмотрим возможные частные случаи. Пусть $\alpha = 0$ и $\beta = 1$, что соответствует отсутствию у дихромата красноощущающего аппарата (протаноп). При $\beta = 0$ и $\alpha = 1$ $\bar{a}(\lambda)$ описывает кривую сложения дейтеранопа, у которого отсутствует зеленоощущающий аппарат (§ 1-10). Цветовое уравнение (2-74) показывает, что для дихромата одноцветность излучений определится постоянством отношений двух координат цвета или цветности:

$$\frac{c'}{a'} = \frac{c'}{\alpha\kappa' + \beta з'} = n$$

или

$$\frac{c}{\alpha\kappa + \beta з} = n. \tag{2-76}$$

Подставляя в (2-76) $c = 1 - \kappa - з$, получим уравнение, определяющее значения координат цветностей, неразличимых дихроматом для любого значения $n = \text{const}$:

$$\kappa(1 + n\alpha) + з(1 + n\beta) - 1 = 0. \tag{2-76а}$$

Нетрудно видеть, что уравнение (2-76а) определяет пучок прямых, расположенных в плоскости диаграммы и имеющих общую точку (рис. 2-22). Координаты этой точки определяются из (2-76а):

$$\left.\begin{aligned} \kappa &= \frac{\beta}{\beta-\alpha}; \\ s &= -\frac{\alpha}{\beta-\alpha}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}77)$$

Анализ уравнений (2-77) показывает, что полюс пучка прямых, определяющих геометрические места точек цветностей, не различимых дихроматами, совпадают с одной из вершин координатного треугольника лишь в том случае, если один из коэффициентов α или β будет равен нулю.

Действительно при $\alpha=0$ и $\beta=1$ из (2-77) имеем $\kappa=1$ и $s=0$, следовательно, полюс пучка прямых $\alpha=0$ совпадает с вершиной K. При $\beta=0$ и $\alpha=1$ полюс совпадает с вершиной $З$, так как $\kappa_{л}=0$ и $s_{л}=1$. Из этого анализа следует, что полюса пучков прямых $n=\text{const}$ определяют вершины координатного треугольника диаграммы цветности основной физиологической системы, если предположить причиной дихроматизма полное выпадение одного из цветоразличающих аппаратов. Этот метод нахождения основных цветов физиологической системы был впервые предложен Максвеллом [Л. 7] и широко используется для определения основных цветов физиологической системы.



Рис. 2-22

Экспериментальные данные Питта [Л. 22], полученные в результате исследования цветовых уравнений пяти протанопов и семи дейтеранопов, пересчитанные Джаддом [Л. 23] на основные цвета международной системы XYZ, приведены на диаграмме цветности xy (рис. 2-23). Как можно видеть (рис. 2-23,$а$), прямые, являющиеся геометрическим местом точек цветностей, неразличимых протанопами, с достаточной точностью пересекаются в точке K ($x_{к}=0{,}747$; $y_{к}=0{,}253$). Для дейтеранопов согласно Джадду точки пересечения пучка прямых неразличимых цветностей[1] определяются (рис. 2-23,$б$) координатами $x_{з}=1{,}00$, $y_{з}=0{,}00$. Отсутствие данных по тританопам вследствие очень большой редкости таких дихроматов заставило Джадда предположительно выбрать расположение третьей вершины $С$ координатного треугольника системы $КЗС$ около коротковолнового конца локуса в точке с координатами $x_{с}=0{,}180$ и $y_{с}=0{,}00$.

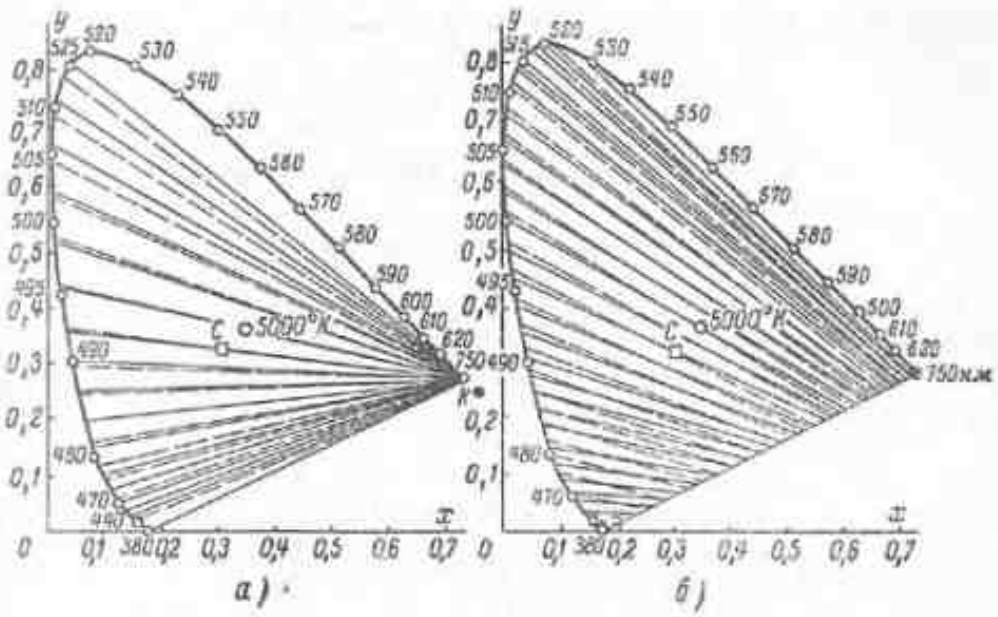


Рис. 2-23.
а — протанопы; б — дейтеранопы.

Зная координаты цветности каждого основного цвета системы $КЗС$ в прежней системе XYZ, определим величину основных цветов $К$, $З$ и $С$ из (2-43):

$$К = 0{,}747 s_{к} X + 0{,}253 s_{к} Y;$$

$$З = 1{,}00 s_{з} X;$$

$$С = 0{,}18 s_{с} X + 0{,}82 s_{с} Z.$$

[1] При определении положения вершины «З» Джадд был принужден внести некоторые коррективы в экспериментальные данные Питта вследствие недостаточной сходимости прямых $n=\text{const}$ для всех наблюдателей.

Приняв $a=1$, в соответствии с (2-45) получим:

$$0{,}747\sigma_к + 1{,}00\sigma_з + 0{,}18\sigma_с = 1;$$

$$0{,}253\sigma_к = 1;$$

$$0{,}820\sigma_с = 1,$$

откуда $\sigma_к = 3{,}953$; $\sigma_з = 1{,}220$ и $\sigma_с = -2{,}172$. Следовательно:

$$x'_к = 2{,}957;\ y'_к = 1{,}000;\ z'_к = 0{,}000;$$

$$x'_з = -2{,}174;\ y'_з = 0{,}000;\ z'_з = 0{,}000;$$

$$x'_с = 0{,}217;\ y'_с = 0{,}000;\ z'_с = 1{,}000.$$

Кривые сложения $\bar{k}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ и $\bar{c}(\lambda)$. Определив координаты основных цветов новой системы *КЗС* в прежней системе *XYZ*, напишем согласно (2-56) выражения новых координат цвета любого излучения:

$$\left.\begin{aligned} \kappa' &= y';\\ s' &= -0{,}46x' + 1{,}36y' + 0{,}10z';\\ c' &= z', \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}78)$$

так как определитель $D = 2{,}172$.

Согласно (2-78) функции сложения для основной физиологической системы определятся по Джадду:

$$\left.\begin{aligned} \bar{\kappa}(\lambda) &= \bar{y}(\lambda);\\ \bar{s}(\lambda) &= -0{,}46\bar{x}(\lambda) + 1{,}36\bar{y}(\lambda) + 0{,}10\bar{z}(\lambda);\\ \bar{c}(\lambda) &= \bar{z}(\lambda). \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}78а)$$

Наиболее достоверные данные о кривых сложения основных цветов физиологической системы *КЗС* были получены Е. Н. Юстовой [Л. 24], которая пользовалась методом исследования колориметрических равенств, устанавливаемых дихроматами при переменной доле участия цвета, слабо воспринимаемого дихроматом. Определение цветности основного синего цвета *С* основной физиологической системы было произведено на основании соображений, высказанных Н. Д. Нюбергом [Л. 31]. Эти соображения сводятся к следующим двум положениям:

а) В основной физиологической системе ни один реальный цвет не может иметь отрицательных координат, так как невозможно представить себе отрицательное возбуждение какого-

либо приемника излучения, в том числе и любого из трех приемников глаза.

б) Все основные цвета физиологической системы не должны иметь отрицательных значений яркостных коэффициентов, так как невозможно представить отрицательной долю участия

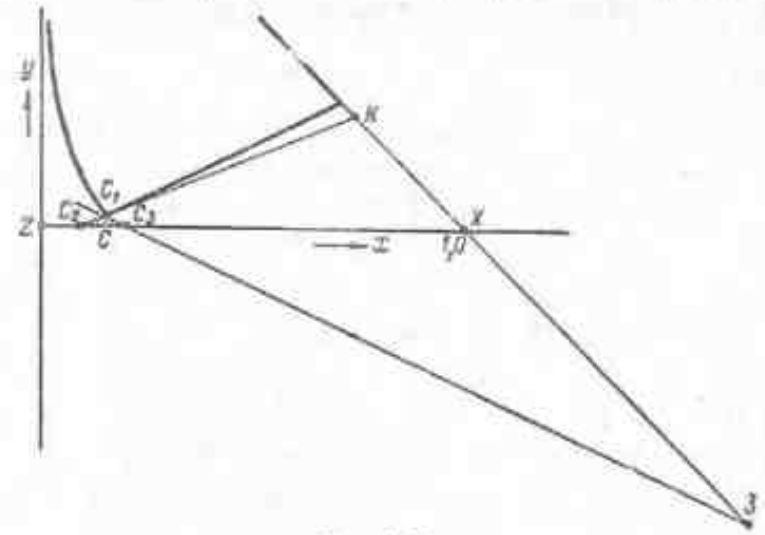


Рис. 2-24.

в формировании ощущения яркости какого-либо из трех приемников глаза.

На основании этих положений точка третьего основного цвета *С* должна располагаться в пределах треугольника C_1, C_2, C_3 (рис. 2-24), ограниченного на диаграмме *xy* осью абсцисс (алихной) и двумя касательными к локусу цветности однородных излучений, проведенными из точек *К* и *З*. Как показали результаты исследования Е. Н. Юстовой, размеры этого треугольника очень малы, вследствие чего произвол выбора положения точки *С* в пределах этого треугольника практически не отражается на форме кривых смешения (рис. 2-25).

Координаты цветности всех трех основных цветов по данным Е. Н. Юстовой (рис. 2-24) равны:

$$x_к = 0{,}747;\ y_к = 0{,}250;\ x_з = 1{,}72;\ y_з = -0{,}72;\ x_с = 0{,}174;$$

$$y_с = 0{,}005.$$

Полученным координатам цветности основных цветов соответствуют следующие уравнения перехода от координат цвета в системе *XYZ* к координатам цвета физиологической системы:

$$\left.\begin{aligned} \kappa' &= 0{,}318x' + 0{,}754y' - 0{,}072z';\\ s' &= -0{,}463x' + 1{,}374y' - 0{,}089z';\\ c' &= z'. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}79)$$

Семейство уравнений (2-79) позволяет рассчитать функции сложения системы *КЗС* по известным значениям удельных координат цвета в прежней системе:

$$\left.\begin{aligned}\bar{\kappa}(\lambda) &= 0{,}318\bar{x}(\lambda) + 0{,}754\bar{y}(\lambda) - 0{,}072\bar{z}(\lambda);\\ \bar{s}(\lambda) &= 0{,}463\bar{x}(\lambda) + 1{,}374\bar{y}(\lambda) - 0{,}089\bar{z}(\lambda);\\ \bar{c}(\lambda) &= \bar{z}(\lambda).\end{aligned}\right| \qquad (2\text{-}79а)$$

Сопоставляя (2-78а) и (2-79а), можно видеть значительное расхождение уравнений, определяющих функцию $\bar{\kappa}(\lambda)$, что следует объяснить существенным различием расположения основного цвета $З$, которое по данным Юстовой более правдоподобно.

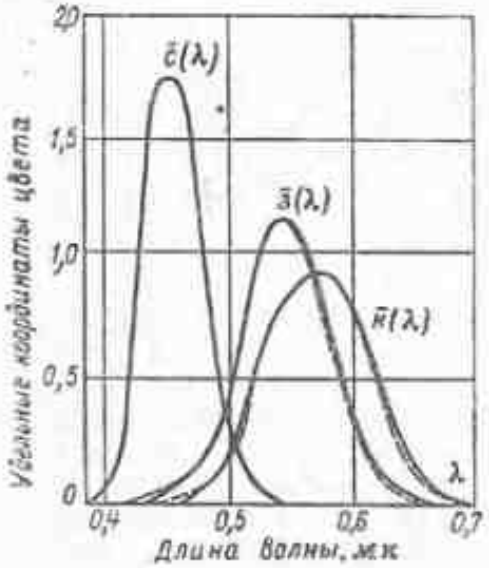


Рис. 2-25.

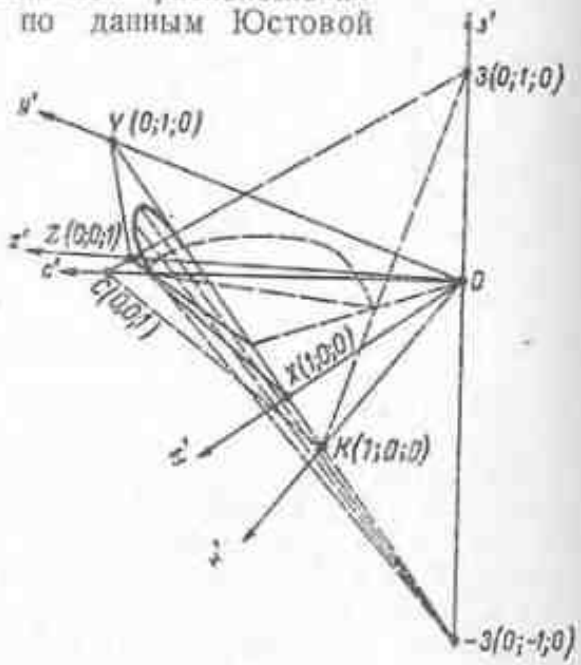


Рис. 2-26.

Отрицательное значение координаты $y_З$, полученное Е. Н. Юстовой, следует объяснить [Л. 23] тем, что плоскость единичных цветов системы *XYZ* пересекает направление вектора основного цвета $З$ в точке, расположенной под плоскостью нулевой яркости *XOZ* (рис. 2-26). Следовательно, полюс прямых, характеризующих на диаграмме *x*, *y* (рис. 2-24) цветности, не различимые дейтеранопом, располагается на отрицательном направлении вектора $\vec{З}$. В результате такого взаимного расположения плоскостей диаграмм цветности *xyz* и *кзс*, действительные значения координат цветности в системе *XYZ* основного цвета $З$ должны быть приняты с обратными знаками: $x_З = -1{,}72$ и $y_З = 0{,}71$.

2-9. Система *B*, λ, *p*

Цветовой тон излучения. Цветовой тон и чистота цвета однозначно определяют цветность любого излучения, следовательно, в совокупности с яркостью (световым потоком)

этого излучения они определяют его цвет (§ 1-10). Исходя из этого можно создать такую систему классификации цвета, в которой цвет любого излучения будет определяться яркостью, чистотой и цветовым тоном. Для создания такой системы необходимо в первую очередь установить связь между чистотой цвета и цветовым тоном, с одной стороны, и координатами цветности в международной системе *XYZ* — с другой.

Возможность воспроизведения любого реального цвета смесью белого с однородным наглядно видна из диаграммы цветности любой колориметрической системы. Проводя прямую через точку белого цвета *E* и точку заданной цветности $M(x, y)$ до пересечения с граничной кривой цветностей однородных излучений, получим точку *H* (рис. 2-27). В соответствии с правилом аддитивного смешения цветов эта точка определяет цветность некоторого однородного излучения с длиной волны λ_H, смесь которого с белым одинакова по цветности с заданным излучением.

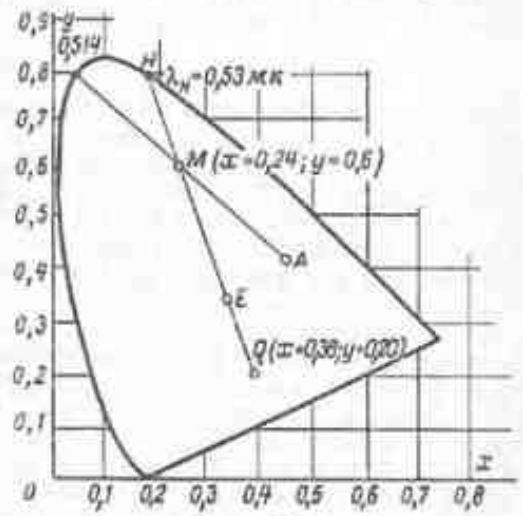


Рис. 2-27.

Из приведенного примера можно видеть, что цветовой тон любого излучения (§ 1-10) определяется точкой пересечения локуса цветности с прямой, проходящей через точку белого (x_E, y_E) и точку заданной цветности (x, y). Из этого примера можно видеть также, что излучению с любой реальной цветностью соответствует некоторое однородное излучение или чистое пурпурное, смесь которого с белым в определенной пропорции одинакова с цветностью заданного излучения. Во втором случае цветовой тон заданного излучения принято характеризовать длиной волны дополнительного цвета к чистому пурпурному. Для отличия цветового тона пурпурного цвета от дополнительного зеленого длина волны пурпурных излучений обозначается со знаком минус. Так, например, цветовой тон излучения с цветностью Q ($x=0{,}38$; $y=0{,}20$) определится по диаграмме цветности (рис. 2-27) как дополнительный к $\lambda=0{,}53$ *мк*, следовательно, $\lambda_Q = -0{,}53$ *мк*.

Источники белого цвета. Цветовой тон любого излучения будет зависеть от того, применительно к какому белому излучению он определен. В колориметрии стандартизовано несколько источников белого цвета, параметры которых приведены в табл. 12.

Таблица 12

Стандартные источники белого цвета

Источник белого цвета	Цветовая температура, °К	Координаты цветности		Примечание
		x	y	
E		0,3333	0,3333	Равноинтенсивный
A	2854	0,4476	0,4075	Лампа накаливания со световой отдачей $\phi_{св} = 20$ *лм·вт*$^{-1}$
B	~4800	0,3484	0,3516	Дневной свет
C	~6500	0,3101	0,3162	Дневной свет

Стандартные источники B и C созданы для воспроизведения средних цветовых характеристик дневного излучения. Источник B воспроизводит цвет прямого солнечного излучения в утренние и вечерние часы при высоте стояния солнца $h \leqslant 30°$. Источник C воспроизводит цвет смешанного излучения солнца и небосвода также в утренние и вечерние часы. Излучение источников B и C нельзя получить от ламп накаливания без исправляющих фильтров, так как температура плавления вольфрама $T \approx 3\,600°$ К. На основании международного соглашения излучения белого цвета B и C получаются путем избирательного ослабления излучения стандартного источника A. Решением МКО утверждены стандартные составы и толщина жидких голубых фильтров, исправляющих спектральный состав излучения A до B и C. Цветности излучений стандартных источников белого цвета B и C регламентированы их спектральными составами, вследствие чего в приведенной таблице цветовая температура их излучения дана ориентировочно. В СССР государственным стандартом 7721-55 излучения источников B и C определены как излучения с цветовыми температурами $T_ц = 4\,800°$ К и $T_ц = 6\,500°$ К, получаемые фильтрацией излучения источника A при прохождении через совокупность стеклянных фильтров СЗС-17, СП-5 и ПС-6 соответствующих толщин.

В США, кроме утвержденных МКО источников белого света A, B, C и E, применяют источник D с цветовой температурой $T_ц = 7\,500°$ К и источник S, излучение которого имеет цветность такую же, как голубое небо ($T_ц = 25\,000°$ К). Как можно видеть из приведенной таблицы и диаграммы цветности (рис. 2-27), вследствие значительной разности цветовой температуры излучений стандартных источников белого цвета координаты цветности их излучений также существенно различны. Вследствие этого различия цветового тона одного и того же излучения могут быть значительны при определении этой характеристики относительно различных белых. Так, например, цветность излучения M (рис. 2-27) с координатами $x = 0{,}24$; $y = 0{,}6$ характеризуется цветовым тоном $\lambda = 0{,}53$ *мк* применительно к источнику E и $\lambda = 0{,}514$ *мк* применительно к источнику A. Из этого примера следует, что, характеризуя цветность излучения его цветовым тоном, необходимо указывать, применительно к какому стандартному источнику белого цвета он определен.

Чистота цвета. Возможность воспроизведения любого цвета смесью двух цветов (однородного и белого излучений) позволяет написать следующее цветовое тождество:

$$\Phi \equiv \Phi_\lambda + \Phi_б,$$

где Φ — исследуемый цвет;
Φ_λ и $\Phi_б$ — цвета однородного и белого излучений, сумма которых тождественна Φ.

Как было показано ранее (§ 1-10), количественное соотношение смеси Φ_λ и $\Phi_б$ определяет чистоту исследуемого цвета Φ:

$$p = \frac{B_\lambda}{B_\lambda + B_б} = \frac{B_\lambda}{B},$$

где p — чистота исследуемого цвета Φ;
$B = B_\lambda + B_б$ — яркость исследуемого цвета;
B_λ и $B_б$ — яркости однородного и белого излучений, цвет смеси которых тождественен исследуемому цвету Φ.

Для установления связи чистоты цвета с его координатами преобразуем (1-68) в соответствии с (2-66б):

$$p = \frac{\sigma_\lambda y_\lambda}{\sigma y} = \frac{y_\lambda}{y} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma_б}{\sigma_\lambda}},$$

так как

$$B_\lambda = 683\, y_\lambda \sigma_\lambda \text{ и } B = 683\, y\sigma,$$

где $\sigma = \sigma_\lambda + \sigma_б$ — сумма координат исследуемого цвета Φ.

Преобразовав отношение суммы координат смешиваемых белого и однородного цветов в соответствии с (2-32), получим:

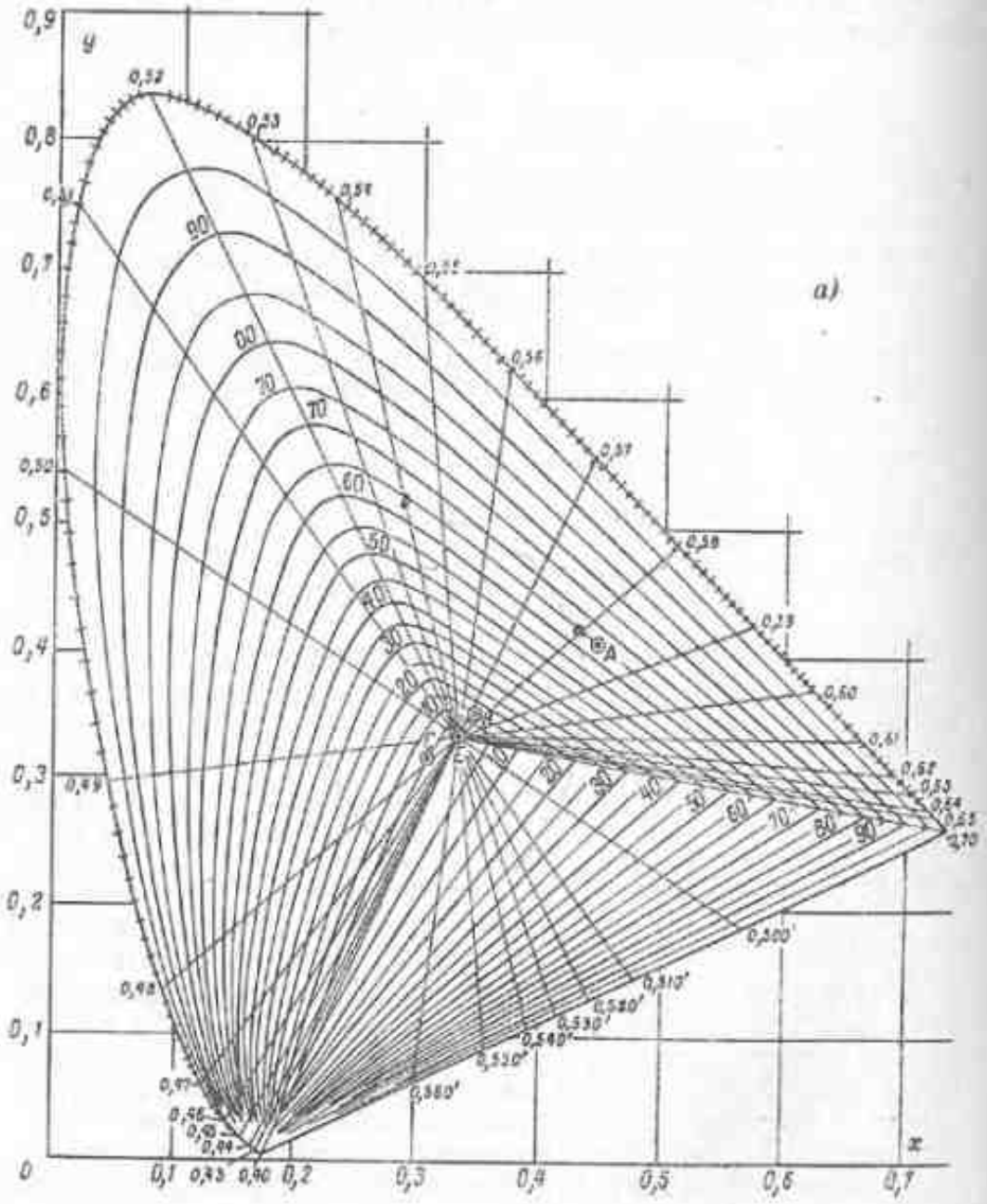
$$p = \frac{y_\lambda}{y} \cdot \frac{x - x_б}{x_\lambda - x_б} = \frac{y_\lambda}{y} \cdot \frac{y - y_б}{y_\lambda - y_б}, \qquad (2\text{-}80)$$

где x_λ, y_λ, $x_б$, $y_б$ — координаты цветности однородного и белого излучений, обеспечивающих в смеси заданную цветность с координатами x и y.

Графики $\lambda = \text{const}$ и $p = \text{const}$. Графическая интерпретация цветового тона как точки пересечения локуса цветности однородных цветов с прямой, проходящей на диаграмме цветности через точку белого цвета и заданного цвета, позволяет сделать вывод о прямолинейности линий постоянного цветового тона. Эти прямые $\lambda = \text{const}$ представляют собой пучок с общим полюсом в точке белого цвета, принятого за основу цветовой системы

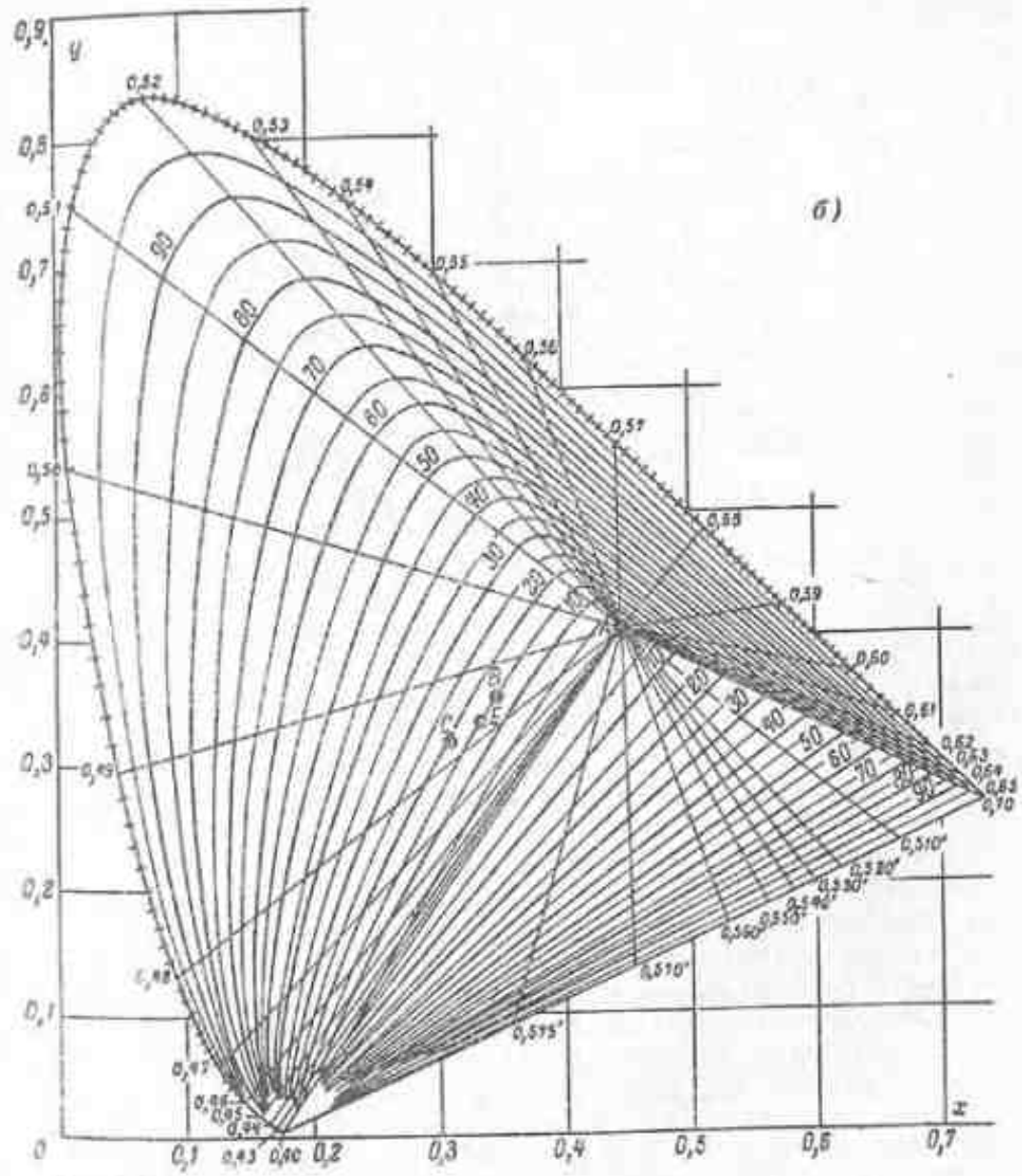
B, p, λ (рис. 2-28,*а* и *б*). Линии равной чистоты цвета являются замкнутыми с уменьшающимися значениями чистоты цвета по мере приближения к точке белого цвета (рис. 2-28,*а* и *б*).

Из определения чистоты цвета любого излучения следует, что кривой $p=1$ является локус цветностей однородных излучений и замыкающая его прямая пурпурных цветов максимальной чистоты. Такое расположение кривой $p=1$ на диаграмме цветности любой цветовой системы показывает, что все нереальные цвета должны характеризоваться значениями чистоты,



а)

большими единицы. Вполне ясно, что понятие чистоты нереальных цветов условно, так же как условно и понятие нереального цвета. Несмотря на это, понятие чистоты нереального цвета имеет некоторый практический смысл вследствие того, что ощущение нереального цвета можно вызвать искусственным изменением соотношения концентрации молекул *кзс*-фотореагентов. Так, например, при предварительной адаптации наблюдателя на голубой цвет значительной яркости будет снижена концентрация молекул *з* и *с*-реагентов, что при неизменной концен-



б)

Рис. 2-28.

трации k-реагента вызывает повышенную чувствительность глаза к красному цвету. В результате этого однородное красное излучение будет зрительно восприниматься более насыщенным, обладающим чистотой цвета больше единицы. По мере восстановления баланса $kзс$-реагентов в процессе облучения глаза наблюдателя красным ощущение чистоты его цвета будет уменьшаться, стремясь к расчетному значению чистоты исследуемого красного цвета.

Бесконечно большое значение чистоты цвета для всех точек оси zx, так как $y_z = y_x = 0$, создает очень неравномерное распределение значений чистоты цвета для излучений с цветовым

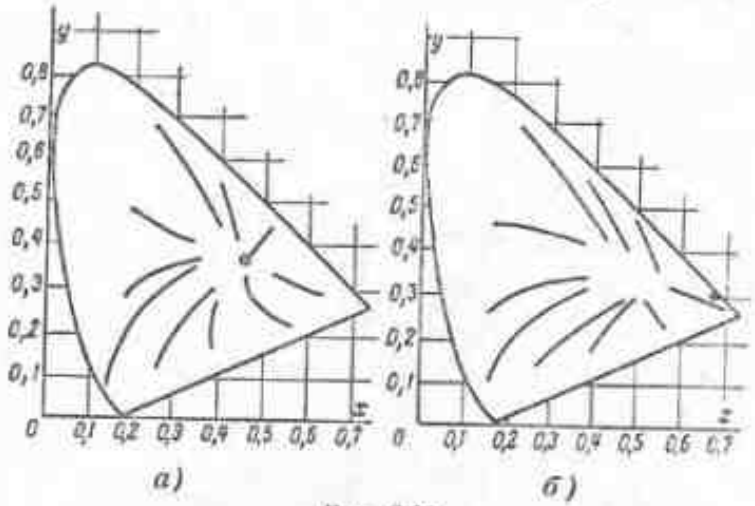


Рис. 2-29.
а — адаптация на белый A; б — адаптация на красный $\lambda = 0{,}65$ мк.

тоном $\lambda = 0{,}38$ мк. Вследствие этого (рис. 2-28,*а* и *б*) кривые $p = \text{const}$ для любых значений чистоты цвета, распределяясь достаточно равномерно на большей площади поля реальных цветов, концентрируются в зоне однородных излучений фиолетового цвета. Значительным преимуществом цветовой системы B, λ, p перед любой трехцветной системой является ее наглядность. Благодаря наглядности она получила распространение наряду с международной системой XYZ.

Как было показано ранее (§ 1-10), Эбней доказал экспериментально, что изменение чистоты цвета путем разбавления его белым приводит к изменению ощущения постоянства цветового тона. Эффект Эбнея приводит к тому, что геометрическими местами цветностей излучений, оцениваемых зрительно постоянными по ощущению цветовой тональности, являются некоторые кривые, в большей или меньшей мере отличающиеся от расчетных прямых $\lambda = \text{const}$. Лишь незначительное количество цветов, как, например, желтые $\lambda = 0{,}56$—$0{,}58$ мк, зеленые $\lambda = 0{,}515$—$0{,}525$ мк, синие $\lambda = 0{,}49$—$0{,}50$ мк и фиолетовые $\lambda = 0{,}44$—$0{,}45$ мк,

ощущаются постоянными по цветовой тональности при любых значениях чистоты. На рис. 2-29 приведены результаты произведенного Мак-Адамом [Л. 26] визуального определения излучений постоянных цветовых тональностей. Как можно видеть из приведенных графиков, отличие линий постоянных цветовых тональностей от прямых определяется не только исследуемым излучением, чистота которого изменяется при постоянстве расчетного значения цветового тона, но также и за счет цвета окружения[1], на который адаптируется наблюдатель периферическим зрением. На рис. 2-29 приведены данные для периферической адаптации на белый A (рис. 2-29,*а*) и красный, близкий к чистому — $\lambda = 0{,}65$ мк (рис. 2-29,*б*). Цветности полей окружения обозначены на графиках крестиком. Значения яркости полей окружения были для белого $B_б = 33$ нт и красного $B_к = 16{,}5$ нт.

2-10. Равноконтрастные системы

Равноконтрастные кривые на диаграмме xy. Как известно (§ 1-10), излучения, обладающие одинаковой яркостью и различной цветностью, не во всех случаях воспринимаются глазом как разноцветные. Лишь только в тех случаях, когда разница в цветности двух сравниваемых излучений равна или больше порога цветоразличения, можно обнаружить их разноцветность. Колориметрически любую разность цветности, в том числе и пороговую, можно определить различием координат цветности. Так, например, в некоторой точке $Q(x, y)$ поля реальных цветов необходимо изменить координаты на Δx и Δy, чтобы получить новый цвет $S(x+\Delta x;\ y+\Delta y)$, зрительно отличающийся от первого с некоторой вероятностью p *. Пороговую разность мы можем характеризовать на диаграмме цветности расстоянием между двумя точками, характеризующими равнояркие излучения, различаемые по цветности с заданной вероятностью.

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \tag{2-81}$$

Вполне понятно, что удаление точки S от Q в том же направлении будет увеличивать различие цветности излучений. Они станут становятся более разноцветными или, как принято говорить, цвета становятся более контрастными. Учитывая это, принято пороговую разность цветности называть *пороговым цветовым кон-*

[1] Центральная часть поля зрения, равная в опытах Мак-Адама 10°, была занята полями сравнения. Вся оставшаяся периферическая часть поля зрения названа полем окружения.

* Обычно пороговая разность цветности определяется с вероятностью $p = 0{,}75$ или $p = 0{,}5$ обнаружения разноцветности смежных цветных полей.

трастом или *цветовым порогом*, а сверхпороговое различие цветности, выраженное минимальным числом цветовых порогов, — *цветовым контрастом*. Таким образом, цветовой контраст двух излучений определяет различие их цветностей, выраженное минимальным числом цветовых порогов между ними. Определение цветового контраста минимальным числом цветовых порогов необходимо потому, что изменение цветности возможно различными путями, так как переход от одной точки плоскости к другой возможен по любой кривой, проходящей через обе точки.

Вследствие многообразия возможных путей перехода от одной цветности до другой цветовой контраст между ними принято определять числом пороговых его значений по кратчайшему пути. Следует указать, что кратчайший путь по числу порогов (по зрительному ощущению) далеко не всегда является кратчайшим по расстоянию между точками на диаграмме цветности. Это на первый взгляд парадоксальное явление можно объяснить различием расстояний между двумя точками диаграммы *xy*, характеризующими цветности, отличающиеся на один цветовой порог. Несоответствие расстояния на диаграмме *xy* величине цветового контраста вытекает непосредственно из результатов исследований различия цветовых порогов по цветовому тону и чистоте цвета (§ 1-10).

Результаты исследований Джонса, Гамильтона и Лауренса, Прайста и Бриккуела и др. позволяют сделать вывод о различии линейного размера цветового порога на диаграмме цветности *xy* не только для различных цветностей, но также и для изменения заданной цветности по различным направлениям. Это обстоятельство приводит к тому, что расстояние между двумя точками диаграммы *xy* не определяет цветового контраста. Следовательно, величина $\Delta l=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2}$ неодинакова и зависит от положения точки на диаграмме, а также от направления изменения цветности. Для определения цветового контраста с помощью диаграммы цветности *xy* необходимо знать переменные линейные масштабы цветовых порогов, разные для различных точек графика и различных направлений изменения цветности. Знание линейных масштабов цветовых порогов необходимо также для построения таких цветовых систем, на диаграммах цветности которых расстояние между двумя точками будет однозначно определять цветовой контраст в едином масштабе для любой точки и любого направления диаграммы. Такие *диаграммы цветности* было принято называть *равноконтрастными*.

Дополнительным осложнением вопроса о равноконтрастных диаграммах является различие яркостей единичных цветов, изображаемых точками на диаграммах цветности. В результате

этого дополнительного обстоятельства перемещение в плоскости единичных цветов из одной точки в другую приводит к изменению не только цветности, но также и яркости. Лишь только перемещение точки на диаграмме цветности любой системы параллельно алихне (для диаграммы *xy* — параллельно оси абсцисс) обеспечивает постоянство яркости. Все эти соображения в значительной мере затрудняют пользование международной цветовой системой при решении вопроса *высшей метрики цвета*, под которой принято понимать такую область колориметрии, в которой устанавливаются не только цветовые тождества, но также исследуются степени различия между цветами. В связи с этим возникла необходимость создания такой *равноконтрастной цветовой системы*, в пространстве которой различие в направлениях цветовых векторов и их величинах линейно определяло бы количественно выраженное различие в светлоте и в ощущении цветности. Диаграмма цветности такой системы должна быть равноконтрастной. Создание равноконтрастной цветовой системы имеет очень большое практическое значение, так как наличие ее позволяет исследовать и нормировать допуски при воспроизведении цвета.

Диаграмма Джадда. Первая практически приемлемая диаграмма цветности была создана Джаддом [Л. 27], изучившим распределение цветовых порогов в поле реальных цветов путем построения кривых, равноудаленных по числу цветовых порогов от точки заданной цветности. Эти кривые были построены Джаддом в плоскости диаграммы *xy* (плоскость $x'+y'+z'=1$) на основе результатов предшествующих опытов (§ 1-10). Геометрическое место точек, удаленных на одинаковое количество цветовых порогов от точки любой цветности в плоскости диаграммы *xy*, по Джадду является некоторой замкнутой кривой (рис. 2-30), по форме приближающейся к эллипсу. Эллиптическая форма равноконтрастных кривых в плоскости равной яркости следует непосредственно из теории пространства цветовых ощущений, разработанной Э. Шредингером [Л. 3].

Эллиптическая форма кривой, равноудаленной от заданной цветности на один цветовой порог, объясняется согласно теории Шредингера возможностью рассмотрения цветового порога как погрешности при установлении равенства цветности двух смежных полей. Следовательно, кривую, представляющую собой геометрическое место точек, равноудаленных на один порог от точки заданной цветности, можно рассматривать, как эллипс ошибок установления колориметрических равновесий.

Для иллюстрации этого положения рассмотрим вопрос о точности колориметрических измерений. При q измерениях координат цветности заданного излучения C в системе с произвольно выбранными основными цветами M, N и P получим q пар значений m_i и n_i.

Средние арифметические значения измеряемых координат цветности определяется как

$$m_{cp}=\frac{1}{q}\sum_{i=1}^{i=q} m_i, \quad n_{cp}=\frac{1}{q}\sum_{i=1}^{i=q} n_i.$$

Точность проведенных измерений принято оценивать средним квадратичным отклонением:

$$\sigma_m=\sqrt{\frac{1}{q}\Sigma\varphi_i^2}\ ; \quad \sigma_n=\sqrt{\frac{1}{q}\Sigma\vartheta_i^2}\ , \tag{2-82}$$

где $\varphi_i=m_i-m_{cp}$; $\vartheta_i=n_i-n_{cp}$ — отклонения измеренных координат цветности от среднего значения.

Нанесем на координатной плоскости MNP точку C (рис. 2-31) с координатами m_{cp}, n_{cp} и построим дополнительную координатную систему с нача-

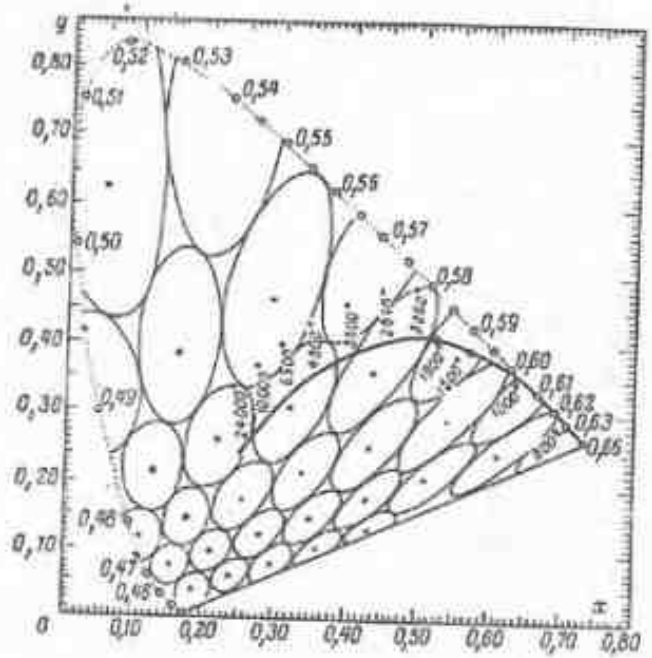


Рис. 2-30.

лом в точке C (m_{cp}, n_{cp}) и осями $\varphi\vartheta$, параллельными координатным осям Pm и Pn. Пусть точка $C_i(m_i, n_i)$ характеризует цветность заданного излучения, полученную при i-м измерении. Координаты точки C_i в новой системе будут:

$$\varphi_i=m_i-m_{cp} \text{ и } \vartheta_i=n_i-n_{cp}.$$

Проведя произвольно под углом α к оси $C\varphi$ прямую $C\vartheta$, напишем выражение отклонения точки по прямой $C\vartheta$:

$$CH_i=\varphi_i\cos\alpha+\vartheta_i\sin\alpha.$$

Выражение среднего квадратичного отклонения получим на основе (2-82):

$$q\sigma_\alpha^2=\sum_{i=1}^{i=q}(\xi_i\cos\alpha+\vartheta_i\sin\alpha)^2=\cos^2\alpha\sum_{i=1}^{i=q}\varphi_i^2+$$

$$+\sin^2\alpha\sum_{i=1}^{i=q}\vartheta_i^2+2\sin\alpha\cos\alpha\sum_{i=1}^{i=q}\varphi_i\vartheta_i. \tag{2-82a}$$

Отложим по прямой $C\vartheta$ отрезок $CS=\sigma_\alpha$. Если φ и ϑ — координаты точки S в координатной системе $C\varphi$ и $C\vartheta$, то уравнение точки S определится согласно (2-82a):

$$q(\varphi^2+\vartheta^2)^2=\varphi^2\Sigma\varphi_i^2+\vartheta^2\Sigma\vartheta_i^2+2\varphi\Sigma\varphi_i\vartheta_i.$$

Повернув оси координат на угол α_0, можно представить полученное уравнение в следующем виде:

$$z^2+\delta^2=a^2z^2+b^2\delta^2. \tag{2-83}$$

Параметрами полученного уравнения эллипса (2-83) в координатных осях Cz и $C\delta$ являются его полуоси:

$$\left.\begin{aligned} a&=\frac{1}{q}\sqrt{\Sigma\vartheta_i^2+\operatorname{ctg}\alpha_0\Sigma\varphi_i\vartheta_i}\\ b&=\frac{1}{q}\sqrt{\Sigma\varphi_i^2-\operatorname{ctg}\alpha_0\Sigma\varphi_i\vartheta_i}\ . \end{aligned}\right\} \tag{2-84}$$

где угол поворота осей α_0 определится как

$$\operatorname{tg}2\alpha_0=\frac{2\Sigma\varphi_i\vartheta_i}{\Sigma\varphi_i^2-\Sigma\vartheta_i^2}\ . \tag{2-85}$$

Размеры таких эллипсов, ориентация и соотношение их осей, как показал Джадд, различны для различных точек диаграммы цветности xy. Для создания равноконтрастной диаграммы было необходимо выбрать такое расположение плоскости единичных цветов в пространстве новой цветовой системы, при котором все эллипсы проектируются в окружности одинакового радиуса. Для выполнения этого условия необходимо было несколько систематизировать форму и расположение равноконтрастных эллипсов цветности. Вследствие того, что такая систематизация экспериментальных кривых и приведение их к эллиптической форме являются отклонениями от действительного расположения равноконтрастных кривых, равноконтрастная диаграмма Джадда является приближенной.

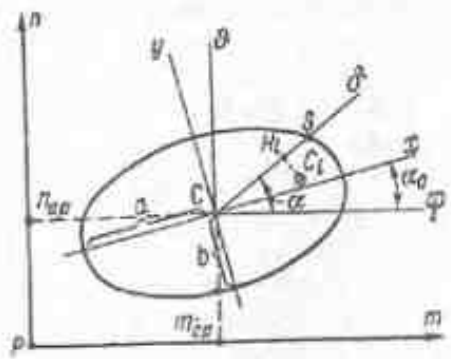


Рис. 2-31.

На рис. 2-30 показаны равноконтрастные эллипсы Джадда в плоскости диаграммы цветности xy, причем их размер принят 10-кратным по отношению к пороговому. Следовательно, эллипсы, ограничивающие области цветностей, не отличимых от заданных, т. е. эллипсы, отстоящие от заданной точки на один порог, имеют линейные размеры примерно[1] в 10 раз меньше размеров эллипсов, изображенных на рисунке. Как можно видеть из рисунка, направление больших осей равноконтрастных эллипсов ориентировано Джаддом по некоторым прямым пучка. Такая исправленная картина расположения равноконтрастных кривых позволила Джадду установить приближенную зависимость между координатами любого цвета прежней XYZ и новой UVW систем:

$$\left.\begin{aligned} u' &= 3{,}1956x' + 2{,}4478y' - 0{,}1434z';\\ v' &= 2{,}5455x' + 7{,}0492y' + 0{,}9963z';\\ w' &= 0{,}0000x' + 0{,}0000y' + 1{,}0000z'. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}86)$$

Согласно (2-63) и (2-86) координаты цветности новой равноконтрастной системы определятся в функции координат цветности прежней системы следующими равенствами:

$$u = \frac{0{,}4661x + 0{,}1593y}{y - 0{,}1574x + 0{,}2424};$$

$$v = \frac{0{,}6581y}{y - 0{,}1574x + 0{,}2424}. \qquad (2\text{-}87)$$

Пользуясь полученными соотношениями, Джадд построил равноконтрастную диаграмму (рис. 2-32), на которой, кроме координатной сетки uv, нанесена сетка прямых $x=\text{const}$ и $y=\text{const}$ *.

Диаграмма Мак-Адама. Последующие более тщательные экспериментальные исследования цветовых порогов в различных точках цветового графика, проведенные Д. Мак-Адамом [Л. 29], подтвердили приближенность равноконтрастной системы Джадда. Д. Мак-Адам на специально созданной установке для смешения цветов произвел многократные колориметрические сравнения смежных полей для 25 заранее выбранных цветов, каждый раз подходя к колориметрическому тождеству

[1] Приближенность определяется неравенством однопороговых смешений даже в пределах каждого равноконтрастного эллипса.

* Джадд построил равноконтрастную диаграмму в трехлинейной системе координат. Для большего удобства пользования этой диаграммой она была преобразована в прямоугольный график uv с координатной сеткой xy Е. С. Ратнером [Л. 28].

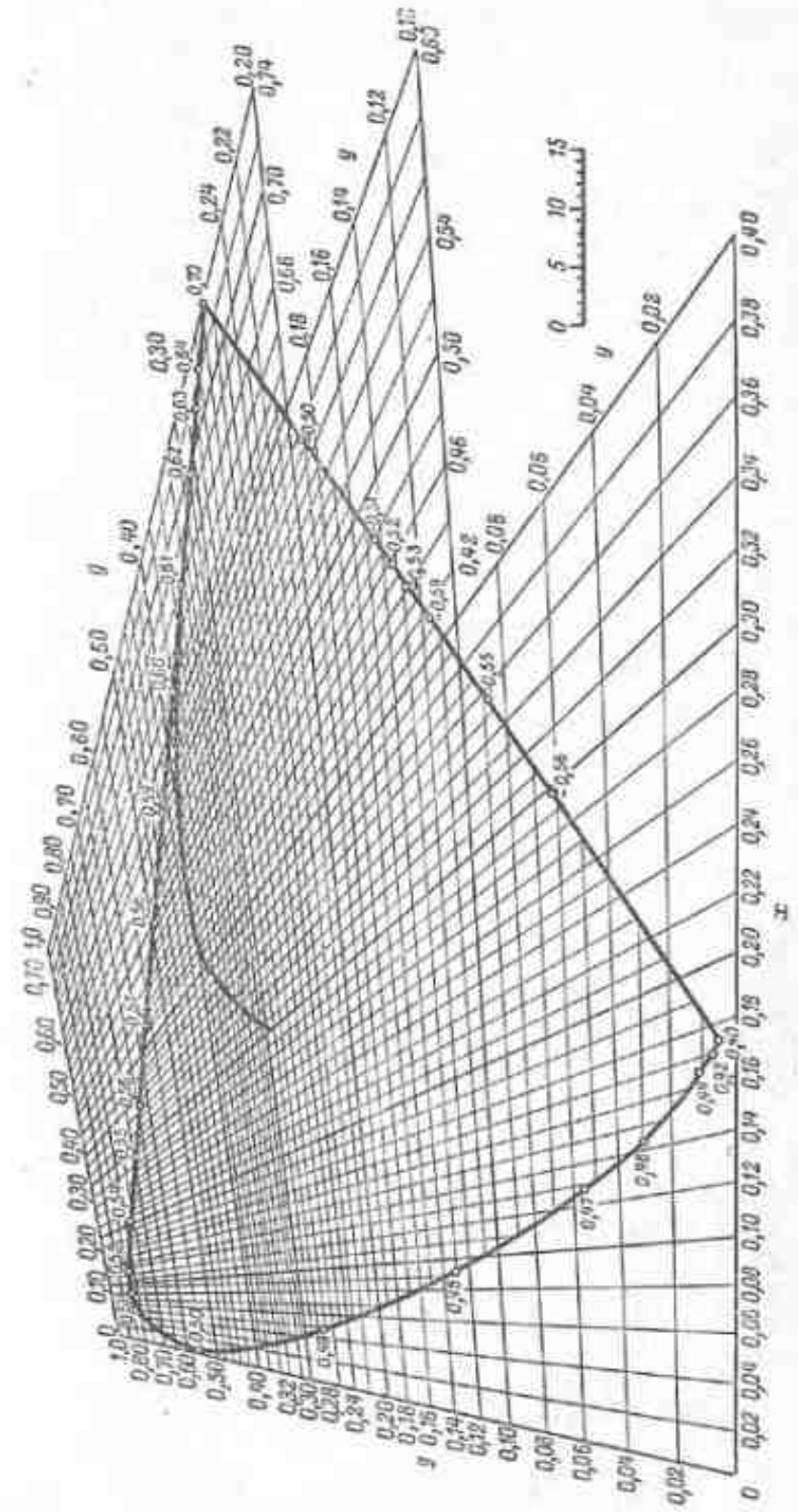


Рис. 2-32.

по различным направлениям изменения цветности. Для каждого из 25 исследованных цветов было проведено по 50 таких сравнений. На основе установления 50 цветовых равенств для каждой выбранной цветности он рассмотрел средние квадратичные отклонения и построил эллипсы этих отклонений. На рис. 2-33 нанесены эллипсы средних квадратичных отклонений для каждой из исследованных цветностей, причем размеры каждого эллипса взяты в 10 раз больше пороговых. Распределение равноконтрастных эллипсов, найденных экспериментально Мак-Адамом, как можно видеть из сопоставления рис. 2-30 и 2-33, значительно отличается от систематизированных Джаддом аналогичных равноконтрастных кривых.

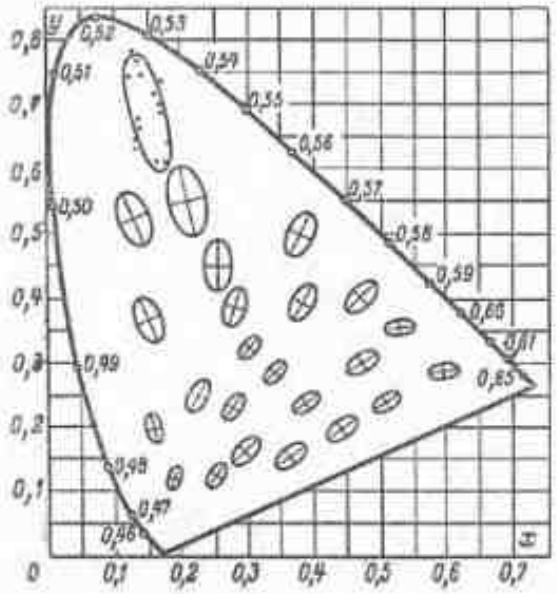


Рис. 2-33.

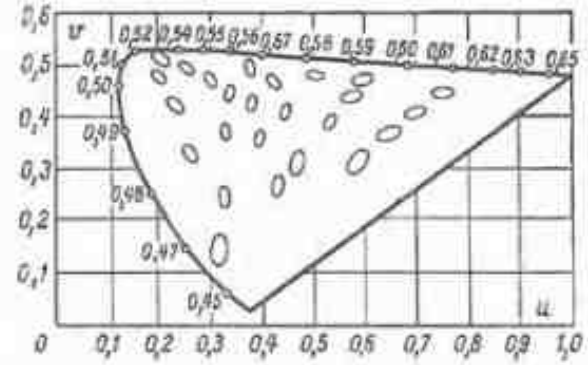


Рис. 2-34

Нанеся эллипсы рассеяния, найденные Мак-Адамом, на диаграмму Джадда (рис. 2-34), можно отчетливо видеть ее приближенность, в особенности в области сине-фиолетовых излучений. На основе экспериментально полученных эллипсов рассеяния Мак-Адам [Л. 29] создал новую равноконтрастную диаграмму цветности, несколько отличную от диаграммы Джадда.

Соотношения координат цвета международной системы с координатами в системе Мак-Адама определяются следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} q' &= \tfrac{2}{3}x'; \\ s' &= y'; \\ t' &= 1{,}5y' - 0{,}5x' + 0{,}5z'. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}88)$$

На основании (2-88) и (2-63) соотношения координат цветности будут*:

$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{4x}{12y - 2x + 3}; \\ s &= \frac{6y}{12y - 2x + 3}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}89)$$

Диаграмма цветности Мак-Адама принципиально не отличается от диаграммы Джадда, так как они обе[1] получены одним и тем же методом линейного проективного преобразования системы *XYZ*. Это преобразование построено на трансформации пороговых эллипсов на диаграмме *xy* в пороговые окружности одинакового радиуса на новой равноконтрастной диаграмме. Такие преобразования неточны потому, что при создании равноконтрастных графиков решается задача определения количественного различия по цветности одинаково ярких излучений, следовательно, исходные экспериментальные равноконтрастные кривые должны располагаться на плоскости равной яркости.

Как показали П. Муи и Д. Спенсер [Л. 30], на плоскости B=const хаотичность расположения пороговых эллипсов значительно уменьшается, однако и в этом случае их расположение и форма не позволяют трансформировать эллипсы в окружности методом линейного проектирования преобразования цветовой системы. Исследуя вопрос о точности равноконтрастных систем, полученных методом линейного проективного преобразования, Л. Зильберштейн [Л. 31] пришел к обоснованному заключению о невозможности получения с помощью этого метода точных равноконтрастных диаграмм.

Система Болдырева—Мартынова. Принципиально другим методом подошли к построению равноконтрастной колориметрической системы Н. Г. Болдырев и К. Б. Мартынов [Л. 32]. Ими произведена трансформация международной системы *XYZ* в равноконтрастную путем графического преобразования уравнения порогового эллипса

$$dS_{\text{ц}}^2 = a_1\,dx^2 + 2a_2\,dx\,dy + a_3\,dy^2 \qquad (2\text{-}90)$$

в уравнение более простого вида

$$dS_{\text{ц}}^2 = du^2 + A(u,\ v)\,dv^2, \qquad (2\text{-}91)$$

---

* В решении XIV Сессии МКО по комитету 1.3.1 (колориметрия) рекомендовано для обеспечения более равноконтрастного размещения цветов на диаграмме цветности использовать соотношения (2-88) и (2-89) Мак-Адама.

[1] Кроме графиков Мак-Адама и Джадда, в США был предложен Брекенриджем и Шарбом аналогичный равноконтрастный график, полученный тем же способом на основе результатов исследования Райта [Л. 40].

где x, y — координаты цветности исходного излучения (координаты центра эллипса);

dx, dy — независимые переменные, определяющие изменение исходной цветности на один цветовой порог при $dS_{ц}$, принятом за единицу;

a_1 a_2 a_3 — коэффициенты, различные для различных исходных цветностей, следовательно, являющиеся функциями координат исходной цветности (центра эллипса);

u, v — новые координаты цветности в равноконтрастной системе при $A(u, v) = \text{const}$.

Графическое преобразование (2-90) и (2-91) произведено Н. Г. Болдыревым и К. Б. Мартыновым путем деления произвольной линии L_0 в плоскости диаграммы x, y на участки с равными значениями $S_{ц} = \int dS_{ц}$ [уравнение (2-90)]. Такой способ деления прямой обеспечивает одинаковые расстояния по числу

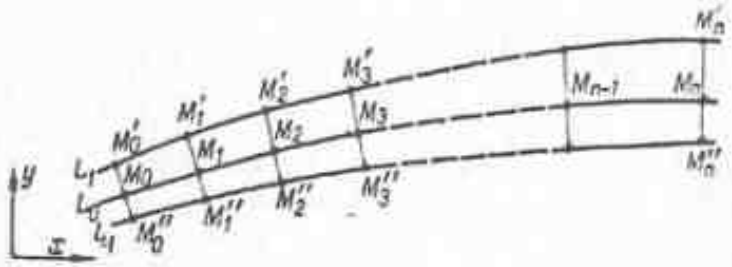


Рис. 2-35.

цветовых порогов между смежными точками M_0, M_1, M_2, ..., M_n (рис. 2-35).

Восстанавливая в каждой точке M_i перпендикуляр к прямой L_0, отложим по направлению перпендикуляра в ту и другую сторону от L_0 расстояния $\Delta S_{ц}$, равные по числу порогов расстояниям между точками M_0 и M_0', M_1 и M_1', ... M_i и M_n'. Соединяя концы перпендикуляров между собой, получим две новые линии L_1 и L_{-1}, геодезически параллельные[1] исходной прямой L_0. Проводя вновь перпендикуляры к линиям L_1 и L_{-1} в точках пересечения их с перпендикулярами к L_0, отложим на вновь полученных перпендикулярах отрезки, равные $\Delta S_{ц}$. Концы этих перпендикуляров дадут новые линии L_2 и L_{-2}. Продолжая это построение, получим сетку геодезически параллельных линий L и их ортогональных траекторий, составленных из отрезков перпендикуляров к ним. Ортогональные траектории линиям L приблизительно можно считать также геодезически параллельными. Учитывая это, авторы нового метода построения равноконтрастной колориметрической системы приняли линии L за координатные линии $u = \text{const}$, а их ортогональные траектории за линии $v = \text{const}$.

[1] Геодезическая параллельность линий определяется равенством расстояний между ними, измеренных числом цветовых порогов.

Исходными данными при построении координатных линий u и v Н. Г. Болдырев и К. Б. Мартынов приняли результаты опытов Мак-Адама. Расстояние между геодезически параллельными линиями при построении координатной сетки uv было принято $\Delta S = 50$ порогов. Построенная указанным способом координатная сетка была корректирована на основе экспериментальных данных В. Райта [Л. 43], который произвел измерения цветовых порогов по 35 направлениям в плоскости цветового графика xy (рис. 2-36).

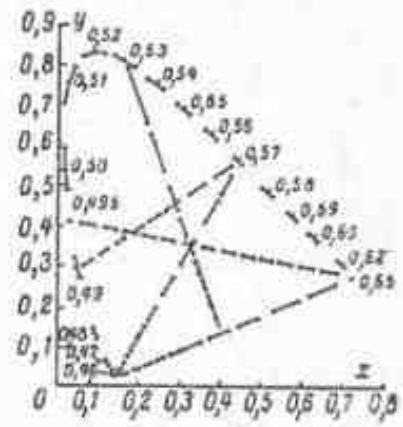


Рис. 2-36.

Располагая координатной сеткой u, v на плоскости XYZ, можно построить цветовой график в прямоугольных координатах uv. Для удобства пользования на этот график (рис. 2-37) нанесены линии равных значений координат цветности международной системы $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$. Как и следовало ожидать, эти линии криволинейны, так же как криволинейна и прямая чистых пурпурных цветов, соединяющая точки однородных излучений $\lambda_ф = 0{,}38$ *мк* и $\lambda_к = 0{,}70$ *мк*. Преобразование цветового графика, предложенное Н. Г. Болдыревым и К. Б. Мартыновым, не относится к линейно проективным преобразованиям, вследствие чего прямые в координатах xy, как правило, криволинейны в новой координатной системе. Так, например, большинство линий постоянного цветового тона в новом графике криволинейны, что соответствует опытным данным.

Система Шкловера. Третий метод построения равноконтрастной колориметрической системы был предложен Д. А. Шкловером [Л. 34, 35] на основе физиологической системы *КЗС*. Принимая в соответствии с законом Вебера-Фехнера зависимость между уровнем ощущения и внешней причиной, его вызвавшей, логарифмической, введем три параметра $V_к$, $V_з$ и $V_с$:

$$\left.\begin{aligned} V_к &= \lg(\kappa' + A);\\ V_з &= \lg(з' + A);\\ V_с &= \lg(с' + A), \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}92)$$

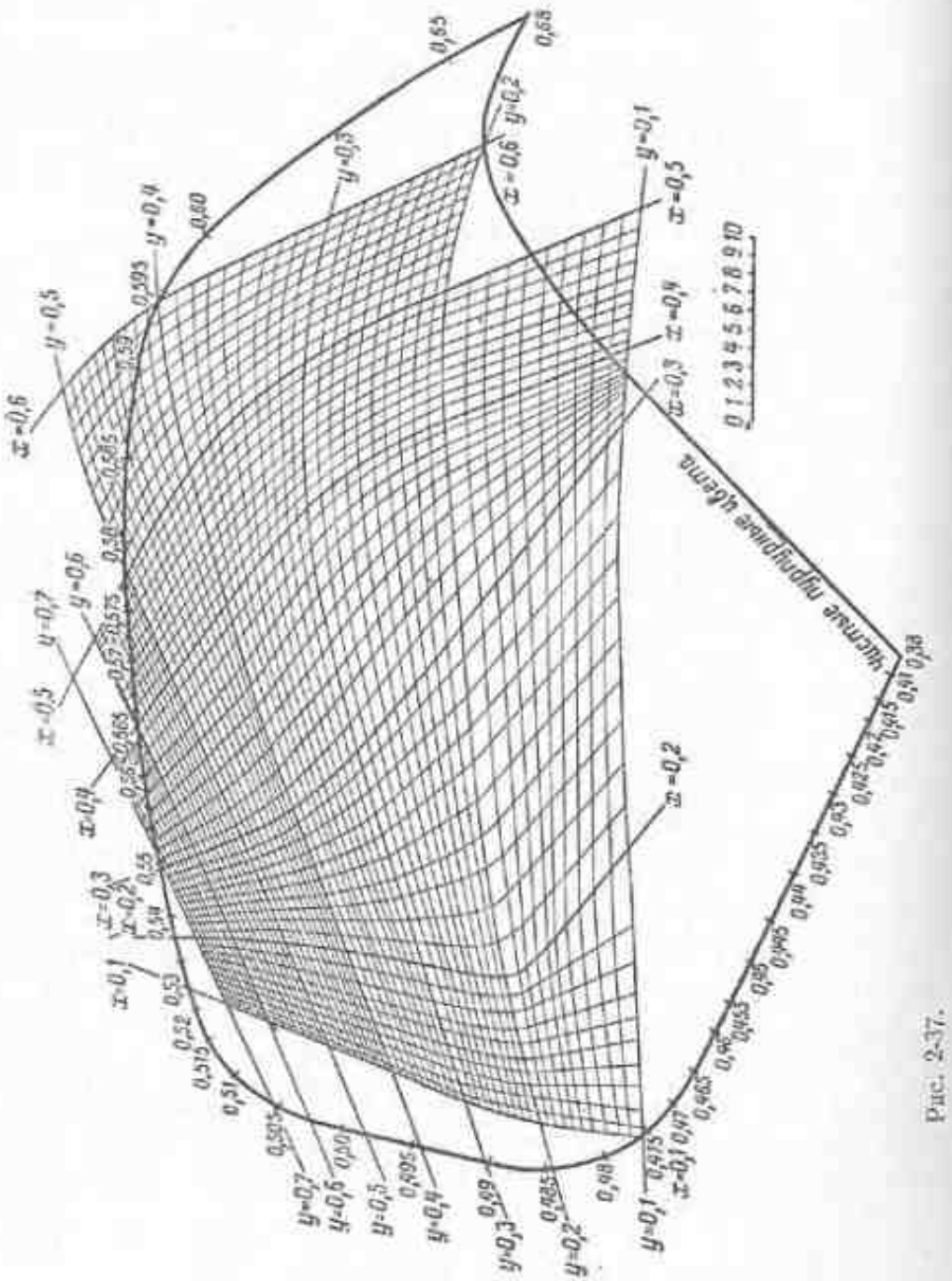


Рис. 2-37.

где $\kappa' = \int b(\lambda)\,\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda$;
$з' = \int b(\lambda)\,\bar{з}(\lambda)\,d\lambda$;
$с' = \int b(\lambda)\,\bar{с}(\lambda)\,d\lambda$
— координаты цвета в физиологической цветовой системе *КЗС*;

A — постоянная величина, характеризующая собственный свет сетчатой оболочки глаза.

Приняв в первом приближении частоту импульсов тока действия пропорциональной логарифму яркости, можем считать, что параметры $V_к$, $V_з$ и $V_с$ определяют частоты импульсов токов в волокнах зрительного нерва, следовательно (§ 1-8), *КЗС*-компоненты светлоты.

Использование диаграммы цветности основной физиологической системы для целей построения равноконтрастной диаграммы цветности впервые было предложено С. О. Майзелем [Л. 1], который принимал, что ощущение цветности определяется двумя отношениями уровней реакций двух цветовоспринимающих приемников к уровню реакции третьего:

$$m = \frac{з'}{\kappa'} \text{ и } n = \frac{с'}{\kappa'}. \qquad (2\text{-}93)$$

Принимая в соответствии с законом Вебера—Фехнера

$$\frac{\Delta m}{m} = \text{const} \text{ и } \frac{\Delta n}{n} = \text{const},$$

С. О. Майзель предложил строить равноконтрастную диаграмму цветности путем нанесения на координатную сетку *кз* двух пучков прямых $m = \text{const}$ и $n = \text{const}$ с постоянными приростами, равными μ порогам[1]: $\frac{\Delta m}{m} = 0{,}037\mu$ и $\frac{\Delta n}{n} = 0{,}2\mu$. Сетка прямых $n = \text{const}$ и $m = \text{const}$ с интервалами $\frac{\Delta m}{m} = \text{const}$ и $\frac{\Delta n}{n} = \text{const}$ разбивает все поле реальных цветов на равноконтрастные участки. Равноконтрастная диаграмма цветности не была построена С. О. Майзелем из-за отсутствия достаточно достоверных данных о значениях спектральной чувствительности трех приемников глаза и о пороговых значениях приращений $\frac{\Delta n}{n}$ и $\frac{\Delta m}{m}$.

В отличие от предложения С. О. Майзеля о формировании ощущения цветности в функции отношений уровней возбуждения

[1] Согласно предшествующим исследованиям С. О. Майзель в первом приближении принял пороговыми значениями $\frac{\Delta m}{m} = 0{,}037$ и $\frac{\Delta n}{n} = 0{,}20$.

уравнения (2-93) Д. А. Шкловер считает, что глаз человека реагирует на разность токов действия:

$$\left.\begin{aligned} V_\alpha &= a_1(V_К - V_З) = a_1 \lg \frac{\kappa' + A}{s' + A} = a_1 \lg \frac{\alpha + \gamma}{1 + \gamma}; \\ V_\beta &= a_2(V_С - V_З) = a_2 \lg \frac{c' + A}{s' + A} = a_2 \lg \frac{\beta + \gamma}{1 + \gamma}, \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}94)$$

где $\alpha = \frac{\kappa'}{s'}$ и $\beta = \frac{c'}{s'}$ — коэффициенты, определяющие цветность (§ 2-1);

$\gamma = \frac{A}{s'}$ — относительное значение яркости собственного света сетчатки.

Если уровень собственного света сетчатой оболочки, определяемый постоянной A, пренебрежимо мал по сравнению с уровнями внешнего возбуждения трех *кзс*-приемников глаза то получим:

$$V_\alpha = a_1 \lg \alpha \quad \text{и} \quad V_\beta = a_2 \lg \beta. \quad (2\text{-}95)$$

Вследствие того, что для белого равноинтенсивного излучения по условию построения всех цветовых систем все три координаты цвета одинаковы ($\kappa' = s' = c'$), значения V_α и V_β для этого цвета будут равны нулю.

Приняв в качестве координат цветности величины V_α и V_β (рис. 2-38), получим равноконтрастную диаграмму цветности[1] в пределах точности применения к цветовым порогам закона Вебера—Фехнера с поправкой на собственный свет сетчатки. Отличительной особенностью новой диаграммы цветности является зависимость расположения локуса цветностей однородных излучений от яркости исследуемого цвета. На приведенной диаграмме цветности $V_\alpha V_\beta$ нанесены две граничные кривые цветности однородных излучений для $\gamma = \frac{A}{s'} = 0{,}5$ и $\gamma = 1{,}0$, показывающие изменение насыщенности цвета однородных излучений при изменении яркости, что качественно соответствует опытным данным (§ 1-10).

Также соответствует опытным данным зависимость насыщенности цвета однородных излучений в функции длины волны,

[1] Диаграмма $V_\alpha V_\beta$ построена Д. А. Шкловером для измерительной колориметрической системы (§ 2-23) с кривыми сложения: $\bar{m}(\lambda) = 0{,}833\bar{x}(\lambda) + 0{,}333\bar{y}(\lambda) + 0{,}167\bar{z}(\lambda)$; $\bar{n}(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$ и $\bar{p}(\lambda) = \bar{z}(\lambda)$.

найденная из диаграммы цветности V_α, V_β (рис. 2-39). Вследствие равноконтрастности диаграммы V_α, V_β и расположения белого в точке $V_\alpha = 0$ и $V_\beta = 0$ насыщенность любого цвета определится расстоянием точки исследуемого цвета (от начала координат. В соответствии с (2-94) это расстояние, определяющее насыщенность исследуемого цвета, можно записать следующим равенством:

$$H = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} = \sqrt{\left(a_1 \lg \frac{\alpha + \gamma}{1 + \gamma}\right)^2 + \left(a_2 \lg \frac{\beta + \gamma}{1 + \gamma}\right)^2}. \quad (2\text{-}96)$$

Кривые $H_\lambda = f(\lambda)$, построенные для $\gamma = 0{,}5$ и $\gamma = 1{,}0$ (рис. 2-39), с достаточной точностью совпадают с результатами экспериментов нескольких авторов [Л. 90]. Линии равной насыщенности цветов, обладающих чистотой, меньшей единицы, представляют собой окружности с центром в начале координат диаграммы $V_\alpha V_\beta$ (рис. 2-38). На диаграмме xy они показаны замкнутыми кривыми (рис. 2-40), по форме аналогичными кривым равной насыщенности, построенным по результатам эксперимента (рис. 2-48). Линии постоянного цветового тона на диаграмме $V_\alpha V_\beta$ непрямолинейны, что соответствует явлению Эбнея (§ 1-10). Изменение цветового тона с изменением чистоты цвета качественно соответствует результатам экспериментального исследования этого феномена В. Эбнеем и Н. Т. Федоровым.

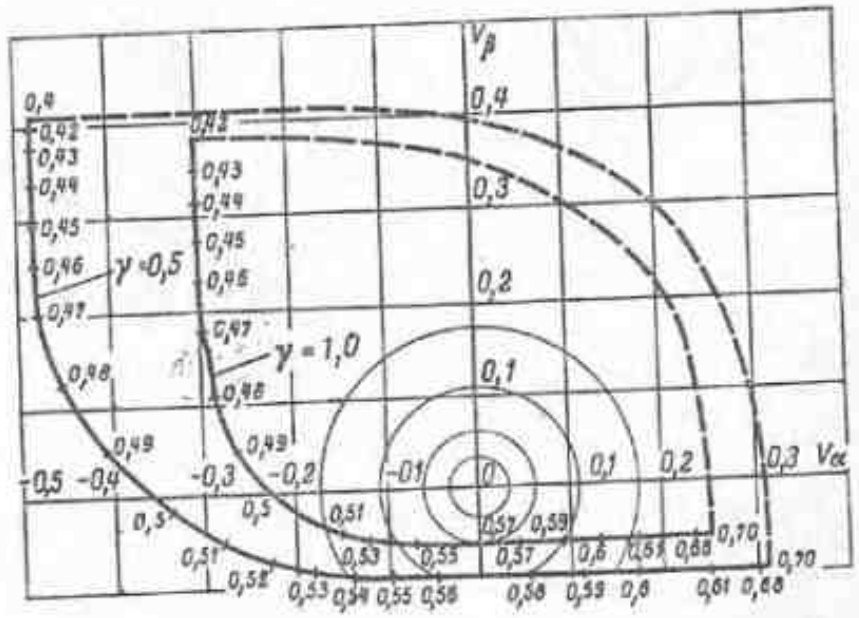


Рис. 2-38.

Явление Бецольда—Брюкке, наблюдаемое (§ 1-10) при увеличении яркости исследуемого излучения, также находит отражение в новой равноконтрастной цветовой системе. Из диаграммы цветности $V_a V_3$ (рис. 2-38) можно видеть, что с увеличением яркости уменьшается длина волны цветового тона у красных цветов — $\lambda \geqslant 0{,}57$ *мк* и увеличивается у зеленых и желто-зеленых — $0{,}57$ *мк* $> \lambda > 0{,}51$ *мк*. Как известно, согласно исследованиям Бецольда и Брюкке с увеличением яркости красные излучения воспринимаются наблюдателями как оранжево-красные, а зеленые — как желто-зеленые. Различие цветовых порогов по цветовому тону, найденное по диаграмме цветности $V_a V_3$, также достаточно удовлетворительно совпадает с результатами экспериментов (рис. 2-41).

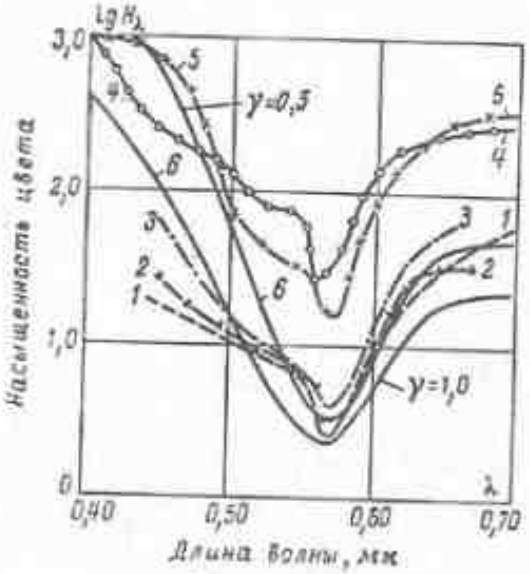


Рис. 2-39.

1—по Нельсону; 2—по Райту; 3—по Брикуэду; 4—по Питту; 5—по Присту; 6—расчетные значения по диаграмме Шиловера.

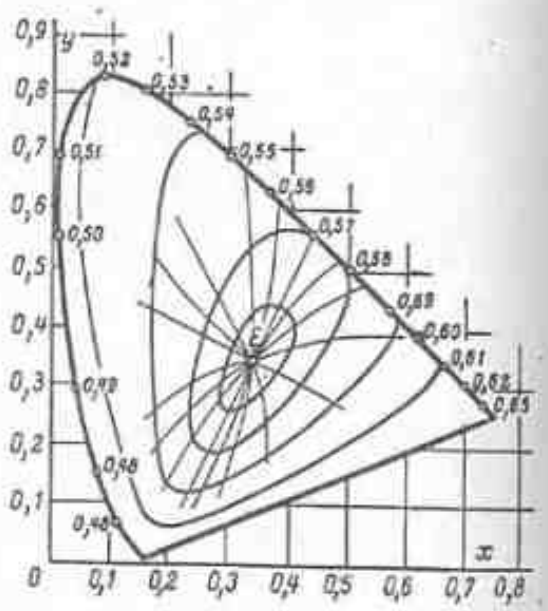


Рис. 2-40.

Для удобства пользования диаграммой $V_a V_3$ на нее принято наносить сетку равных значений x и y (рис. 2-42). На диаграмме цветности в координатах $V_a V_3$ построены по результатам исследования Райта (рис. 2-42) отрезки прямых, соответствующие разности координат цветности, определяющей трехкратный порог от центра каждого отрезка. Примерное равенство длин этих отрезков подтверждает равноконтрастность этой диаграммы цветности.

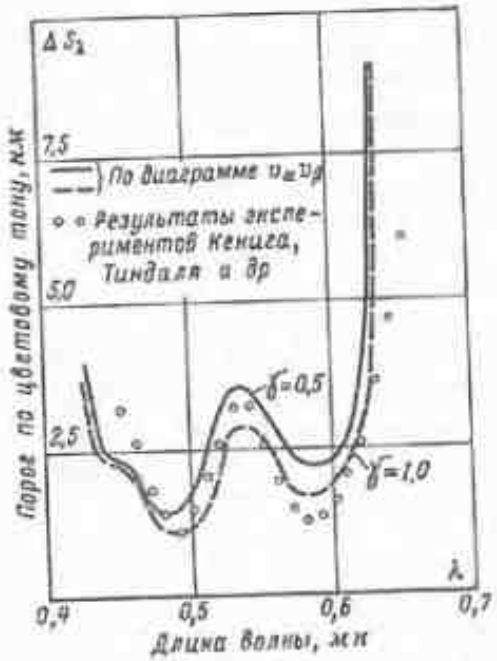


Рис. 2-41.

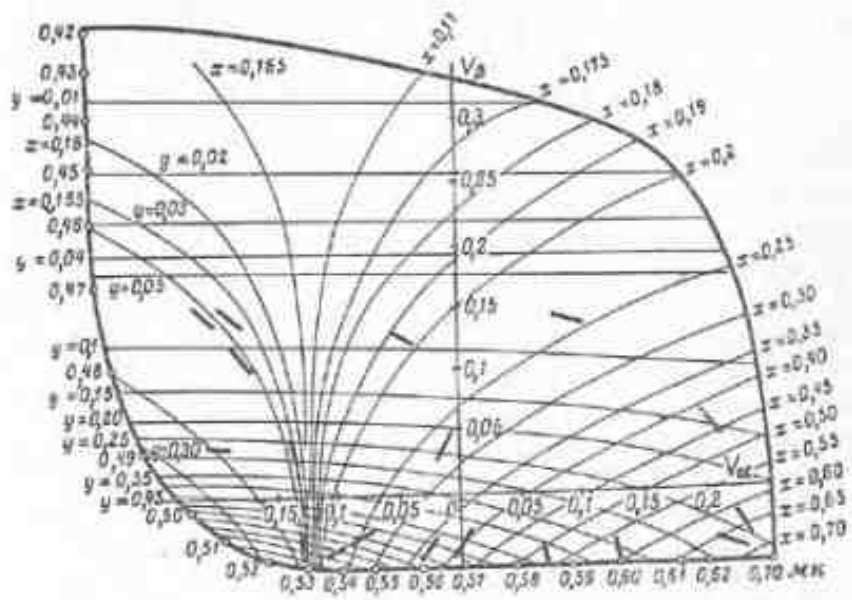


Рис. 2-42.

2-11. Цветовые атласы

Принципы построения атласов. Со времен Ньютона многие исследователи пытались систематизировать многообразие цветов, а также найти их количественные выражения. Необходимость однообразного обозначения цветов привела к попыткам создания цветовых шкал в виде отдельных таблиц и цветовых атласов.

Наличие цветовых таблиц и атласов позволяет определять цвет рассеивающей поверхности без измерения, путем подбора в таблицах атласа выкраски, соответствующей заданному цвету по цветовому тону, чистоте цвета и относительной яркости. Сравнительно широкое распространение метода ориентировочного определения цвета по таблицам цветового атласа можно объяснить простотой и наглядностью этого метода.

Для повышения точности метода безынструментального определения цвета необходимо, чтобы таблицы цветового атласа удовлетворяли следующим требованиям:

1) Таблицы выкрасок цветового атласа должны полно охватывать все многообразие цветов, встречающихся в природе.

2) Образцовые выкраски должны равномерно по цветовому ощущению заполнять все поле реальных цветов.

3) Расположение выкрасок на таблицах должно быть систематизировано с целью максимального упрощения подбора пары цветов, между которыми заключен заданный цвет.

4) Все красители, применяемые для изготовления образцовых выкрасок, должны быть цветоустойчивы (их цвет не должен меняться со временем).

Атлас Оствальда. Наибольшее распространение в практике безынструментального определения цвета получили *цветовые атласы: Оствальда, Мэнселла и Рабкина.* В. Оствальд (1853—1932) при построении цветового атласа рассматривал все цвета как смесь максимально насыщенного цвета заданного цветового тона с белым и черным [Л. 36]. Каждый нормированный цвет в атласе Оствальда обозначается цифрой и двумя буквами, определяющими содержание белого (первая буква) и черного (вторая буква). Цифра каждого шифра нормированного цвета по Оствальду определяет цветовой тон. Процентное содержание белого в выскрасках атласа Оствальда регламентируется геометрическим рядом

89	56	35	22	14	8,9	5,6	3,5	2,2	1,4
a	*c*	*e*	*g*	*i*	*l*	*n*	*p*	*r*	*t*

Нормирование черного определяется В. Оствальдом, как дополнение до 100% к установленной шкале белого

11	44	65	78	86	91,1	94,4	96,5	97,8	98,6
a	*c*	*e*	*g*	*i*	*l*	*n*	*p*	*r*	*t*

Принимая эти шкалы в основу построения цветового атласа, В. Оствальд установил некоторые цветовые нормы. Введение таких норм, по мнению В. Оствальда, должно ограничить бесчисленное множество цветов, встречающихся в природе, некоторым конечным набором нормированных цветов. Эта мысль была заимствована В. Оствальдом из гармонии звуков, в которой установлен вполне определенный набор стандартных звуков, составляющих гамму.

Для нормирования выкрасок по цветовому тону Оствальд составил цветовой круг из 100 насыщенных цветов, из которых было выделено 24 равноотстоящих цвета, составляющих восемь групп «Основных цветов» — по три представителя в каждой:

Желтый	00	04	08
Оранжевый	13	17	21
Красный	25	29	33
Фиолетовый	38	42	46
Синий	50	54	58
Голубой	63	67	71
Аквамариновый	75	79	83
Лиственно-зеленый	88	92	96

При выборе расположения цветов по кругу дополнительные цвета размещались друг против друга и в цифровом обозначении отличались на 50. Таким образом, оствальдовский шифр 29 *lc* определяет красный цвет с примесью 8,9% белого и 44% черного. Каждая таблица цветового атласа Оствальда представляет однотонный равносторонний треугольник (рис. 2-43), в одной из вершин которого располагался насыщенный цвет (поле *ta*). Этот цвет содержит 87,6% чистого цвета заданного тона, 1,4% белого и 11% черного.

Вследствие большой трудности воспроизведения поля *ta* в наиболее распространенных атласах вершина насыщенного цвета по Оствальду определяется шифром *pa*. Сторона, противоположная этой вершине, является ахроматической осью, так как содержит выкраски с содержанием только белого (от 89 до 3,5%) и черного (от 11 до 96,5%). Выкраски, расположенные параллельно стороне *FS*, составляют ряды, в которых доля белого постоянна, вследствие чего цвет этих выкрасок изменяется лишь в результате изменения соотношения черного и насыщенного. Ряды выкрасок, расположенные параллельно стороне *FW*, характеризуются постоянной долей черного и переменным соотношением белого и насыщенного.

Из приведенного описания и схемы расположения выкрасок (рис. 2-43) можно видеть, что любую таблицу атласа Оствальда следует рассматривать как наглядное изображение сечения цветового пространства полуплоскостью, проходящей через вектор белого цвета (ахроматическую ось). Из этого следует, что две

таблицы дополнительных цветов можно рассматривать в совокупности как сечения цветового пространства одной плоскостью.

Указанная аналогия таблиц атласа с сечением цветового пространства не является тождеством потому, что закономерности расположения выкрасок на таблице и векторов в цветовом пространстве неодинаковы. К этому следует добавить, что таблица любого цветового атласа, в том числе и атласа Оствальда, охватывает лишь часть цветового пространства, так как насыщенные цвета *pa* и даже *ta* всех таблиц имеют чистоту, меньшую единицы. Для иллюстрации этого на диаграмме цветности

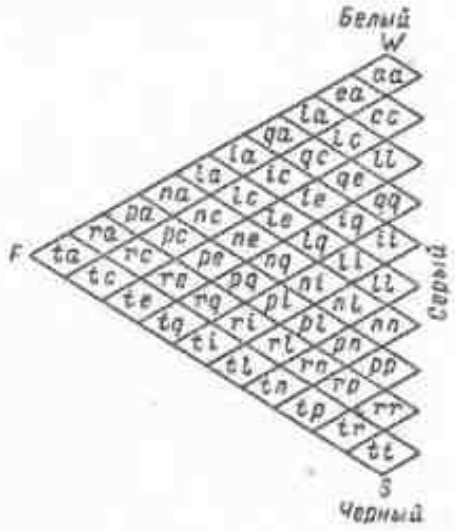


Рис. 2-43.

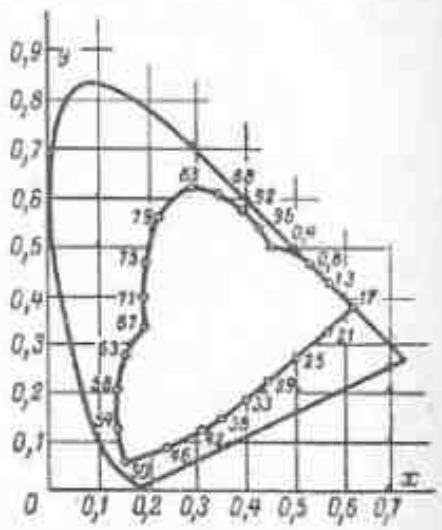


Рис. 2-44.

xy (рис. 2-44) изображена линия предельно насыщенных цветов по Оствальду.

Атлас Мэнселла. А. Мэнселл (1858—1918) построил цветовой атлас также по принципу сечения цветового пространства серией плоскостей, причем в отличие от атласа Оствальда в атласе Мэнселла [Л. 37] репродуцированы сечения не только плоскостями, проходящими через ахроматическую ось, но также плоскостями, перпендикулярными ей. В атласе Мэнселла каждая выкраска характеризуется: цветовым тоном, коэффициентом яркости и чистотой цвета. Вследствие того, что действительный цветовой тон каждой выкраски атласа зависит от спектрального состава излучения источника света, освещающего таблицу, цветовой тон маркируется А. Мэнселлом некоторым шифром. В основу этого шифра положены десять основных цветов: красный — R, оранжевый — YR, желтый — Y, желто-зеленый — GY, зеленый — G, сине-зеленый — BG, синий — B, фиолетовый — PB, пурпурный — P, пурпурно-красный RP. Эти основные цвета были выбраны А. Мэнселлом как равноотстоящие друг от друга

по цветовому ощущению. Десять промежуточных цветовых тонов обозначены дополнительно цифрой 10, стоящей перед буквенным индексом (рис. 2-45).

В большом атласе Мэнселла предусмотрено сто различных цветовых тонов, каждый из которых обозначен цифровым и буквенным индексами. Цифровой индекс определяет порядковый номер смещения заданного цветового тона от основного, каждому из которых приписан индекс 5, например 5Y — желтый, 5GY — желто-зеленый и т. д. В промежутках между основными цветами на равных расстояниях расположены девять цветов с индексами: 6Y, 7Y, 8Y, 9Y, 10Y, 1GY, 2GY, 3GY и 4GY, из которых цвет 10Y равноудален от основных 5Y и 5GY.

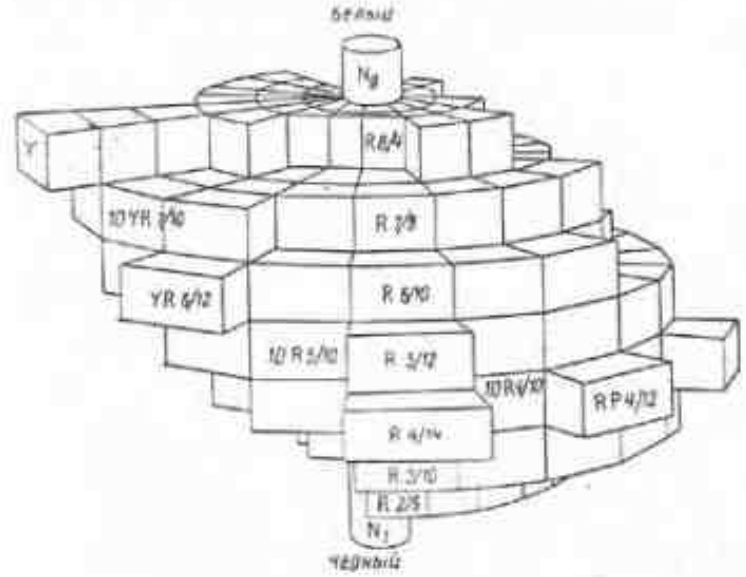


Рис. 2-45.

Коэффициенты яркости выкрасок, измеренные под углом $\alpha=45^\circ$ при перпендикулярном освещении таблицы, характеризуется числителем дроби, следующей за буквенным индексом цветового тона. Знаменатель этой дроби определяет чистоту цвета выкраски. По значениях коэффициентов яркости все продольные сечения цветового пространства, изображенные на таблицах постоянного цветового тона (рис. 2-46), разделены на девять уровней. Коэффициент яркости каждого уровня определяется квадратичной шкалой (табл. 13). Каждой группе яркости

Таблица 13

Коэффициенты яркости по Мэнселлу

Уровень светлоты . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент яркости .	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81

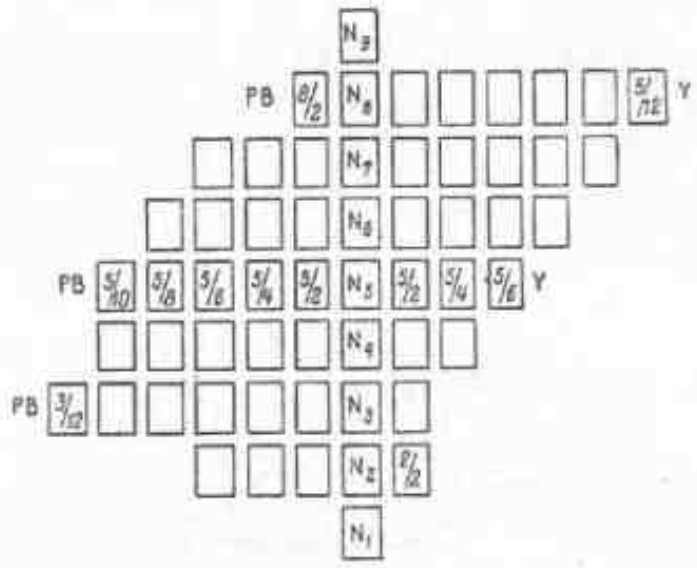


Рис. 2-46.

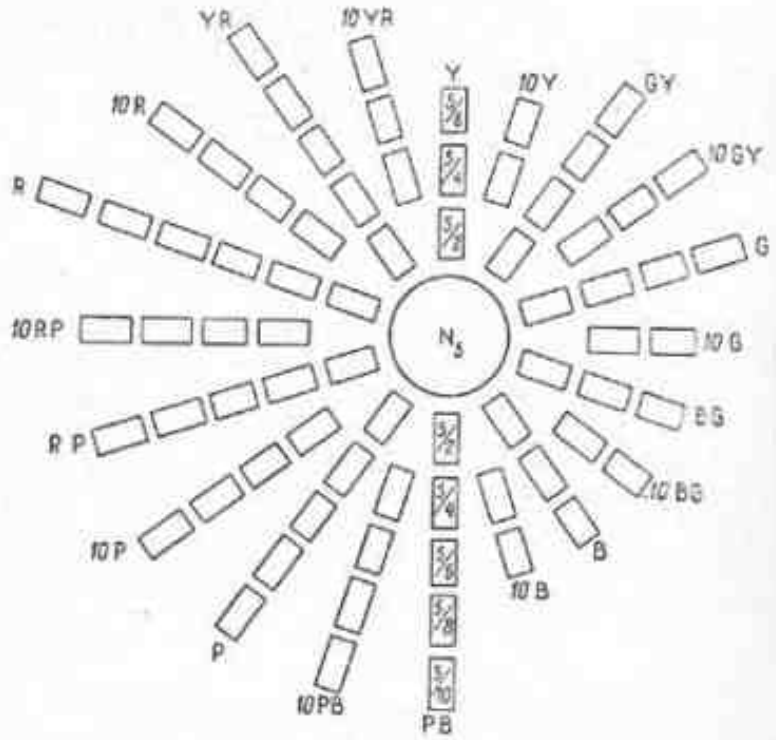


Рис. 2-47.

соответствует набор цветов различного цветового тона и чистоты (рис. 2-47). Центральное поле этой таблицы, представляющей поперечное сечение цветового пространства, занимает ахроматический цвет с коэффициентом яркости, соответствующим изображенному уровню сечения пространства (в нашем случае $r=0{,}25$). Как можно видеть из продольного сечения (рис. 2-46), в атласе Мэнселла должно быть семь таблиц с постоянным коэффициентом яркости, так как верхнее и нижнее сечения соответствуют белому и черному цветам. Этот же рисунок показывает, что цвета выкрасок таблицы постоянного цветового тона отличаются друг от друга чистотой (по горизонтали) и коэффициентом яркости (по вертикали). Так, например, ряд выкрасок N_5 в таблице PB — Y (рис. 2-47) соответствует цветам с цветовым тоном PB (влево от N_5) с коэффициентом яркости $r=0{,}25$ и чистотой, изменяющейся от 0 до 0,75, что соответствует цветам N_5 и PB 5/10, а также цветам N_5...Y 5/6, последний из которых характеризуется цветовым тоном Y и чистотой $p=0{,}2$. Как показали исследования Д. Никерсон [Л. 39, 40], цвета с одинаковой индексацией цветового тона и чистоты цвета по Мэнселлу имеют в действительности неодинаковые значения этих характеристик цветности (рис. 2-48). Особенно значительное расхождение имеет место с выкрасками постоянного цветового тона. Согласно этим исследованиям коэффициент яркости выкрасок с постоянным значением относительной яркости по Мэнселлу также непостоянен.

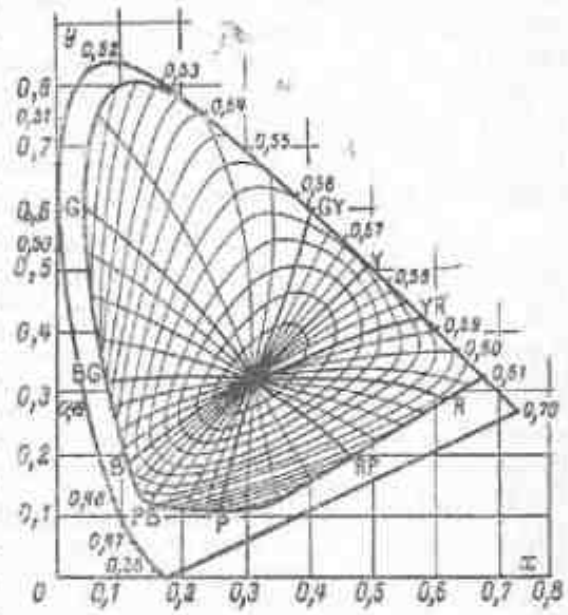


Рис. 2-48.

Атлас Е. Б. Рабкина. В СССР издан цветовой атлас Е. Б. Рабкина [Л 38], составленный из 37 таблиц. Основные цветовые таблицы атласа представляют сечения цветового тела полуплоскостями с общей осью ахроматических излучений. Количество таких сечений в атласе Рабкина равно 12. Выкраски каждой таблицы атласа расположены равносторонними треугольниками по 55 образцов в каждом. Основанием каждого такого треугольника служит ахроматическая ось с интервалами коэффициента отражения между смежными выкрасками, выбранными по закону Вебера — Фехнера. Количество нейтральных выкрасок, лежащих в основании цветового треугольника каждой

таблицы, принято равным 10. Вершиной каждого треугольника является выкраска с цветом максимальной насыщенности. Как показали тщательные измерения таблиц цветового атласа Е. Б. Рабкина, максимальная чистота цветов, лежащих в вершине треугольников, колеблется от 0,87 (красные и оранжевые цвета) до 0,02 (сине-фиолетовые оттенки цвета). Горизонтальные ряды выкрасок характеризуются одинаковой чистотой цвета, понижающейся по мере приближения к основанию треугольника.

Таблицы, предназначенные для измерительных целей, снабжены просечками, через которые наблюдатель видит исследуемый цвет. Все выкраски тщательно измерены в условиях освещения белым равноинтенсивным излучением. Приведенные в атласе таблицы координат цветности в международной системе *XYZ*, цветового тона и чистоты цвета каждой выкраски в значительной мере облегчают сопоставление исследуемого цвета с его колориметрическими характеристиками.

Описанные принципы построения цветовых атласов отличаются лишь системой расположения цветовых выкрасок на таблицах атласов и схемами описания и обозначения цветов. Общим недостатком всех цветовых атласов и цветовых таблиц, предназначенных для безынструментального определения цвета, является недостаточная точность. Погрешности подбора цвета заданной поверхности по таблицам цветового атласа определяются не только прерывистостью изменения эталонного набора цветов, но также и возможным различием спектральных кривых отражения выкраски, подобранной в атласе по принципу наибольшего цветового сходства с исследуемой цветной поверхностью.

Уменьшение погрешности, получаемой за счет дискретности эталонов цвета, возможно за счет уменьшения цветового различия по цветовому тону таблиц атласа, а также по чистоте и коэффициенту яркости смежных выкрасок в каждой таблице. Вполне понятно, что это приводит к увеличению атласа [1], следовательно, его удорожанию.

Погрешность, возникающая в результате различия спектральных кривых отражения, будет тем значительнее, чем больше отличается спектральный состав света, падающего на поверхность исследуемого цвета и на таблицы атласа при их сопоставлении, от спектрального состава света, падающего на исследуемую поверхность в процессе ее эксплуатации. Как известно, цветовое тождество двух сравниваемых цветных поверхностей при различных спектрах падающего на них света имеет место лишь при тождественности их спектральных кривых отражения.

Из этого условия следует сделать вывод о необходимости соблюдать соответствие спектрального состава света при сопоставлении исследуемого цвета с цветовой таблицей атласа и при его использовании, что не во всех случаях возможно.

ЦВЕТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

2-12. Расчет цвета излучения с линейчатым спектром

Расчет цвета или цветности сводится к расчетному определению их координат по заданному спектральному распределению излучения. Как известно, излучение с линейчатым спектром состоит из совокупности дискретных однородных излучений определенной мощности. Спектральное распределение такого излучения определяется значениями лучистых или световых потоков отдельных линий (ч. 1, § 1-6). Согласно (2-30) координаты цвета излучения с линейчатым спектром следует определять суммой координат цвета отдельных линий. В том случае, если спектральное распределение излучения задано значениями однородных лучистых потоков $F_1, F_2, \ldots, F_n$, расчет цвета излучения производят по следующей схеме:

$$\left.\begin{aligned} x'_i &= \bar{x}_i F_i; \\ y'_i &= \bar{y}_i F_i; \\ z'_i &= \bar{z}_i F_i, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}97)$$

где x'_i, y'_i, z'_i — координаты цвета излучения i-й линии с длиной волны λ_i;

$\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$, $\bar{z}_i$ — удельные координаты цвета однородного излучения с длиной волны λ_i;

F_i — однородный лучистый поток i-й линии с длиной волны излучения λ_i, *вт**.

Значения координат цвета сложного излучения, состоящего из n линий с длинами волн излучения $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$, определяются суммами соответствующих координат цвета излучений отдельных линий:

$$\left.\begin{aligned} x' &= \sum_{i=1}^{i=n} x'_i; \\ y' &= \sum_{i=1}^{i=n} y'_i; \\ z' &= \sum_{i=1}^{i=n} z'_i. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}98)$$

Координаты цветности излучения определяются уравнением (2-10):

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

где $\sigma = x' + y' + z'$ — сумма координат цвета заданного излучения.

[1] Полный атлас Мэнселла содержит более 3 500 эталонных выкрасок.

* Однородное излучение i-й линии может быть задано любой лучистой величиной, в частности лучистой яркостью B_i, *вт·м*$^{-2}$*·стер*$^{-1}$. В этом случае количественной характеристикой цвета исследуемого излучения будет яркость.

Если мощность отдельных линий излучения задана их световыми потоками, необходимо вначале рассчитать лучистые потоки каждой линии:

$$F_i = \frac{F_i}{683 K_{\lambda_i}},$$

где K_{λ_i} — относительная видность однородного излучения с длиной волны λ_i.

Как было показано ранее (§ 2-14), значение удельной координаты $\bar{y}_i$ численно равно значению относительной видности однородного излучения с той же длиной волны λ_i. На основе (2-97) и равенства $K(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$ в системе XYZ расчетные уравнения для однородных потоков можно представить в следующем виде:

$$x'_i = \frac{F_i \bar{x}_i}{683 \bar{y}_i}; \quad y'_i = \frac{F_i}{683}; \quad z'_i = \frac{F_i \bar{z}_i}{683 \bar{y}_i}, \tag{2-99}$$

где F_i — световой поток i-й линии, *лм*.

Пример. Определить цветность и световой поток ртутной лампы сверхвысокого давления типа ПРК-2 мощностью 375 *вт* со спектральным составом излучения, заданным нижеследующей таблицей.

Длина волны основных линий, *мк*	Лучистый поток линий, *вт*	Удельные координаты цвета			Координаты цвета излучения линий		
		$\bar{x}_i$	$\bar{y}_i$	$\bar{z}_i$	x'_i	y'_i	z'_i
0,405	5,2	0,023	0,0006	0,110	0,12	—	0,57
0,436	9,1	0,334	0,018	1,65	3,07	0,16	15,0
0,546	10,5	0,377	0,981	0,013	3,96	10,3	0,14
0,577—0,579	10,2	0,890	0,890	0,0017	9,09	9,09	0,03
Сумма	35,0	—	—	—	16,24	19,55	15,73

Сумма координат цвета определится как

$$s = x' + y' + z' = 51.5.$$

Координаты цветности при этом будут:

$$x = \frac{x'}{s} = 0{,}315; \quad y = \frac{y'}{s} = 0{,}38; \quad z = \frac{z'}{s} = 0{,}305.$$

Для проверки следует найти сумму координат цветности, которая должна равняться единице:

$$x + y + z = 1.$$

Световой поток лампы будет:

$$F = 683 y' = 13\,360 \text{ } лм.$$

2-13. Расчет цвета излучения со сплошным спектром

Аналитический метод расчета. Спектральной характеристикой сложного излучения со сплошным спектром обычно служат графики спектральной интенсивности любой лучистой величины $\varphi(\lambda)$, $b(\lambda)$ и др. Разбивая весь спектр видимых излучений на узкие полоски $\Delta\lambda$, в пределах которых можно считать излучения однородными, напишем выражения координат цвета такого однородного излучения на некотором i-м участке спектра (2-97):

$$\left.\begin{aligned} x'_i &= \Delta\lambda \varphi_{\lambda_i} \bar{x}_i; \\ y'_i &= \Delta\lambda \varphi_{\lambda_i} \bar{y}_i; \\ z'_i &= \Delta\lambda \varphi_{\lambda_i} \bar{z}_i. \end{aligned}\right\} \tag{2-100}$$

Суммируя значения координат по всем n участкам спектра с одинаковой шириной спектральной полоски $\Delta\lambda$, получим:

$$\left.\begin{aligned} x' &= \Delta\lambda \sum_{i=1}^{i=n} \varphi_{\lambda_i} \bar{x}_i; \\ y' &= \Delta\lambda \sum_{i=1}^{i=n} \varphi_{\lambda_i} \bar{y}_i; \\ z' &= \Delta\lambda \sum_{i=1}^{i=n} \varphi_{\lambda_i} \bar{z}_i. \end{aligned}\right\} \tag{2-101}$$

где φ_{λ_i} — значение спектральной интенсивности лучистого потока для средины i-й спектральной полоски.

Переходя в пределе к бесконечно узким полоскам спектра с шириной $d\lambda$, получим интегральные выражения (2-101):

$$\left.\begin{aligned} x' &= \int_{\lambda=0,38}^{\lambda=0,77} \varphi(\lambda)\, \bar{x}(\lambda)\, d\lambda. \\ y' &= \int_{\lambda=0,38}^{\lambda=0,77} \varphi(\lambda)\, \bar{y}(\lambda)\, d\lambda; \\ z' &= \int_{\lambda=0,38}^{\lambda=0,77} \varphi(\lambda)\, \bar{z}(\lambda)\, d\lambda. \end{aligned}\right\} \tag{2-101а}$$

Из (2-101а) можно видеть, что координаты цвета излучения со сплошным спектром определяется площадью, ограниченной осью абсцисс и кривой произведения двух функций: $\varphi(\lambda)$ и соответствующей функции сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ или $\bar{z}(\lambda)$.

Вполне понятно, что цвет будет выражен в яркостных единицах основных цветов, если в (2-101) и (2-101а) функция спектральной интенсивности лучистого потока $\varphi(\lambda)$ будет заменена функцией спектральной интенсивности лучистой яркости $b(\lambda)$. Как известно (ч. 1, § 1-12), спектральная интенсивность лучистой яркости связана для равнояркого излучения со спектральной интенсивностью лучистого потока следующим равенством:

$$b(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{\pi S},$$

где S — площадь поверхности равнояркого излучателя, $м^2$.

Это же соотношение будет характеризовать количественные характеристики цвета равнояркого излучения, выраженные в единицах светового потока и яркости.

Пример.[1] Определить цветность и светность излучения абсолютно черного тела при температуре $T = 2\,600°$ К.

Примем ширину полоски однородного излучения $\Delta\lambda = 10$ *мк*, что обеспечивает достаточную точность расчета. Результаты расчета координат цвета однородных излучений запишем в сводную таблицу.

Как можно видеть из таблицы, результаты расчета дают:

$$\Sigma r_{\lambda i}\bar{x}_i = 4\,474;\ \Sigma r_{\lambda i}\bar{y}_i = 3\,937;\ \Sigma r_{\lambda i}\bar{z}_i = 1\,143.$$

Так как ширина полоски спектра была принята $\Delta\lambda = 0{,}01$ *мк*, значения координат цвета излучения определятся как

$$x' = 0{,}01 \cdot 4\,474 = 44{,}7;\ y' = 0{,}01 \cdot 3\,937 = 39{,}4;$$

$$z' = 0{,}01 \cdot 1\,143 = 11{,}4,$$

и сумма координат будет равна:

$$s = 95{,}5.$$

Координаты цветности при этом будут:

$$x = \frac{44{,}7}{95{,}5} = 0{,}47 \quad \text{и} \quad y = \frac{39{,}4}{95{,}4} = 0{,}41.$$

[1] Пример заимствован из книги С. О. Майзеля и Е. С. Ратнера „Цветовые расчеты и измерения" [Л. 17].

Светность заданного излучения определится как

$$R = 683y' = 683 \cdot 39{,}4 = 2{,}69 \cdot 10^4\ кал \cdot м^{-2}.$$

Расчет координат цвета черного излучения при $T = 2\,600°$ К

Длина волны, *мк*	Спектральная интенсивность плотности излучения r_λ, $кал \cdot м^{-2} \cdot мк^{-1}$	$r_{\lambda i}\bar{x}_i$	$r_{\lambda i}\bar{y}_i$	$r_{\lambda i}\bar{z}_i$
0,41	46,4	2,0	0,056	9,6
0,42	56,7	7,6	0,226	36,6
0,43	68,4	19,4	0,80	94,7
0,44	81,6	28,4	1,90	142,6
0,45	96,4	32,4	3,70	170,8
0,46	112,7	32,8	6,80	188,1
0,47	130,7	25,5	11,90	168,3
0,48	150,2	14,4	20,90	122,1
0,49	171,3	5,5	35,6	79,7
0,50	190,4	0,9	62,7	52,7
0,51	218,2	2,0	109,8	34,7
0,52	243,9	15,4	173,1	19,1
0,53	270,8	44,8	233,4	11,4
0,54	299,2	86,9	285,4	6,1
0,55	328,7	142,5	327,1	2,9
0,56	359,3	213,6	357,5	1,4
0,57	390,3	297,9	372,0	0,8
0,58	423,6	388,1	368,5	0,7
0,59	456,7	468,6	345,7	0,5
0,60	490,8	521,2	309,7	0,4
0,61	525,7	526,9	264,4	0,16
0,62	560,9	479,1	213,7	0,11
0,63	596,1	382,8	157,9	
0,64	632,0	283,0	110,6	—
0,65	603,2	115,9	42,9	—
0,66	—	—	—	—
0,67	739,4	64,6	23,6	—
0,68	774,7	36,3	13,1	—
0,69	810,5	18,4	6,6	—
0,70	845,4	9,6	3,4	—
0,71	879,9	5,1	1,8	—
0,72	914,1	2,7	0,9	—
Сумма	—	4473,7	3937,2	1143,1

Очень часто излучение со сплошным спектром характеризуется световым потоком F и относительными значениями спектральной интенсивности φ'_λ. Для расчета цвета или цветности такого излучения необходимо в первую очередь определить масштаб кривой спектральной интенсивности. Этот масштаб определится отношением значения действительного светового по-

тока излучения к величине светового потока, рассчитанного по относительной кривой:

$$m = \frac{F}{\Delta\lambda \sum_{i=1}^{i=n} \varphi'_{\lambda i} \bar{y}_i}.$$

В соответствии с этим координаты цвета заданного излучения определятся как

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{F}{\sum_{i=1}^{i=n} \varphi'_{\lambda i} \bar{y}_i} \sum_{i=1}^{i=n} \varphi'_{\lambda i} \bar{x}_i; \\ y' &= \frac{F}{683}; \\ z' &= \frac{F}{\sum_{i=1}^{i=n} \varphi'_{\lambda i} \bar{y}_i} \sum_{i=1}^{i=n} \varphi'_{\lambda i} \bar{z}_i. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}102)$$

Графический метод расчета. Расчет координат цвета излучения со сплошным спектром можно заменить определением площади, ограниченной кривой спектральной интенсивности излучения и осью абсцисс. В этом случае по оси абсцисс должны быть отложены в равномерном масштабе следующие интегральные функции длины волны λ и удельных координат цвета:

$$\psi_x = \int_{0,38}^{\lambda_l} \bar{x}(\lambda)\, d(\lambda);$$

$$\psi_y = \int_{0,38}^{\lambda_l} \bar{y}(\lambda)\, d\lambda$$

и

$$\psi_z = \int_{0,38}^{\lambda_l} \bar{z}(\lambda)\, d\lambda.$$

Нанося на ось абсцисс текущее значение аргумента этой функции λ_l, получим неравномерные шкалы длин волн (рис. 2-49, *а*, *б* и *в*). Неравномерность этих шкал, не одинаковая для каждой координаты цвета, полностью определяется функциями сложения той колориметрической системы, в которой производится расчет координат цвета. Наличие готовых координатных сеток для каждого основного цвета в значительной мере сократит расчетные операции.

Этот способ расчета координат цвета планиметрированием кривой $b(\lambda)$ в соответствующей сетке координат не только упрощает расчет, но также позволяет наглядно видеть, за счет каких участков спектра различаются цветности сравниваемых излучений. Так, например, на спектральных графиках (рис. 2-49, *а*, *б* и *в*), построенных в функции $\psi_x(\lambda)$, $\psi_y(\lambda)$ и $\psi_z(\lambda)$ для люминесцентных ламп, обеспечивающих $T_ц = 4\,500°$ К различным распределением излучения по спектру, отчетливо видно существенное различие заполнения спектра в красной части, что приводит к неудовлетворительному воспроизведению красных оттенков цвета в условиях освещения люминесцентными лампами. Из этих же графиков можно видеть значительное повышение качества ламп „deluxe" и „superdeluxe" [Л. 46]. При расчете координат цвета способом планиметрирования необходимо умножить площадь, найденную в масштабе спектральной функции, на масштабный коэффициент оси абсцисс, одинаковый для каждого основного цвета,

$$m = \frac{^{r}\Delta\lambda \Sigma \bar{x}_l}{l} = \frac{106{,}9}{l},$$

где l — общая длина графика на оси абсцисс.

Метод избранных ординат. В практических условиях часто приходится рассчитывать цвет излучения, прошедшего сквозь цветной фильтр или отраженного избирательно отражающей поверхностью. Вследствие того, что спектральная интенсивность отраженного или прошедшего через фильтр излучения определяется произведением спектраль-

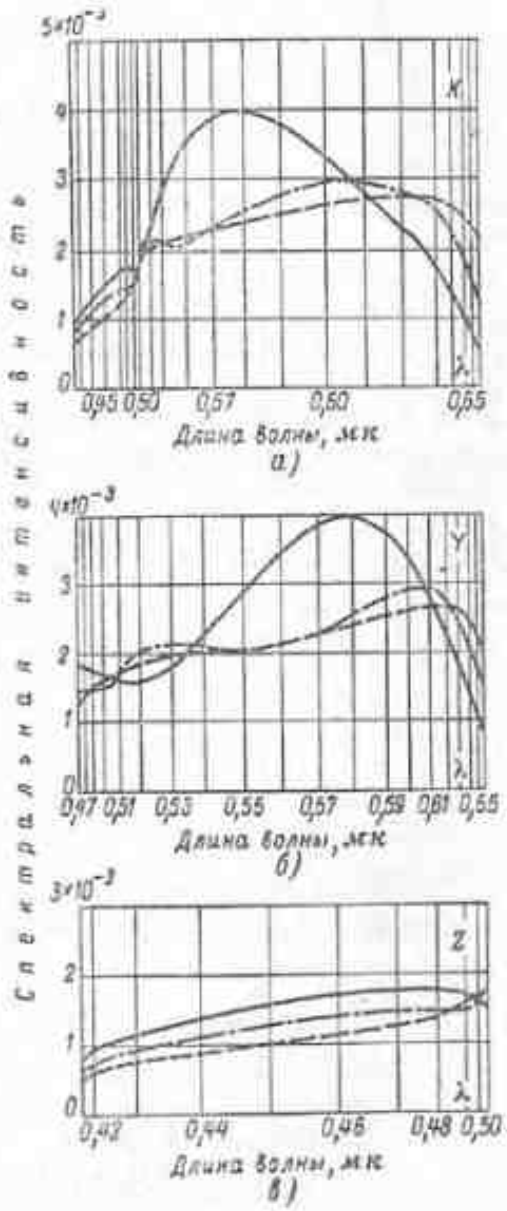


Рис. 2-49.
——стандартные лампы, $T_ц = 4\,500°$ К
—·—·— лампы „deluxe"; — — — лампы „superdeluxe".

ной интенсивности падающего излучения на спектральные значения коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ или пропускания $\tau(\lambda)$, координаты цвета отраженного и прошедшего излучений определяются как

$$\left.\begin{aligned} x' &= \int \varphi(\lambda)\rho(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \\ y' &= \int \varphi(\lambda)\rho(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \\ z' &= \int \varphi(\lambda)\rho(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda; \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}103)$$

$$\left.\begin{aligned} x' &= \int \varphi(\lambda)\tau(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \\ y' &= \int \varphi(\lambda)\tau(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \\ z' &= \int \varphi(\lambda)\tau(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}104)$$

Вследствие того, что такие расчеты чаще всего производятся для стандартных источников белого цвета, был предложен упрощенный приближенный способ расчета координат цвета. Этот метод основан на делении всего спектра на n участков, для каждого из которых с достаточной для практики точностью можно принять постоянным коэффициент пропускания (отражения). Применяя для каждого из n участков интегральное выражение координаты цвета (2-101а), получим:

$$x' = \tau_{1x}\int_{\lambda_0}^{\lambda_1}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda + \tau_{2x}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda + \ldots$$

$$\ldots + \tau_{nx}\int_{\lambda_{n-1}}^{\lambda_n}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda.$$

Подбирая границы участков спектра по условию равенства координат падающего излучения:

$$\int_{\lambda_0}^{\lambda_1}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda = \ldots$$

$$\ldots = \int_{\lambda_{n-1}}^{\lambda_n}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda = \frac{1}{n}\int_0^{\infty}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda,$$

получим упрощенные приближенные равенства, определяющие координаты цвета прошедшего (отраженного) излучения:

$$\left.\begin{aligned} x' &= (\tau_{1x}+\tau_{2x}+\ldots+\tau_{nx})\cdot\frac{1}{n}\int_0^{\infty}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \\ y' &= (\tau_{1y}+\tau_{2y}+\ldots+\tau_{ny})\cdot\frac{1}{n}\int_0^{\infty}\varphi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \\ z' &= (\tau_{1z}+\tau_{2z}+\ldots+\tau_{nz})\cdot\frac{1}{n}\int_0^{\infty}\varphi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}105)$$

Этот способ расчета координат цвета назван *методом избранных ординат* потому, что для каждого источника с заданным спектральным составом и для каждой координаты имеется свой набор длин волн, для которых определяются ординаты спектральной кривой пропускания $\tau_{1x}, \tau_{2x}, \ldots, \tau_{nx}$; $\tau_{1y}, \tau_{2y}, \ldots, \tau_{ny}$ и $\tau_{1z}, \tau_{2z}, \ldots, \tau_{nz}$ или отражения $\rho_{1x}, \rho_{2x}, \ldots, \rho_{nx}$ и т. д. Эти длины волн определяют узкие участки спектра падающего излучения, для каждого из которых соответствующая координата цвета численно равна $\frac{1}{n}$ части той же координаты цвета всего излучения, падающего на цветную отражающую поверхность или на цветной светофильтр.

Расчет координат цвета этим способом сводится к суммированию n избранных ординат кривой $\rho(\lambda)$ или $\tau(\lambda)$ и умножению полученной суммы на один из постоянных для заданного исходного белого множителей:

$$\frac{1}{n}\int_{0,38}^{0,77}\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda;\quad \frac{1}{n}\int_{0,38}^{0,77}\varphi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda;\quad \frac{1}{n}\int_{0,38}^{0,77}\varphi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda.$$

Число участков, на которое разбивается весь спектр видимого излучения, определяется желательной точностью расчета. Автор этого метода А. Харди [Л. 39] рекомендует деление спектра на 30 участков для точных расчетов и на 10 — для приближенных. Длины волн избранных ординат для трех стандартных источников света A, B и C приведены в приложении 3.

Пример[1]. Рассчитать цветность излучения, прошедшего через фильтр ЗС-3, и коэффициент пропускания этого фильтра для падающего излучения с цветовой температурой $T_ц = 4\,800°$ К (источник B).

Для сопоставления точности способа избранных ординат при различных значениях n произведем расчет для 10 и 30 ординат. Выписав (приложение 3) значения длин волн избранных ординат для каждой из трех координат в свободную таблицу, определим по кривой $\tau(\lambda)$ значения избранных ординат и запишем их также в сводную таблицу.

[1] Пример заимствован из книги М. М. Гуревича „Цвет и его измерение" [Л. 4].

Расчет цвета способом избранных ординат

Порядковый номер ординат	Длина волны λ_i, нм	Коэффициент пропускания τ_{iz}	Длина волны λ_i, нм	Коэффициент пропускания τ_{iy}	Длина волны λ_i, нм	Коэффициент пропускания τ_{iz}
	Координата x'		Координата y'		Координата z'	
1	428,1	0,330	472,3	0,280	414,8	0,530
2*	442,1	0,290	494,4	0,400	422,9	0,370
3	454,1	0,230	505,7	0,460	427,1	0,340
4	468,1	0,267	513,5	0,490	430,3	0,310
5*	527,8	0,487	519,9	0,500	433,0	0,290
6	543,3	0,400	524,8	0,490	435,4	0,275
7	551,9	0,360	529,4	0,480	437,7	0,260
8*	558,5	0,307	533,7	0,470	439,9	0,250
9	564,0	0,263	537,7	0,452	442,0	0,240
10	568,0	0,225	541,5	0,435	444,0	0,235
11*	537,1	0,200	545,1	0,405	446,0	0,232
12	577,1	0,170	548,7	0,380	448,0	0,230
13	580,9	0,153	552,1	0,356	450,0	0,230
14*	584,5	0,122	555,5	0,330	451,9	0,230
15	588,0	0,100	559,0	0,305	453,9	0,232
16	591,4	0,095	562,4	0,280	455,8	0,234
17*	594,7	0,077	565,8	0,250	457,8	0,235
18	598,1	0,067	569,3	0,225	459,8	0,240
19	601,4	0,058	572,9	0,195	461,8	0,248
20*	604,7	0,048	576,7	0,170	463,9	0,252
21	608,1	0,040	580,6	0,145	466,1	0,260
22	611,6	0,035	584,7	0,117	468,4	0,270
23*	615,3	0,030	589,1	0,105	470,8	0,280
24	619,1	0,023	593,9	0,087	473,6	0,290
25	623,3	0,018	599,1	0,069	476,6	0,305
26*	628,0	0,014	605,0	0,050	480,2	0,320
27	633,4	0,011	611,8	0,035	484,5	0,345
28	640,1	0,010	619,9	0,020	490,2	0,380
29*	649,2	0,009	630,9	0,013	498,6	0,440
30	660,3	0,002	657,0	0,009	515,2	0,490
$n=10$	Сумма $\Sigma_{10}\,\tau_i$	1,378	—	2,693	—	2,899
	Множитель	0,09903	—	0,09999	—	0,08526
	Координаты цвета	0,156	—	0,269	—	0,247
	Координаты цветности	0,232	—	0,400	—	0,368
$n=30$	Сумма $\Sigma_{30}\,\tau_i$	0,443	—	8,000	—	8,833
	Множитель	0,03303	—	0,03333	—	0,02842
	Координаты цвета	0,147	—	0,267	—	0,251
	Координаты цветности	0,221	—	0,401	—	0,378

Суммируя избранные ординаты для $n=10$ и $n=30$ и умножая суммы на постоянные множители типа $\frac{1}{n}\int_0^\infty \varphi(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda$, получим координаты цвета излучения, прошедшего сквозь фильтр. Сопоставляя расчетные значения координат цветности прошедшего излучения для $n=10$ и $n=30$, можно видеть достаточную точность способа избранных ординат даже для $n=10$. Следует указать, что расчёт координат цветности по (2-101) при $\Delta\lambda=10$ *нм* дает значения $x=0{,}221$; $y=0{,}401$ и $z=0{,}378$. Достаточную точность расчета для $n=10$ следует объяснить плавной формой кривой $\tau(\lambda)$.

2-14. Определение цветовой температуры излучения

Как известно (ч. 1, § 1-20), цветовая температура излучения приближенно определяет его цветность сопоставлением с цветностью излучения абсолютно черного тела. Возможность расчета координат цветности черного излучения по известному спектральному составу позволяет построить на диаграмме цветности любой цветовой системы кривую цветности излучений абсолютно черного тела для различных значений температуры излучателя. Согласно определению цветовой температуры излучения эта кривая будет являться геометрическим местом точек цветностей излучений с различными значениями цветовой температуры (рис. 2-29,*б* и 2-50).

Такая кривая позволяет определить координаты цветности излучения абсолютно черного и серого[1] излучателей с точностью, определяемой используемой диаграммой цветности. Вследствие того, что большинство тепловых излучений близки по спектральным характеристикам к серым, следовательно, их цветовая температура близка к истинной температуре излучателя, цветовая температура может с достаточной точностью служить критерием их цветности. Графически это правило определяется близостью расположения точек цветности большинства тепловых излучений к кривой цветности черного излучения для любых значений температуры излучателя. Излучения со значительной избирательностью (селективностью) могут существенно отличаться по цветности от излучений черного тела при любой его температуре (рис. 2-50), вследствие чего цветовая температура не может с достаточной точностью определять их цветность. Приближенное определение цветовой температуры избирательного излучения требует отыскания такой точки на кривой цветностей черного излучения, которая отстоит на наименьшее число цветовых порогов от точки, характеризующей цветность заданного избирательного излучения. Вполне понятно, что решение этой задачи возможно с помощью равно-

[1] Одинаковая точность определения цветности серого и черного излучателей гарантируется одинаковым значением их координат цветности вследствие подобия кривых спектральной интенсивности их излучения.

контрастной диаграммы цветности (§ 2-10). На равноконтрастной диаграмме эта задача решается построением из точки заданной цветности a нормали к кривой цветностей излучения черного тела. Так как расстояние между точками a и T_n будет кратчайшим, в равноконтрастной диаграмме оно определит наименьшее различие цветности заданного избирательного излучения и черного излучения с температурой излучателя $(T_ц)_a$. Следовательно, эта температура может быть приближенно принята за цветовую температуру заданного излучения. Из этого примера можно видеть, что для избирательных излучений, цветности которых отстоят от цветности черного излучения на значительное число порогов, понятие цветовой температуры теряет смысл из-за недостаточной его точности.

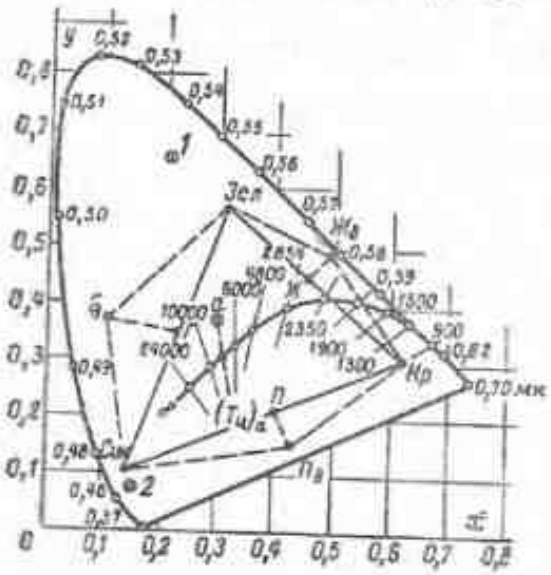


Рис. 2-50.
1—люминофор Zn_2SiO_4Mn;
2—люминофор ZnSAg.

В тех случаях, когда избирательность излучения невелика, его цветовую температуру можно определять по вспомогательному графику, предложенному Джаддом [Л. 40]. На этом графике (рис. 2-50), построенном в координатах x, y, дана кривая цветности излучений черного тела с широким пределом изменения температуры от 900 до 24 000° К и нанесены нормали к этой кривой в координатах u, v Джадда. Как и следует из теории проективного преобразования цветовых систем, нормали равноконтрастной диаграммы теряют свойства нормалей в диаграмме x, y, обращаясь в прямые, секущие кривую цветностей черного излучения под углами $\gamma \neq \frac{\pi}{2}$, не одинаковыми для различных значений цветовой температуры. Каждой секущей соответствует определенная точка кривой, следовательно, определенное значение цветовой температуры.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦВЕТА

2-15. Аддитивное воспроизведение цвета

Принципы аддитивного воспроизведения. Аддитивное воспроизведение цвета основано на суммировании

нескольких разноцветных излучений. Как было показано ранее (§ 2-4), суммирование трех или более реальных цветов может обеспечить воспроизведение излучения любого цветового тона. Максимальные значения чистоты воспроизводимых цветов определяются выбором числа и качества исходных цветов системы аддитивного воспроизведения. Для того чтобы поле воспроизводимых цветностей было максимальным и, следовательно, чистота всех воспроизводимых цветов могла быть близкой единице, число исходных цветов системы воспроизведения должно быть велико и чистота их максимальна.

Увеличение числа исходных цветов и повышение их чистоты определяются желанием приблизить границу поля воспроизводимых цветностей к локусу цветностей однородных излучений. Технические трудности, возникающие при увеличении числа исходных цветов, определяются усложнением процессов воспроизведения цвета, вследствие чего число исходных цветов системы аддитивного воспроизведения, как правило, ограничивается тремя [1]. Увеличение чистоты исходных цветов также затруднительно вследствие резкого уменьшения коэффициента пропускания цветного фильтра (красителя) по мере сужения его полосы пропускания, следовательно, уменьшения яркости воспроизводимых цветов при постоянстве количественной характеристики исходного белого цвета.

Исходными цветами системы аддитивного воспроизведения обычно бывают цвета: красный — *Кр*, зеленый — *Зел* и синий — *Син* (рис. 2-50). Попарное смешение этих трех цветов создает: желтый, голубой и пурпурный. Аддитивное смешение трех исходных цветов в определенной пропорции создает белый цвет.

При увеличении числа исходных цветов к основной триаде следует добавлять голубой — $Г_д$, пурпурный — $П_д$ и желтый — $Ж_д$ с чистотой, большей чистоты попарной смеси основных исходных цветов $Г$, $П$ и $Ж$ (рис. 2-50).

Цветность аддитивно воспроизведенного цвета независимо от способа смешения цветов однозначно определяется смешиваемыми исходными цветами, следовательно, их цветностью и яркостью.

Аналитические расчеты аддитивного смешения. При расчете аддитивного воспроизведения цвета независимо от способа смешения исходных цветов могут встретиться следующие две задачи:

а) расчет координат цвета воспроизведения по координатам цвета исходных цветов;

б) расчет яркости и пропорций смеси исходных цветов по заданным координатам воспроизводимого цвета.

[1] Четырехцветные и более системы применяются исключительно в полиграфии.

Решение первой задачи было дано в общем виде при анализе правил аддитивного смешения излучений (§ 2-3). Напишем согласно (2-30) выражения координат цвета смеси по заданным координатам исходных цветов или их яркости и координат цветности в системе XYZ:

$$x'=\sum_{i=1}^{i=n} x_i'; \quad y'=\sum_{i=1}^{i=n} y_i'; \quad z'=\sum_{i=1}^{i=n} z_i' \tag{2-106}$$

или

$$\left.\begin{aligned} x'&=\sum_{i=1}^{i=n}\frac{B_i}{683L_i}x_i=1{,}465\cdot10^{-3}\sum_{i=1}^{i=n}B_i\frac{x_i}{y_i};\\ y'&=\sum_{i=1}^{i=n}\frac{B_i}{683L_i}y_i=1{,}465\cdot10^{-3}\sum_{i=1}^{i=n}B_i;\\ z'&=\sum_{i=1}^{i=n}\frac{B_i}{683L_i}z_i=1{,}465\cdot10^{-3}\sum_{i=1}^{i=n}B_i\frac{z_i}{y_i}. \end{aligned}\right\} \tag{2-106а}$$

где x_i', y_i', z_i'; x_i, y_i, z_i — координаты цвета и цветности исходных цветов системы аддитивного воспроизведения;

B_i и $L_i=y_i$ — яркости и яркостные коэффициенты исходных цветов.

Координаты цветности смеси определятся по координатам цветности исходных цветов следующими соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} x&=\frac{\sum B_i\frac{x_i}{y_i}}{\sum\frac{B_i}{y_i}};\\ y&=\frac{\sum B_i}{\sum\frac{B_i}{y_i}};\\ z&=\frac{\sum B_i\frac{z_i}{y_i}}{\sum\frac{B_i}{y_i}}. \end{aligned}\right\} \tag{2-107}$$

Указанное суммирование следует производить по всем исходным цветам системы цветовоспроизведения. Яркость цвета смеси в системе XYZ однозначно определится координатой y'.

Расчет яркости и пропорций смеси исходных цветов по заданной цветности и яркости заданного для воспроизведения цвета следует начать с определения координат цветности x_Q и y_Q смеси двух исходных цветов A и C (рис. 2-51). Эта смесь в сумме с третьим исходным цветом D воспроизводит заданный цвет S с координатами цветности x_S, y_S и яркостью B_S.

Решение этой задачи удобнее всего выполнять графически путем нахождения точки Q пересечения прямых AC и SD.

Аналитическое определение координат цветности x_Q, y_Q можно выполнить совместным решением уравнений прямых AC и SD:

$$\frac{x_C-x_Q}{y_C-y_Q}=\frac{x_Q-x_A}{y_Q-y_A} \quad\text{и}\quad \frac{x_D-x_S}{y_D-y_S}=\frac{x_S-x_Q}{y_S-y_Q}. \tag{2-108}$$

Приводя (2-108) к удобной для решения форме, получим:

$$\left.\begin{aligned} (y_A-y_C)\,x_Q+(x_C-x_A)\,y_Q+x_Ay_C-x_Cy_A&=0;\\ (y_D-y_S)\,x_Q+(x_S-x_D)\,y_Q+x_Dy_S-x_Sy_D&=0. \end{aligned}\right\} \tag{2-108а}$$

Определив координаты цветности x_Q и y_Q пропорциональным соотношением, найдем сумму координат цвета D по правилу смеси двух цветов (2-32):

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_S}=\frac{QS}{QD},$$

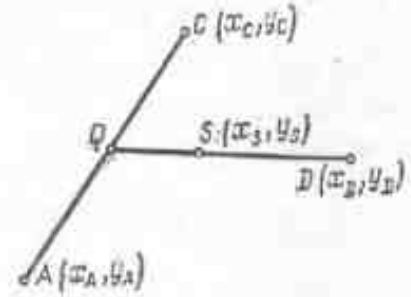


Рис. 2-51.

где σ_D и σ_S — суммы координат цветов D и S. Заменяя сумму координат цвета S отношением его яркости B_S к яркостному коэффициенту L_S и выражая отношение отрезков прямой отношением x-координат цветности, получим:

$$\sigma_D=\frac{B_S}{683L_S}\cdot\frac{x_S-x_Q}{x_D-x_Q} \quad\text{или}\quad \sigma_D=\frac{B_S}{683y_S}\cdot\frac{x_S-x_Q}{x_D-x_Q}, \tag{2-109}$$

так как в системе XYZ яркостный коэффициент цвета численно равен y-координате цветности (2-72а). Вполне понятно, что отношение разностей x-координат цветности можно заменить отношением соответственных разностей y-координат, следовательно:

$$\sigma_D=\frac{B_S}{683y_S}\cdot\frac{y_S-y_Q}{y_D-y_Q}. \tag{2-109а}$$

Суммы координат C и D можно определить аналогично по отношению отрезков прямой CD:

$$\frac{\sigma_C}{\sigma_Q}=\frac{AQ}{AC}=\frac{x_Q-x_A}{x_C-x_A}=\frac{y_Q-y_A}{y_C-y_A};$$
$$\frac{\sigma_A}{\sigma_Q}=\frac{QC}{AC}=\frac{x_C-x_Q}{x_C-x_A}=\frac{y_C-y_Q}{y_C-y_A}.$$

Принимая во внимание, что сумма координат всех трех смешиваемых цветов A, C и D равна сумме координат воспроизводимого цвета (2-66б)

$$\sigma_A+\sigma_C+\sigma_D=\sigma_D+\sigma_Q=\frac{B_S}{683y_S},$$

получим выражения, определяющие суммы координат остальных двух исходных цветов смеси:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_C&=\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_A\right)\frac{x_Q-x_A}{x_C-x_A}=\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)\frac{y_Q-y_A}{y_C-y_A};\\ \sigma_A&=\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)\frac{x_C-x_Q}{x_C-x_A}=\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)\frac{y_C-y_Q}{y_C-y_A}.\end{aligned}\right\}\quad(2\text{-}110)$$

Из (2-109) и (2-110) можно определить яркости исходных цветов смеси, умножая сумму координат исходного цвета на его y-координату цветности:

$$\left.\begin{aligned}B_A&=683\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)y_A\frac{x_C-x_Q}{x_C-x_A}=\\ &=683\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)y_A\frac{y_C-y_Q}{y_C-y_A};\\ B_C&=683\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)y_C\frac{x_Q-x_A}{x_C-x_A}=\\ &=683\left(\frac{B_S}{683y_S}-\sigma_D\right)y_C\frac{y_Q-y_A}{y_C-y_A};\\ B_D&=B_S\frac{y_D}{y_S}\frac{x_S-x_Q}{x_D-x_Q}=B_S\frac{y_D}{y_S}\frac{y_S-y_D}{y_S-y_Q}.\end{aligned}\right\}\quad(2\text{-}111)$$

Графические расчеты аддитивного смешения. Во многих случаях расчет аддитивного воспроизведения цвета удобнее производить графически. Графическое решение большинства задач аддитивного смешения цветов было дано проф. М. М. Гуревичем [Л. 41].

Задача 1. По заданным суммам координат смешиваемых цветов A и C (рис. 2-52,*а*) и их координатам цветности x_A, y_A и x_C, y_C найти цвет смеси.

После нанесения точек A и C на диаграмму цветности отложим по вертикалям в противоположных направлениях отрезки AA'' и CC'' в принятом масштабе, соответственно равные[1] σ_C и σ_A. Соединив точки A'' и C'' прямой, получим точку D на пересечении AC и $A''C''$. Из подобия треугольников $AA'D$ и $CC''D$ следует:

$$\frac{AA''}{CC''}=\frac{\sigma_C}{\sigma_A}=\frac{AD}{DC}.$$

Равенство полученных отношений показывает, что точка D разделяет отрезок прямой AC в отношении, обратно пропорциональном суммам координат смешиваемых цветов. Это правило (§ 2-2) определяет соответствие точки D цветности смеси.

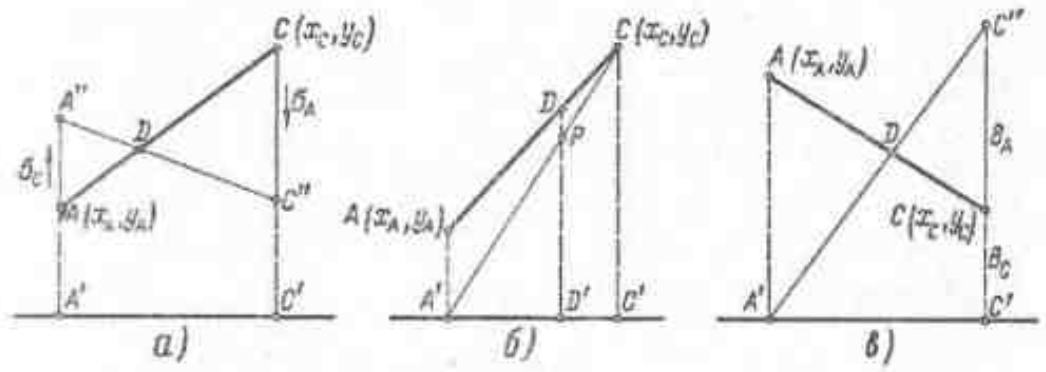


Рис. 2-52.

Задача 2. По заданным координатам цветности смешиваемых цветов A и C и цвета смеси D определить отношение яркостей смешиваемых цветов.

Для решения этой задачи спроектируем точки A, D и C (рис. 2-52,*б*) на ось абсцисс (точки A', D' и C'). Соединив прямой точку C (x_C, y_C) с точкой A', получим на пересечении с прямой DD' точку P, которая делит DD' в отношении яркостей смешиваемых цветов:

$$\frac{DP}{PD'}=B_A:B_C.$$

Для доказательства полученного равенства определим величины отрезков DP и PD'. Из подобия треугольников DCP и ACA', а также треугольников $A'PD'$ и $A'CC'$ следует:

$$\frac{DP}{AA'}=\frac{DC}{AC},\ \text{откуда}\ DP=y_A\frac{DC}{AC},$$

[1] Принятый масштаб определяется из условия

$$\overline{AC}=\sigma_A+\sigma_C.$$

и

$$\frac{PD'}{CC'}=\frac{A'P}{A'C}=\frac{AD}{AC},\ \text{откуда}\ PD'=y_C\frac{AD}{AC},$$

так как $AA'=y_A$ и $CC'=y_C$.

Зная величины отрезков DP и PD', найдем их отношение:

$$\frac{DP}{PD'}=\frac{y_A}{y_C}\cdot\frac{DC}{AD}$$

или

$$\frac{DP}{PD'}=\frac{y_A\sigma_A}{y_C\sigma_C}=B_A:B_C,$$

так как по условию

$$\frac{DC}{AD}=\frac{\sigma_A}{\sigma_C}.$$

Вследствие того, что отрезок DD' определяет в масштабе диаграммы яркость единичного цвета смеси B_D, отношения $\frac{DP}{DD'}=\frac{B_A}{B_D}$ и $\frac{PD'}{DD'}=\frac{B_C}{B_D}$ численно равны долям смешиваемых цветов по сравнению с яркостью цвета смеси. Это правило позволяет простым графическим приемом производить определение чистоты любого заданного цвета. Если точка C характеризует белый цвет, а точка A — однородный, то чистота цвета, цветность которого определяется точкой D, будет равна:

$$p=\frac{DP}{DD'}.$$

Задача 3. По заданным значениям яркости смешиваемых цветов B_A и B_C и координатам их цветности x_A, y_A и x_C, y_C найти цвет смеси.

Откладывая на продолжении CC' отрезок CC'' (рис. 2-52,а), численно равный яркости B_A в масштабе $B_C=CC'$, соединим его прямой с проекцией A' точки A на ось абсцисс. Точка пересечения прямых AC и $A'C''$ (точка D) определит цветность искомого цвета смеси. Для доказательства напишем равенство двух отношений, следуемых из дополнительного построения:

$$\frac{C''C}{CC'}=B_A:B_C=\frac{y_A\sigma_A}{y_C\sigma_C}.$$

Преобразуем полученное равенство, умножив его на отношение

$$\frac{CC'}{AA'}=\frac{y_C}{y_A}.$$

В результате преобразования на основе подобия треугольников ADA' и CDC'' получим:

$$\frac{C''C}{AA'}=\frac{\sigma_A}{\sigma_C}=\frac{CD}{AD},$$

что и является требуемым доказательством.

Задача 4. По заданным координатам цветности трех смешиваемых цветов A, C, D и цвета смеси S (рис. 2-53,а) определить пропорцию смеси по яркости.

В соответствии с решением задачи 2 имеем:

$$\frac{B_D}{B_S}=\frac{P_2S'}{SS'}.$$

Доли смешиваемых цветов A и C соответственно определяются как

$$\frac{B_A}{B_S}=\frac{B_A}{B_Q}\cdot\frac{B_Q}{B_S}=\frac{QP_1}{QQ'}\cdot\frac{SP_2}{SS'};$$

$$\frac{B_C}{B_S}=\frac{B_C}{B_Q}\cdot\frac{B_Q}{B_S}=\frac{P'Q'}{QQ'}\cdot\frac{SP_2}{SS'}.$$

Задача 5. Определить координаты цветности смеси трех излучений по заданным координатам цветности и яркости смешиваемых цветов.

Для решения этой задачи применим дважды графическое построение, приведенное в задаче 3. Откладывая на продолжении $A'A$ (рис. 2-53,б) отрезок AA'', равный B_C в принятом масштабе $B_A=A'A$, проводим прямую $A''C'$, которая на пересечении с AC определит точку Q цветности смеси цветов Φ_A и Φ_C. Откладывая на продолжении $D'D$ отрезок DD'', численно равный яркости смеси излучений $B_A+B_C=B_Q$ в масштабе $B_D=D'D$, проводим прямую $D''Q'$, которая пересечет прямую QD в искомой точке S.

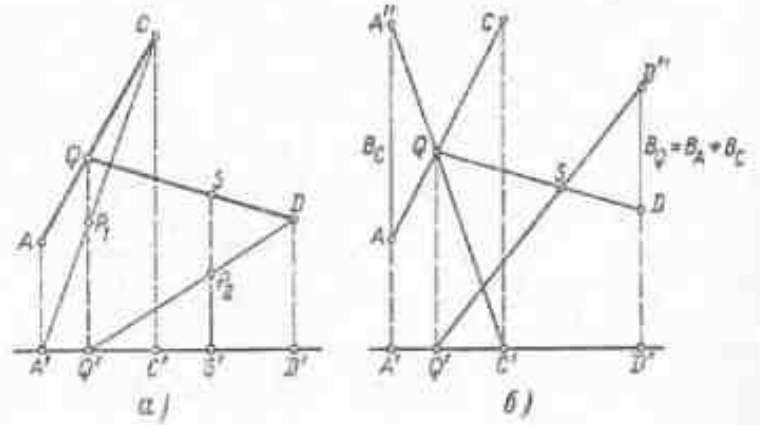


Рис. 2-53.

2-16. Субтрактивное воспроизведение цвета

Принципы субтрактивного воспроизведения. Как показывает опыт, воспроизведение многообразия цветов возможно не только путем суммирования исходных цветов или ощущений, возникающих от изолированного действия каждого исходного цвета, но также и путем вычитания из одно-

го цвета другого. Воспроизведение цвета, основанное на вычитании, принято называть *субтрактивным*[1] *воспроизведением*.

Так же как и при аддитивном смешении цветов, результирующий цвет субтрактивного смешения определяется согласно второму выводу из закона Грассмана (§ 2-4) цветами смешиваемых излучений, а не их спектральными составами.

Практически вычитание цветов осуществляется поглощением части излучения при прохождении через избирательно поглощающую среду или несколько сред, расположенных последовательно по пути пучка лучей исходного белого цвета. Результирующий цвет субтрактивного смешения определяется разностью между исходным белым и цветом излучения, поглощенного последовательно расположенными избирательными средами. В тех случаях, когда одноцветные разноспектральные излучения проходят через одну и ту же избирательно поглощающую среду, результирующие излучения бывают, как правило, разноцветные. Следует отметить, что эти случаи не противоречат закону субтрактивного смешения цветов, как это кажется на первый взгляд, так как разноцветность результирующих излучений следует объяснить поглощением средой разных по цвету излучений, следовательно, вычитанием различных цветов.

Для того чтобы вычитание цвета было осуществимо, необходимо, чтобы исходный цвет состоял из совокупности тех цветов, которые последовательно из него вычитаются. Это обязательное условие определяет реальность субтрактивного способа воспроизведения лишь в том случае, когда исходный цвет содержит в своем спектре излучения тех частот, которые поглощаются при каждом последующем вычитании. Это условие заставляет выбирать в качестве исходного цвета субтрактивного смешения белый цвет излучения со сплошным спектром, обеспечивающий в процессе его субтрактивного преобразования поглощение излучений любых частот.

Изложенное условие реальности субтрактивного смешения цветов отличает этот способ от ранее описанного аддитивного смешения, при котором возможно смешение любых цветов без каких-либо ограничений, предъявляемых к спектрам смешиваемых излучений или к их цветностям.

В качестве избирательно поглощающих сред в субстрактивном способе воспроизведения цвета применяются *светофильтры*[2] *(фильтры)* с переменной концентрацией молекул красителя (цветная кинематография) или различные по толщине слой краски с постоянной для любого слоя концентрацией молекул красящего вещества (глубокая цветная печать).

[1] Subtrahcere — вычитать.

[2] Классификация светофильтров и их применение в различных областях светотехники даны в § 2-18.

Предполагая, что функция спектрального поглощения $\alpha(\lambda)$ фильтра может быть выбрана без ограничения условий, можно гарантировать возможность субтрактивного воспроизведения любого реального цвета из белого цвета со сплошным спектром при помощи одного фильтра. В тех случаях, когда фильтр будет обладать узкой полоской пропускания шириной $\Delta\lambda$, соответствующей точности определения однородного излучения (ч. 1, § 1-12), цветность прошедшего сквозь фильтр излучения будет характеризоваться одной из точек локуса цветности чистых спектральных цветов. Положение точки на локусе будет определяться расположением полосы пропускания по спектру. Увеличение ширины полосы пропускания будет приводить к уменьшению чистоты цвета до нуля при расширении полосы до ширины всего видимого участка спектра. Этот предельный случай будет соответствовать нейтральному фильтру, не изменяющему цветность исходного белого цвета.

Такая однофильтровая система субтрактивного воспроизведения цвета, возможная теоретически без ограничения воспроизводимых цветов, практически выполнима лишь при очень ограниченном их количестве, например в цветовой сигнализации, где все разнообразие цветов ограничивается тремя — пятью цветами (§ 2-19). При расширении количества цветов, подлежащих воспроизведению, должен расти набор красящих веществ, применяемых в исправляющих цвет фильтрах, каждый из которых должен соответствовать определенному цветовому тону воспроизводимого цвета. Изменение концентрации молекул красителя или толщины слоя краски, нанесенной на белую подложку, приводит также к изменению результирующего цвета, причем это изменение происходит в основном за счет его чистоты. Такое изменение цвета излучения, прошедшего через прозрачный окрашенный фильтр, определяется законом Бугера (ч. 1, § 2-22).

Все краски, применяемые в практике субтрактивного воспроизведения цветов, в первом приближении можно разделить на две группы: *прозрачные (лессировочные)* и *рассеивающие (кроющие)*. Краски и той и другой групп состоят из связующего вещества (масло, вода, бензин и др.), в толще которого беспорядочно расположено большое количество мельчайших зерен красящего вещества, избирательно поглощающих падающее на них излучение. Часть излучения, упавшего на зерно красителя, рассеивается за счет отражения от его граней. Отраженная составляющая излучения, как известно (ч. 1, § 2-18), определяется отношением показателей преломления двух сред, от границы которых происходит отражение. В том случае, если показатели преломления красящего и связующего веществ незначительно отличаются друг от друга, слой красителя прозрачен. Пучок лучей, попавший в толщу такой краски, пронизывает его практически без рассеяния, претерпевая ослабление в основном за счет избирательного поглощения зернами красящего вещества. Если слой краски нанесен на отражающую белую подложку, то пучок лучей после отражения от нее вновь вторично пройдет через толщу краски, выйдя из нее окрашенным в дополнительный цвет к цвету излучения поглощенного зернами красящего вещества. Сле-

дует указать, что вышедший из слоя краски пучок окрашенных излучений будет разбавлен излучением, отраженным от границы между воздухом и слоем краски. Это отраженное излучение, определяемое отношением показателей преломления воздух — связующее вещество, как правило, бесцветно, вследствие чего оно снижает чистоту цвета излучения, дважды прошедшего слой краски. Зерна кроющих красок, обладающие большим значением показателя преломления относительно связующего вещества, рассеивают пучок излучения, поступающий в толщу слоя. Вследствие интенсивного рассеяния в толще слоя кроющих красок излучение практически не достигает подложки.

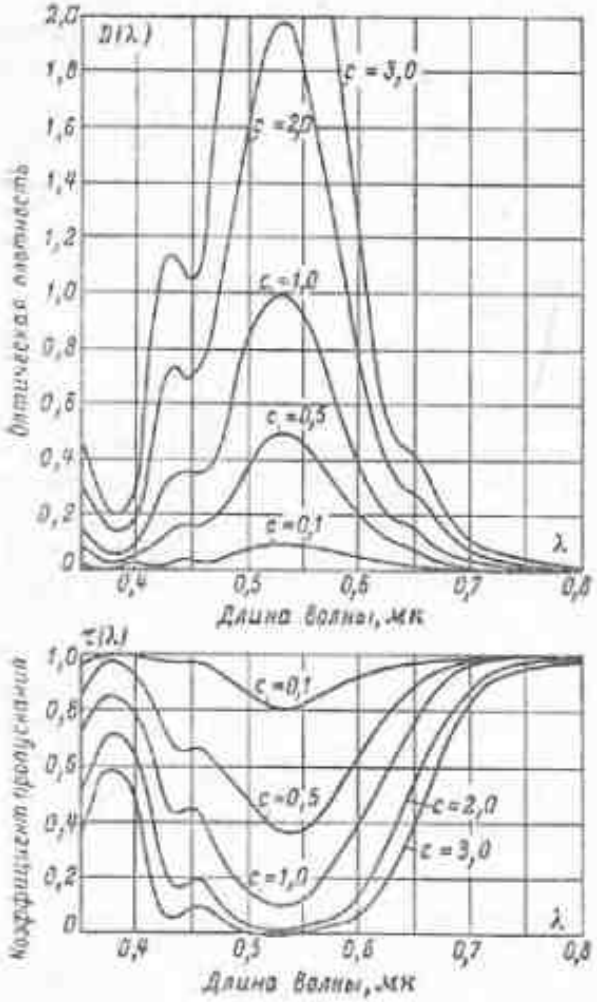


Рис. 2-54.

Из описания схем взаимодействия зерен красящих веществ с излучением в лессировочных и кроющих красках можно сделать вывод о применимости закона Бугера — Бера для прозрачных лессировочных красок и приближенности этого закона для рассеивающих красок. Для красок, обладающих большой кроющей способностью, закон Бугера — Бера неприменим. В фильтрах обычно применяются прозрачные красители, так как качество фильтров в большой мере определяется отсутствием рассеяния. Из этого условия следует, что для фотометрических расчетов фильтров можно применять уравнение Бугера — Бера.

На рис. 2-54 приведены *градационные кривые* пурпурного красителя, применяемого в одном из слоев трехцветной позитивной кинопленки. Градационные кривые, иллюстрирующие зависимость спектральных значений оптической плотности и коэффициента пропускания фильтра от концентрации молекул красителя или толщины слоя краски, показывают, что увеличение концентрации от 0,5 до 3,0 уменьшает полуширину полос пропускания (для красного от $\lambda=0{,}57$ *мк* до $\lambda=0{,}66$ *мк* и синего от $\lambda=0{,}50$ *мк* до $\lambda=0{,}40$ *мк*), следовательно, повышает чистоту результирующего цвета (рис. 2-54).

Возможность широкой вариации чистоты воспроизводимого цвета изменением концентрации молекул красителя или толщины его слоя позволяет создать систему субтрактивного воспро-

изведения всего разнообразия цветов с помощью трех фильтров, стоящих последовательно на пути исходного излучения белого цвета. Для выбора таких фильтров представим весь спектр видимого излучения разделенным на три полосы: синюю $\lambda_c \leqslant 0{,}50$ *мк*, зеленую $0{,}50\ мк < \lambda_з < 0{,}57$ *мк* и красную $\lambda_к \geqslant 0{,}57$ *мк*. Каждый из трех фильтров системы при значительной концентрации красителя должен обладать достаточным пропусканием в двух из трех намеченных полос спектра и обеспечивать значительное поглощение (близкое к полному) излучения, падающего на него в третьей полосе спектра. Такими фильтрами

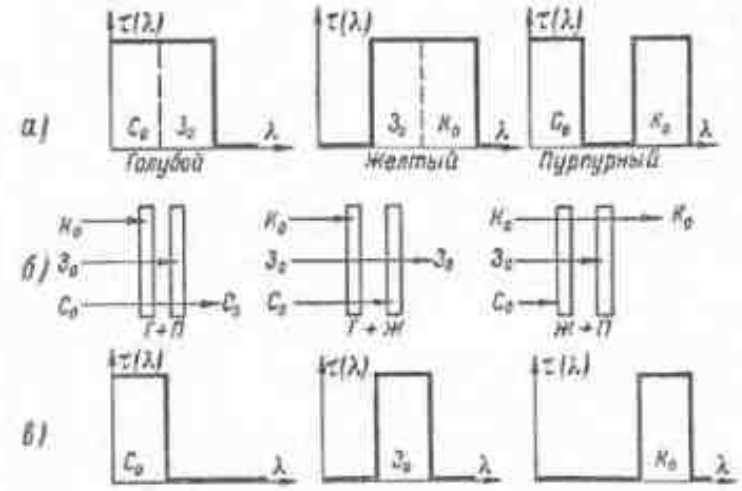


Рис. 2-55.

являются: голубой, запирающий красную полосу спектра; желтый — синюю и пурпурный — зеленую (рис. 2-55,*а*).

Оптимальная схема Гюбля. Идеализированная схема субтрактивного смешения цветов, предложенная Гюблем [Л. 42], предусматривает три фильтра, имеющих коэффициент пропускания, теоретически равный нулю в зоне поглощения и единице в зонах пропускания (рис. 2-55,*а*). Попарная комбинация таких фильтров, названных *оптимальными фильтрами* вследствие наибольшего их коэффициента пропускания для заданной результирующей цветности[1], обеспечивает наиболее чистые цвета субтрактивной смеси: красный $К_о$, синий $С_о$ и зеленый $З_о$, тождественные цветам аналогичных полос спектра (рис. 2-56). Тождественность результирующих цветов попарного субтрактивного смешения цветам полос спектра объясняется запиранием двух полос двумя последовательно расположенными фильтрами (рис. 2-55,*б* и *в*). Предполагая возможным изме-

[1] Теория оптимальных фильтров и их расчет изложены в § 2-18.

нение коэффициента пропускания каждого фильтра в зоне поглощения от нуля до единицы[1], получим оптимальную систему субтрактивного воспроизведения цвета с наиболее широким охватом воспроизводимых цветов. Совокупность трех оптимальных фильтров идеализированной системы Гюбля с одинаковой концентрацией поглощающего вещества в каждой полосе трансформирует исходный белый цвет в черный или серый в зависимости от величины концентрации поглощающих веществ.

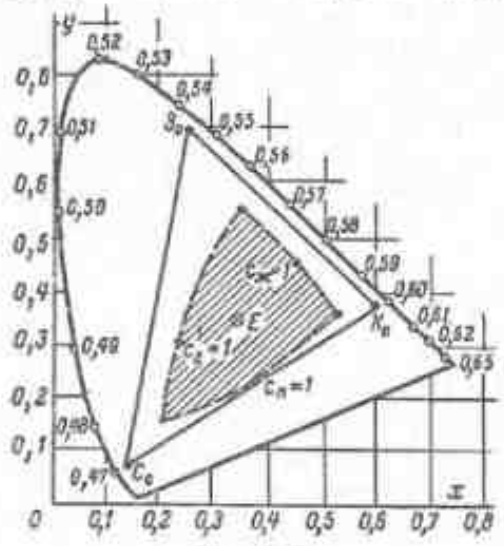


Рис. 2-56.

Совокупность трех оптимальных фильтров с неодинаковой концентрацией поглощающего вещества создает хроматические цвета, разбавленные белым. Степень разбавления белым определяется минимальным из трех коэффициентов пропускания фильтров в их полосах поглощения (рис. 2-57).

Субтрактивное смешение с помощью оптимальных фильтров тождественно аддитивному смешению красного, зеленого и синего, соответствующих цветам каждой полосы спектра отдельно:

$$\Phi \equiv \tau_ж \Phi_C + \tau_п \Phi_З + \tau_г \Phi_К, \qquad (2\text{-}112)$$

где $\tau_ж$, $\tau_п$ и $\tau_г$ — коэффициенты пропускания в полосах поглощения желтого, пурпурного и голубого фильтров;

$\left.\begin{aligned} \Phi_C &\equiv x'_C X + y'_C Y + z'_C Z; \\ \Phi_З &\equiv x'_З X + y'_З Y + z'_З Z; \\ \Phi_К &\equiv x'_К X + y'_К Y + z'_К Z \end{aligned}\right\}$ — цвета излучений синей, зеленой и красной полос спектра.

Координаты цвета излучения в пределах каждой полосы спектра определяются функцией спектральной интенсивности излучения белого исходного цвета:

$$x'_К = \int_{0,57}^{0,77} \varphi_0(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \qquad x'_З = \int_{0,5}^{0,57} \varphi_0(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda,$$

[1] В реальных фильтрах увеличение коэффициента пропускания в полосе поглощения происходит в результате уменьшения концентрации красящего вещества, обладающего способностью активно поглощать излучения в этой полосе спектра (рис. 2-54).

$$x'_C = \int_{0,38}^{0,5} \varphi_0(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda;$$

$$y'_К = \int_{0,57}^{0,77} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \qquad y'_З = \int_{0,5}^{0,57} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda;$$

$$y'_C = \int_{0,38}^{0,5} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda;$$

$$z'_К = \int_{0,57}^{0,77} \varphi_0(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda; \qquad z'_З = \int_{0,5}^{0,57} \varphi_0(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda,$$

$$z'_C = \int_{0,38}^{0,5} \varphi_0(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda.$$

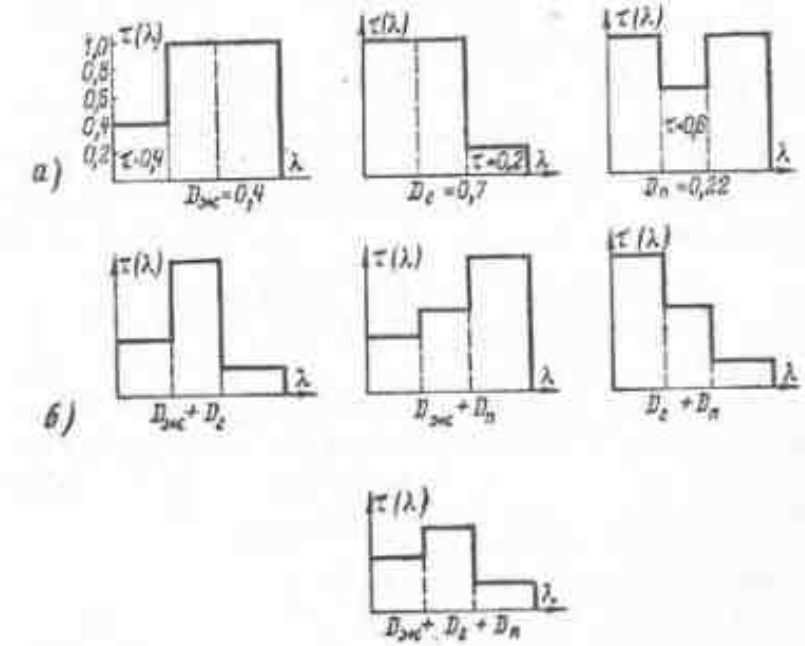


Рис. 2-57.

Пределы интегрирования для каждой полосы определяются ее спектральными границами: $\lambda_1 = 0{,}38$ *мк*, $\lambda_2 = 0{,}50$ *мк*, $\lambda_3 = 0{,}57$ *мк* и $\lambda_4 = 0{,}77$ *мк*.

Подставляя значения координат цвета в (2-112) и производя группировку членов с одинаковыми основными цветами систе-

мы XYZ, получим следующие выражения координат результирующего цвета:

$$\left.\begin{aligned} x' &= \tau_{ж}\int_{0,38}^{0,50}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda+\tau_{з}\int_{0,50}^{0,57}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda+\tau_{к}\int_{0,57}^{0,77}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda;\\ y' &= \tau_{ж}\int_{0,38}^{0,50}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda+\tau_{з}\int_{0,50}^{0,57}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)+\tau_{к}\int_{0,57}^{0,77}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda;\\ z' &= \tau_{ж}\int_{0,38}^{0,50}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda+\tau_{з}\int_{0,50}^{0,57}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda+\tau_{к}\int_{0,57}^{0,77}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}113)$$

Относительное значение яркости результирующего цвета по сравнению с яркостью исходного белого цвета будет:

$$\frac{B}{\sigma_{б}}=\frac{y'}{\int_{0,38}^{0,77}\varphi_{б}(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}. \quad (2\text{-}114)$$

Как можно видеть из приведенных (2-113) и (2-114), идеализированная субтрактивная система тождественна аддитивной системе с основными цветами излучений, имеющими спектральное распределение такое же, как исходный белый, по следующим полосам спектра:

красный цвет — 0,57—0,77 *мк*;
зеленый цвет — 0,50—0,57 *мк*;
синий цвет — 0,38—0,50 *мк*.

Из этого следует, что любому заданному цвету соответствует вполне определенная совокупность трех фильтров, однозначно характеризующих заданный цвет. Характеристики этих фильтров могут служить *субтрактивными координатами* заданного цвета. Уравнение (2-113) показывает, что субтрактивными координатами идеализированной системы могут служить коэффициенты пропускания или оптические плотности каждого фильтра в зоне поглощения $\tau_{ж}$, $\tau_{з}$ и $\tau_{к}$ или $D_{ж}$, $D_{з}$ и $D_{к}$ а также поверхностные концентрации молекул красящих веществ $c_{ж}$, $c_{з}$ и $c_{к}$. В соответствии с законом Бугера — Бера последние две системы координат D и c практически одинаковы, так как при постоянстве толщины фильтрующего слоя $l=\text{const}$ оптическая плотность однозначно и линейно определяется концентрацией красителя. Учитывая удобство пользования оптической плотностью при наличии нескольких (двух или трех) последовательно

расположенных фильтров, ее значения чаще всего используют в качестве субтрактивных координат воспроизводимого цвета. Фильтры идеализированной схемы Гюбля, имеющие в полосах пропускания оптическую плотность, равную нулю, характеризуются значениями оптической плотности в полосе поглощения (рис. 2-57).

Тело цветового охвата. Для исследования возможностей любой системы воспроизведения цветов пользуются понятием *цветового охвата* исследуемой системы, под которым принято считать все многообразие цветов, реально воспроизводимое при выбранных красящих веществах в тех условиях, которые определяют применяемую систему цветовоспроизведения. Вполне понятно, что цветовой охват определяется также тем белым цветом, который принят исходным цветом системы.

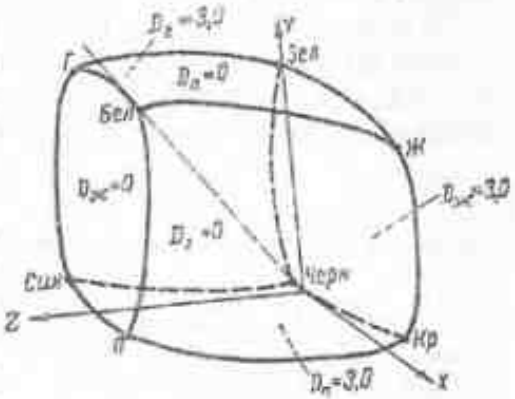


Рис. 2-58.

Графически цветовой охват исследуемой системы воспроизведения цвета можно изобразить *телом цветового охвата* (цветовое тело), представляющим некоторую часть цветового пространства, ограниченную совокупностью поверхностей, являющихся геометрическим местом точек предельно воспроизводимых цветов (рис. 2-58).

Вполне понятно, что изменение исходного белого цвета по величине без изменения его цветности приведет к пропорциональному росту векторов любого другого цвета, следовательно, к пропорциональному изменению тела цветового охвата без изменения его формы. Изменение исходного цвета по цветности приводит к изменению тела цветового охвата по форме тем большему, чем больше различие направлений векторов исходных белых цветов.

Для детального изучения свойств исследуемой системы воспроизведения введем понятие об *изохромных поверхностях*, представляющих собой геометрическое место точек концов векторов изохромных цветов, воспроизводимых при постоянном значении одной из трех субтрактивных координат воспроизводимого цвета. Из определения изохромной поверхности следует, что кривая пересечения двух изохромных поверхностей, называемая *изохромной линией*, является геометрическим местом точек равных значений двух субтрактивных координат цвета. Отсутствие линейной связи между субтрактивными координатами воспроизводимого цвета и координатами этого же цвета

в любой аддитивной колориметрической системе, например XYZ, приводит к сложной форме (часто с двойной кривизной) изохромных линий и поверхностей, построенных в цветовом пространстве XYZ, или какой-либо другой аддитивной системе.

Определение цветового тела системы и изохромных поверхностей позволяет констатировать, что цветовое тело любой субтрактивной системы воспроизведения цвета ограничивается шестью предельными изохромными поверхностями с нулевым и максимальным значениями субтрактивных координат, определяемых количеством каждого из трех красителей. Двенадцать ребер цветового тела представляют собой изохромные линии, характеризующие цвета с переменными значениями одной из трех субтрактивных координат и предельными постоянными значениями двух других. Восемь вершин тела охвата, в которых сходятся по три двенадцать изохромных линий, определяют следующие характерные цвета системы (табл. 14).

Таблица 14

Вершины тела цветового охвата по Нюбергу

Результирующие насыщенные цвета	Оптическая плотность		
	$D_ж$	$D_п$	$D_г$
Бел — белый	0	0	0
Ж — желтый[1]	3,0	0	0
П — пурпурный	0	3,0	0
Г — голубой	0	0	3,0
Син — синий	0	3,0	3,0
Зел — зеленый	3,0	0	3,0
Кр — красный	3,0	3,0	0
Черн — черный	3,0	3,0	3,0

[1] Во всех дальнейших сокращенных записях набора фильтров субтрактивного смешения принято пропускание в спектральной полосе практически равным нулю при $D = 3{,}0$, что соответствует, как известно, $\tau = 0{,}001$.

Применяемые в практике цветовоспроизведения фильтры и краски значительно отличаются по спектральным характеристикам от оптимальных (рис. 2-59 и 2-60). Как можно видеть из приведенных кривых спектральных значений коэффициента пропускания и оптической плотности красителей, применяемых в цветных полиграфических репродукциях (рис. 2-59) и в различных слоях цветной кинопленки (рис. 2-60), границы полос пропускания и поглощения размыты. Отсутствие резких границ спектральных полос пропускания и поглощения, а также неодинаковый спектральный состав прошедшего и поглощенного потоков в зонах при различной концентрации реального красителя (рис. 2-54) приводят к тому, что понятие об основных цве-

тах субтрактивного способа воспроизведения становится недостаточно определенным.

Расплывчатость границ спектральных полос поглощения и пропускания реальных фильтров приводит к сжатию тела цветового охвата реальной системы по сравнению с идеализированной за счет меньшего значения коэффициентов пропускания реальных фильтров по сравнению с идеальными. Для иллюстрации этого положения рассмотрим на диаграмме цветности расположение точек цветностей характеристических цветов реальной системы (цветная позитивная кинопленка) и оптимальной с фильтрами, обладающими нулевыми и конечными значениями коэффициентов пропускания в полосах поглощения (рис. 2-56).

При сопоставлении возможностей реальной и оптимальной систем субтрактивного воспроизведения цвета следует учитывать, что примерно одинаковыми коэффициентами пропускания обладают реальные фильтры с концентрацией красителя 0,8—1,0 и оптимальные фильтры $D_п = D_ж = D_г = 3{,}0$, практически запирающие полосы поглощения. Из сопоставления этих точек на диаграмме цветности (рис. 2-56) можно видеть бо́льшие возможности цветовоспроизведения идеализированной системы Гюбля.

Вследствие указанных причин тело цветового охвата идеализированной системы при заданном исходном белом является максимальным и все тела реальных цветовых систем вписываются внутрь объема тела цветового охвата системы Гюбля. Увеличение объема тела цветового охвата реальной системы расширяет возможности воспроизведения цветов, вследствие чего сопоставление различных систем воспроизведения цвета можно производить сравнением их тел цветового охвата или сечений этих тел плоскостями, проходящими через вектор белого цвета, а также плоскостями, перпендикулярными его направлению.

Субтрактивные координаты цвета. Несмотря на различие спек-

Рис. 2-59.

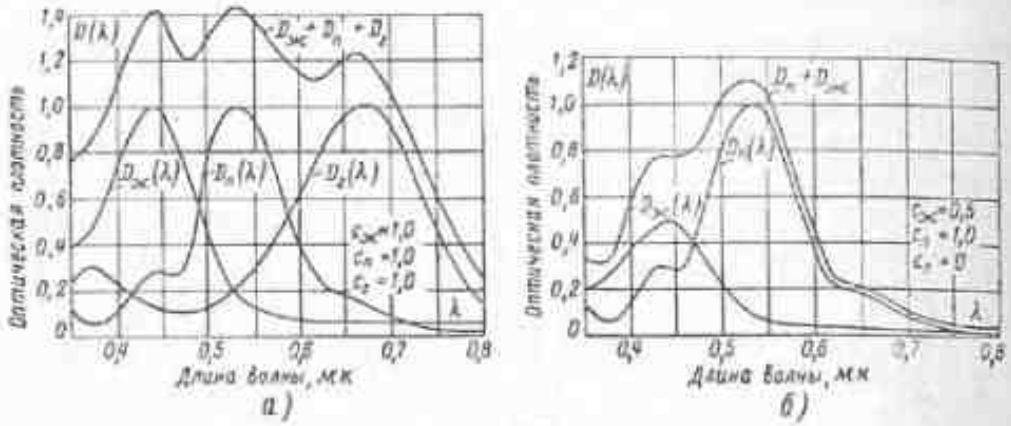


Рис. 2-60.

трофотометрических кривых реальных и оптимальных фильтров, набор трех реальных фильтров при заданном исходном белом цвете системы также однозначно определяет результирующий цвет. Следовательно, любые характеристики трех фильтров реальной системы могут служить субтрактивными координатами результирующего цвета. В качестве субтрактивных координат цвета любой реальной системы могут быть приняты: поверхностная концентрация красящего вещества, оптическая плотность или коэффициенты пропускания в наиболее характерных участках спектра, толщина слоя краски и другие параметры, однозначно определяющие оптические свойства каждого фильтра или слоя краски.

Выбор субтрактивных координат любой системы воспроизведения цвета должен исходить из удобства практического пользования, а также из оценки точности определения оптических свойств совокупности трех фильтров, характеризующих координируемый (результирующий) цвет. Изложенные соображения позволяют сделать следующий вывод: совокупность трех координат реальной системы субтрактивного воспроизведения цвета однозначно определяет любой заданный цвет для установленного исходного белого и, наоборот, любому заданному цвету соответствует единственно возможный набор трех субтрактивных координат, свойственный только этому цвету. Для иллюстрации этого положения рассмотрим спектрофотометрический метод расчета поверхностных концентраций красителей в отдельных слоях трехслойной цветной позитивной кинопленки.

Современная цветная позитивная и негативная кинопленки состоят из трех фотоэмульсионных слоев с различной спектральной чувствительностью. В процессе проявления скрытого изображения в каждом из этих слоев образуются зерна красителя тем в большей концентрации, чем большее количество актиничного освещения[1] упало на место изображения. Первый

[1] Количество актиничного освещения определяется произведением количества освещения на актиничность падающего излучения для исследуемого слоя фотоэмульсии.

слой в процессе проявления окрашивается в желтый цвет, второй — в пурпурный и третий — в голубой (рис. 2-80,*а*, *б*). Цвет излучения, упавшего на экран после прохождения через три окрашенных в процессе проявления слоя цветной позитивной кинопленки, однозначно определится при заданном спектральном составе белого источника света кинопроектора спектральной характеристикой совокупности трех цветных слоев пленки.

Спектральная характеристика проявленного изображения на позитивной пленке определится концентрацией красящего вещества в каждом слое пленки (рис. 2-60,*а* и *б*). Результирующую кривую оптической плотности трех слоев позитивной пленки можно также с достаточной точностью характеризовать спектральными значениями оптической плотности для трех характерных участков спектра. Значения спектральной оптической плотности на этих участках спектра определяются суммами произведений концентрации красящего вещества на десятичный показатель ослабления[1] [Л. 25]:

$$\left.\begin{aligned} D_{\lambda_1} &= m^{ж}_{\lambda_1} c^{ж} + m^{п}_{\lambda_1} c^{п} + m^{г}_{\lambda_1} c^{г};\\ D_{\lambda_2} &= m^{ж}_{\lambda_2} c^{ж} + m^{п}_{\lambda_2} c^{п} + m^{г}_{\lambda_2} c^{г};\\ D_{\lambda_3} &= m^{ж}_{\lambda_3} c^{ж} + m^{п}_{\lambda_3} c^{п} + m^{г}_{\lambda_3} c^{г}, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}115)$$

где D_{λ_1}, D_{λ_2}, D_{λ_3} — спектральные значения оптической плотности для длин волн λ_1, λ_2, λ_3;

$m^{ж}_{\lambda_1}$, $m^{п}_{\lambda_2}$, $m^{г}_{\lambda_3}$ — спектральные значения десятичных молекулярных показателей ослабления желтого, пурпурного и голубого слоев пленки для тех же длин волн;

$c^{ж}$, $c^{п}$, $c^{г}$ — поверхностная концентрация желтого, пурпурного и голубого красящих веществ.

Выбирая в качестве характерных длин волн $\lambda_1 = 0{,}44$ *мк*, $\lambda_2 = 0{,}53$ *мк* и $\lambda_3 = 0{,}67$ *мк* (рис. 2-60), для которых оптические плотности максимальны в первом, втором и третьем слоях пленки, условимся считать концентрацию красящего вещества единичной, если оптическая плотность в максимуме полосы поглощения этого слоя равна единице [Л.44].

Согласно принятым условиям и реальным кривым $D_\lambda = f(\lambda)$ для каждого слоя пленки систему (2-115) можно написать в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} D_{0{,}44} &= 1{,}00c^{ж} + 0{,}34c^{п} + 0{,}09c^{г};\\ D_{0{,}53} &= 0{,}19c^{ж} + 1{,}00c^{п} + 0{,}14c^{г};\\ D_{0{,}67} &= 0{,}04c^{ж} + 0{,}08c^{п} + 1{,}00c^{г}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}115а)$$

[1] При составлении систем уравнений, определяющих спектральные значения оптической плотности, приняты постоянными значения толщины отдельных слоев, что имеет место в цветных пленках.

Решая полученную систему (2-115а) относительно концентрации красящего вещества, получим совокупность трех уравнений, определяющих субтрактивные координаты цвета, воспроизведенного тремя слоями цветной позитивной кинопленки:

$$\left.\begin{aligned} c^{ж} &= 1{,}08D_{0,44} - 0{,}36D_{0,53} - 0{,}04D_{0,67};\\ c^{п} &= -0{,}20D_{0,44} + 1{,}08D_{0,53} - 0{,}13D_{0,67};\\ c^{г} &= -0{,}03D_{0,44} - 0{,}07D_{0,53} + 1{,}02D_{0,67}; \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}116)$$

Эта система уравнений однозначно определяет субтрактивные координаты результирующего цвета, заданного спектральной кривой коэффициентов пропускания трех фильтров и спектральным составом исходного белого цвета.

2-17. Оценка качества воспроизведения цвета

Критерии точности воспроизведения. Проблема оценки качества воспроизведения цвета возникла в полном объеме за последние годы в связи с широчайшим внедрением цветного кино, появлением различных систем цветной полиграфической печати, а также широких перспектив внедрения цветного телевидения. Оценка качества воспроизведения цвета заключается в установлении соответствия и степени различия зрительного восприятия цветных объектов (оригиналов) и их репродукций на экранах телевизоров и кино, а также на страницах иллюстрированных книг и журналов.

Как показал проф. Н. Д. Нюберг [Л. 43], критериями оценки качества воспроизведения цвета могут быть:

а) физическая точность воспроизведения;

в) физиологическая точность воспроизведения;

в) психологическая точность воспроизведения.

Физическая точность воспроизведения многоцветного объекта определяется тождественностью спектрального распределения излучений любой точки объекта и соответствующей ей точки репродукции (изображения). Это условие можно записать следующими равенствами, обязательными на любом участке спектра:

для цветного кино

$$\varphi_{о}(\lambda)\rho_{о}(\lambda) = \varphi_{р}(\lambda)\tau_{р}(\lambda)\rho_{р}(\lambda);$$

для цветного телевидения

$$\varphi_{о}(\lambda)\rho_{о}(\lambda) = \varphi_{и}(\lambda);$$

для цветной полиграфической печати

$$\varphi_{о}(\lambda)\rho_{о}(\lambda) = \varphi_{р}(\lambda)\rho_{р}(\lambda). \qquad (2\text{-}117)$$

где $\varphi_{о}(\lambda)$ и $\varphi_{р}(\lambda)$ — спектральные интенсивности излучений белого исходного цвета, падающих на воспроизводимый объект и на репродукцию;

$\varphi_{и}(\lambda)$ — спектральные значения излучения изображения на экране телевизионного кинескопа;

$\rho_{о}(\lambda)$ и $\rho_{р}(\lambda)$ — спектральные значения коэффициентов отражения объекта и репродукции (для кинопроекции — проекционного экрана);

$\tau_{р}(\lambda)$ — спектральные значения коэффициента пропускания позитива и кинопроекционной оптики.

Физиологическая точность воспроизведения многоцветного объекта определяется тождественностью ощущения цвета любой точки оригинала и соответствующей ей точки репродукции. Введение понятия физиологической точности вызвано тем, что оценка соответствия репродукции оригиналу производится визуально или каким-либо физическим прибором (например, фотоэлектрическим колориметром), имитирующим свойства глаза дифференцировать излучения по их цветностям и яркостям. Тождественность ощущения цвета двух излучений в одинаковых условиях адаптации наблюдателя определится различием координат цветности сравниваемых излучений на величину, меньшую порогового приращения этой координаты, и относительной разностью их коэффициентов яркости, меньшей порогового контраста яркости:

$$\left.\begin{aligned} &x_{о} - x_{р} \leqslant \Delta x;\\ &y_{о} - y_{р} \leqslant \Delta y;\\ &\frac{r_{о} - r_{р}}{r_{р}} \leqslant \frac{\Delta B_{пор}}{B_{р}} \quad \text{или} \quad B_{о} - cB_{р} \leqslant \Delta B_{пор}, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}118)$$

где $x_{о}$, $y_{о}$ и $x_{р}$, $y_{р}$ — координаты цветности излучений сопоставляемых участков объекта и репродукции;

$r_{о}$ и $r_{р}$ — их коэффициенты яркости по направлению к глазу наблюдателя;

$\Delta B_{пор}$, Δx, Δy — пороговые приращения яркости и координат цветности;

$B_{о}$, $B_{р}$ — яркости соответственных участков объекта и репродукции;

c — постоянный коэффициент для всех участков репродукции.

Психологическая точность воспроизведения многоцветного объекта определяется такой его репродукцией, в которой любое изменение цвета какого-либо ее участка, не сопровождающееся одновременным изменением остальных ее частей, понижает оценку качества воспроизведения. Введение понятия психоло-

гической точности возникло в результате установления опытом существенных отклонений от требований физиологической точности без заметного снижения оценки качества воспроизведения цвета. Было установлено, что эти допустимые отклонения неодинаковы по числу цветовых и яркостных порогов в зависимости от направления изменения цветности, значимости участка репродукции в общем ее ансамбле и других причин.

Так, например, экспериментально доказана возможность большего отклонения цветности любого участка репродукции, если цветность всех остальных ее участков изменяется в том же направлении, например при рассматривании репродукции через слабоизбирательный светофильтр. Также установлена допустимость бо́льших изменений цветности по чистоте, чем по цветовому тону. Известно также, что отклонение цветности и яркости, на основных, центральных по композиции участках репродукции должно быть значительно меньше, чем на второстепенных участках.

Все изложенное показывает, что переход от физиологического критерия оценки воспроизведения цветов к психологическому критерию соответствует переходу от ощущений к восприятиям цветов, форм и предметов. Для иллюстрации этого следует указать, что цвет страниц книги, освещенной оранжевыми лучами заходящего солнца, воспринимается белым, несмотря на то, что его колориметрические характеристики соответствуют оранжевому цвету. Такое «неправильное» восприятие цвета происходит как вследствие того, что в лучах заходящего солнца все предметы окружающего нас пространства значительно желтеют и краснеют, так и вследствие огромной роли предметно-смыслового содержания восприятия окружающих нас предметов.

На основании приведенного примера и многих других, имеющих место при восприятии предметов окружающего пространства в условиях отклонения исходного цвета от белого, несмотря на значительное изменение колориметрических характеристик излучений, отраженных этими предметами, мы свободно узнаем эти предметы, и восприятие их цвета соответствует цвету, присущему этим предметам. В этом проявляется роль практической деятельности человека в формировании образов внешнего мира.

Все эти соображения позволяют считать психологическую оценку точности наиболее существенной. К этому следует добавить, что психологический критерий позволяет судить о качестве воспроизведения многоцветного объекта в целом, а не по отдельным его участкам. Эта особенность критерия психологической точности оценки качества любой цветной репродукции и ее соответствия оригиналу показывает, что понятие психологической точности может применяться к оценке качества воспроизведения сложных многоцветных оригиналов. Наряду с этим

критерий психологической точности лишен смысла применительно к отдельным цветам или одноцветным участкам многоцветной репродукции.

Наряду с этим отличием критерия психологической оценки точности от физиологической точности воспроизведения цвета следует указать, что техническое осуществление этих двух способов контроля качества цветовоспроизведения должно основываться на единой колориметрической методике учета пороговых отклонений цветностей и яркостей репродукций и оригинала. Большая практическая значимость понятия психологической точности оценки цветовоспроизведения, а также недостаток знаний в области допустимых отклонений цветности и яркостей в зависимости от характеристик оригинала и условий репродуцирования требуют более глубокого изучения этого метода. Это изучение должно идти по линии накапливания и обобщения опыта установления допустимых количественных колориметрических отклонений, характеризующих репродукцию в целом, в зависимости от различных факторов.

Решение этой задачи имеет большое значение также и потому, что количественные требования физиологической точности являются оптимальными, удовлетворение которых для многих цветов, особенно большой чистоты, невыполнимо. Следовательно, установление количественных допусков отклонений репродукции от оригиналов должно способствовать разработке практических требований оценки качества воспроизведения сложных многоцветных объектов.

Роль цветовой адаптации в воспроизведении цвета. При оценке качества воспроизведения цвета колориметрическим методом, основанным на критериях физиологической и психологической точности, необходимо учитывать не только изменение цветности и яркости за счет различия спектрального распределения излучения объекта и его репродукции, но также и изменение ощущения цвета за счет изменения цветовой адаптации (§ 1-10). Как известно, процесс цветовой адаптации характеризуется изменением концентрации молекул *кзс*-фотореагентов глаза наблюдателя, обратно пропорциональным соотношению координат цвета заданных условий адаптации и адаптации в условиях экспериментального определения[1] $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$. Замена отношения концентраций молекул *кзс*-фотореагентов отношением *кзс*-координат цвета адаптации правомочна потому, что скорость распада молекул фотореагента определяется произведением концентрации исследуемого

[1] Исходные адаптационные условия при определении *кзс*-чувствительности среднего глаза приняты тождественными условиям определения $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$ потому, что эти координаты положены в основу построения всех цветовых систем (§ 2-6).

фотореагента на соответствующий ему компонент яркости (ч. 1, § 3-22).

Исходя из этого, можно принять изменение координат цвета основной физиологической системы *КЗС* в результате изменившейся адаптации пропорциональным отношению соответствующих координат цвета излучений исходной адаптации и адаптации в условиях репродукции [Л. 46—48]:

$$\left.\begin{aligned} \kappa'_{р.а} &= \frac{\kappa'_C}{\kappa'_а}\cdot\kappa'_р;\\ з'_{р.а} &= \frac{з'_C}{з'_а}\cdot з'_р;\\ с'_{р.а} &= \frac{с'_C}{с'_а}\cdot с'_р, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}119)$$

где $\left.\begin{aligned} \kappa'_р &= \int \varphi_р(\lambda)\tau_р(\lambda)\rho_р(\lambda)\bar{\kappa}(\lambda)\,d\lambda;\\ з'_р &= \int \varphi_р(\lambda)\tau_р(\lambda)\rho_р(\lambda)\bar{з}(\lambda)\,d\lambda;\\ с'_р &= \int \varphi_р(\lambda)\tau_р(\lambda)\rho_р(\lambda)\bar{с}(\lambda)\,d\lambda \end{aligned}\right\}$ — расчетные значения координат цвета излучения исследуемого участка репродукции[1];

$\kappa'_{р.а}$, $з'_{р.а}$, $с'_{р.а}$ — координаты цвета, эквивалентного по зрительному ощущению цвету излучения исследуемого участка репродукции в условиях адаптации на цвет с координатами $\kappa'_а$, $з'_а$ и $с'_а$;

κ'_C, $з'_C$, $с'_C$ — координаты цвета, соответствующие адаптации на излучение с яркостью, равной яркости в условиях репродукции, $y'_C = y'_а$.

Координаты цвета в международной системе *XYZ* определятся по (2-55) применительно к переходу от системы *КЗС* к системе *XYZ*.

[1] В тех случаях, когда в процессе синтеза репродукции отсутствует отражение или пропускание, соответствующий коэффициент подынтегральной функции следует принимать равным единице; так, например, для цветного телевизионного изображения следует принять $\rho_р(\lambda) = 1$, $\tau_р(\lambda) = 1$ и $\varphi_р(\lambda) = \varphi_а(\lambda)$.

Для иллюстрации расчетов цветовой адаптации рассмотрим пример изменения ощущения цветности разноокрашенных объектов, освещенных люминесцентными лампами ХБС и БС. В качестве эталона ощущения цветности принята [Л. 47] цветность

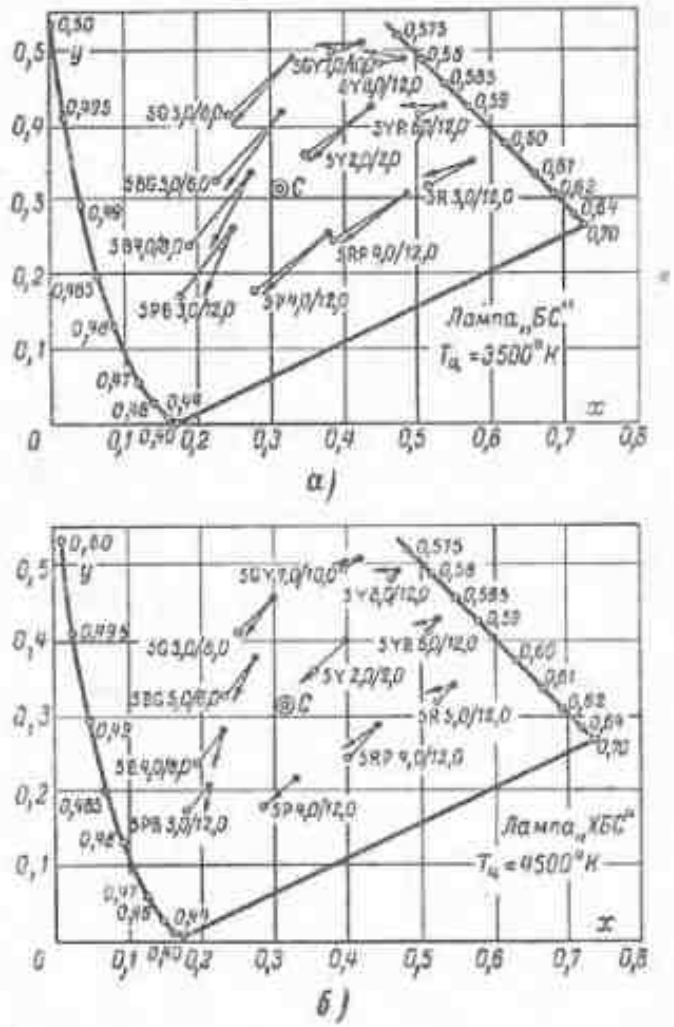


Рис. 2-61.

исследуемых образцов, освещенных стандартным белым цветом.

Адаптация наблюдателей на исследуемый цвет излучения проводилась перед опытами в течение 5 *мин*. Исследования, проведенные пятью наблюдателями, предварительно тренированными на определение цветов по шкале атласа Мэнселла, показали существенное влияние состояния цветовой адаптации на ощущение цвета образцовых выкрасок, освещенных различными источниками цвета. Для иллюстрации результатов этих опытов на диаграмме цветности *xy* (рис. 2-61) нанесены точки цвет-

ности одиннадцати образцовых выкрасок, обозначенные индексами системы Мэнселла (§ 2-11).

Черными точками на диаграмме изображены расчетные значения цветности в условиях освещения образцовых выкрасок исследуемым излучением люминесцентных ламп без учета изменения цветовой адаптации. Значительное отклонение результатов опытного определения цветности (нанесены на диаграмму кружочками) от результатов расчета следует объяснить изменением цветовой адаптации [Л. 46, 47]. Отклонение расчетных значений цветности от результатов эксперимента значительно больше для ламп БС, чем для ХБС, что объясняется более значительным различием спектров лампы БС и источника С. Для подтверждения этих выводов на диаграмму нанесены стрелками расчетные значения цветности, эквивалентные цветовым ощущениям с учетом изменения цветовой адаптации. Из сопоставления результатов эксперимента и расчета с учетом адаптации можно сделать вывод о достаточной для практики точности расчетного метода учета адаптации.

Рассмотрим подробнее этот метод, предложенный Джаддом. Пользуясь (2-78) для перехода от основной физиологической системы *КЗС* к системе *XYZ*, напишем выражение координат цвета, эквивалентного по зрительному ощущению цвету репродукции в условиях адаптации на исходный (белый) цвет с координатами $k'_а$, $з'_а$ и $c'_а$. Это выражение можно получить совместным решением (2-78) и (2-119):

$$\left.\begin{aligned} x'_{р.а} &= 2{,}957\delta к'_р - 2{,}174\gamma з'_р = 0{,}217\beta c'_р; \\ y'_{р.а} &= \delta к'_р; \\ z'_{р.а} &= \beta c'_р, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}120)$$

где $$\delta = \frac{к'_С}{к'_а};\ \gamma = \frac{з'_С}{з'_а} \text{ и } \beta = \frac{c'_С}{c'_а};$$

$к'_С$, $з'_С$ и $c'_С$ — координаты белого цвета С.

Заменяя расчетные значения координат цвета в системе *КЗС* на соответствующие им значения координат цвета в системе *XYZ* (2-78), получим после незначительного преобразования окончательные уравнения для расчета координат любого цвета выкрасок в новых условиях освещения исходным белым излучением, отличным от белого С:

$$\left.\begin{aligned} x'_{р.а} &= \gamma x'_р + 2{,}957\,(\delta - \gamma)\,y'_р + 0{,}217\,(\beta - \gamma)\,z'_р; \\ y'_{р.а} &= \delta y'_р; \\ z'_{р.а} &= \beta z'_р, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}121)$$

где $x'_р$, $y'_р$, $z'_р$ — расчетные значения координат цвета исследуемой репродукции без учета изменения цветовой адаптации;

$x'_{р.а}$, $y'_{р.а}$, $z'_{р.а}$ — то же с учетом адаптации, отличной от адаптации на белый цвет С.

Принимая при расчете равенство яркостей адаптации $y'_С = y'_а$, следовательно, равенство координат $к'_С = к'_а$, получим следующие соотношения уровней возбуждения *кзс*-приемников глаза для наиболее распространенных источников света (табл. 15).

Таблица 15

Параметры уровней возбуждения *кзс*-приемников

Источники света	Координаты цвета			Соотношение возбуждения		
	x'	y'	z'	з	т	ф
Источник С ($T_ц = 6\,740°$ К) . .	0,98	1,00	1,118	1,00	1,00	1,00
Лампа ДС ($T_ц = 6\,500°$ К) . .	0,95	1,00	1,09	1,00	0,996	1,08
Лампа БС ($T_ц \approx 3\,500°$ К) . .	1,02	1,00	0,50	1,00	1,09	2,34
Источник А ($T_ц \approx 2\,854°$ К) . .	1,10	1,00	0,37	1,00	1,15	3,33

Подставляя соотношения уровней возбуждения *кзс*-приемников для различных исследуемых источников света в (2-121), получим уравнения для расчета координат цвета любой выкраски с учетом изменения цветовой адаптации:

для люминесцентной лампы типа ДС

$$\left.\begin{aligned} x'_{р.а} &= 0{,}996x'_р + 0{,}012y'_р + 0{,}019z'_р; \\ y'_{р.а} &= y'_р; \\ z'_{р.а} &= 1{,}082z'_р; \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}121а)$$

для люминесцентной лампы типа БС

$$\left.\begin{aligned} x'_{р.а} &= 1{,}093x'_р - 0{,}275y'_р + 0{,}271z'_р;\\ y'_{р.а} &= y'_р;\\ z'_{р.а} &= 2{,}343z'_р; \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}121б)$$

для источника А (лампы накаливания)

$$\left.\begin{aligned} x'_{р.а} &= 1{,}154x'_р - 0{,}458y'_р + 0{,}473z'_р;\\ y'_{р.а} &= y'_р;\\ z'_а &= 3{,}327z'_р. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}121в)$$

Пользуясь (2-52), можно написать дробнолинейную зависимость между координатами цветности с учетом ($x_{р.а}$, $y_{р.а}$) и без учета ($x_р$, $y_р$) цветовой адаптации:

$$\left.\begin{aligned} x_{р.а} &= \frac{(1{,}217\gamma - 0{,}217\beta)\,x_р + (2{,}957\delta - 2{,}74\gamma - 0{,}217\beta)\,y_р + \dots}{1{,}27\,(\gamma - \beta)\,x_р + (3{,}957\delta - 2{,}74\gamma - 1{,}217\beta)\,y_р + \dots}\\ &\qquad \dots \frac{+\,0{,}217\,(\beta - \gamma)}{+\,0{,}217\,(\beta - \gamma) + \beta};\\ y_{р.а} &= \frac{\delta y_р}{1{,}27\,(\gamma - \beta)\,x_р + (3{,}957\delta - 2{,}74\gamma - 1{,}217\beta)\,y_р + 0{,}217\,(\beta - \gamma) + \beta}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}122)$$

Из системы уравнений общего вида (2-121) можно видеть, что расчет цветовой адаптации аналогичен преобразованию колориметрической системы XYZ в новую систему UVW. Координаты основных цветов этой новой цветовой системы нетрудно определить из сопоставления (2-51) и (2-121):

$$x'_U = \gamma;\ y'_U = 2{,}957\,(\delta - \gamma);\ z'_U = 0{,}217\,(\beta - \gamma);$$

$$x'_V = 0;\ y'_V = \delta;\ z'_V = 0;$$

$$x'_W = 0;\ y'_W = 0;\ z'_W = \beta.$$

Из этой аналогии следует возможность применения любого графического и номографического метода преобразования цветовых систем к расчету изменения ощущения цветности в процессе адаптации.

Методы оценки качества воспроизведения. Анализ критериев оценки точности воспроизведения цвета позволяет сделать вывод о целесообразности применения в практических условиях контроля процессов цветовоспроизведения *колориметрическими методами*, базирующимися на физиологической точности, или *спектрозональными методами*, ориентирующимися на приближенную оценку цветопередачи с помощью критерия физической точности.

Колориметрические методы контроля процессов воспроизведения цвета или совокупности цветов предусматривают применение на последней стадии равноконтрастных графиков, с помощью которых можно сопоставить зрительное различие цветности оригинала и репродукции, выраженное числом цветовых порогов. Рассмотрим этот метод применительно к простейшему случаю воспроизведения цвета, часто называемому *цветопередачей*. Этот случай, широко распространенный в практике осветительной техники, заключается в обеспечении правильной передачи цветов окружающих предметов в условиях искусственного освещения. Наличие в арсенале современной светотехники большого числа источников света (лампы накаливания, люминесцентные лампы, газоразрядные лампы с исправленной цветностью и др.) выдвигает задачу выбора источника света не только с точки зрения экономики обеспечения заданной освещенности или яркости, но также и с позиции обеспечения правильной передачи цвета всех предметов освещаемого пространства. Это дополнительное требование стало особенно актуальным в связи с появлением люминесцентных и газоразрядных ламп. Наличие многих типов люминесцентных ламп, спектральное распределение излучения которых можно варьировать в широких пределах путем подбора различных компонентов люминофора и выбора пропорции их смеси, позволило предъявлять более высокие требования к качеству цветопередачи. Наряду с этим наличие спектральных линий у газоразрядных источников и даже у люминесцентных ламп, а также резкая избирательность излучения отдельных компонентов люминофоров выдвигают задачи более жесткого контроля цветопередачи, не ограничиваясь регламентацией цветности излучения источников света.

Колориметрический метод оценки цветопередачи, предложенный Е. С. Ратнером [Л. 45], заключается в оценке различий цветности и коэффициентов яркости (отражения) образцовых цветных выкрасок, освещаемых исследуемым источником света и эталонным излучением. Ориентируясь на привычку оценивать цвета окружающих предметов в условиях дневного освещения, в качестве эталона обычно применяют стандартный источник белого цвета С. Для иллюстрации этого метода оценки цвета на диаграмме цветности системы XYZ (рис. 2-61) изображены изменения цветности образцовых выкрасок с учетом изменения цветовой адаптации наблюдателя в условиях освещения люминесцентными лампами БС и ХБС. Принимая допустимыми различия цветности не больше двух цветовых порогов, следует сделать вывод о недопустимости применения ламп типа ХБС и БС в тех осветительных установках, где необходимо применить повышенные требования к качеству цветопередачи. Этот вывод объясняется тем, что различие цветности большинства выкрасок достигает при освещении лампами типа ХБС 3—5 порогов и лампами БС 7—9 порогов.

Как показали исследования, изменения коэффициента яркости образцовых выкрасок наиболее влияют на цветопередачу в тех случаях, когда они различны для разных выкрасок. Учитывая это, принято производить сравнение относительных изменений коэффициентов яркости по всему набору образцовых выкрасок.

Для оценки качества цветопередачи на VIII сессии МКО (1931) был предложен *спектрозональный метод*, согласно которому контроль качества цветопередачи осуществляется определением отклонения потоков исследуемого излучения от эталонного по восьми зонам спектра. Согласно этому методу цветопередачу принято считать удовлетворяющей требованиям, если поток исследуемого источника белого цвета в каждой зоне отличается не более допустимого предела, установленного в процентах от потока эталонного излучения в этой же зоне.

Предложенная Голландским национальным комитетом разбивка спектра по зонам, приведенная в таблице, не была обоснована и является в некоторой мере случайной. Е. С. Ратнер, анализируя разбивку спектра, предложенную МКО, установил резкое различие зон по числу цветовых порогов в пределах каждой зоны и рассчитал новый вариант деления спектра на зоны, основанный на одинаковом изменении цветового тона, выраженном числом порогов (табл. 16).

Таблица 16

Зоны спектра для контроля цветопередачи

Зоны спектра		1	2	3	4	5	6	7	8	
Длины волн, мк	по МКО . . .	0,40	0,42	0,44	0,46	0,51	0,56	0,61	0,66	0,72
	по Ратнеру . .	0,37	0,44	0,48	0,50	0,53	0,57	0,59	0,62	0,70

Простейшим критерием оценки источника белого цвета с точки зрения обеспечения необходимого качества цветопередачи является цветовая температура излучения или его координаты цветности. Этот критерий, широко применявшийся в прежние годы для оценки тепловых излучений, неприемлем при расширении ассортимента источников света, в частности при внедрении в практику осветительной техники газоразрядных ламп с исправленной цветностью и люминесцентных ламп, излучения которых могут иметь существенно различное распределение энергии по спектру при одинаковой цветовой температуре.

Стадии контроля субтрактивного воспроизведения цвета. Практические вопросы контроля воспроизведения совокупности цветов сложных многоцветных объектов решаются индивидуально вследствие различия технологических процессов воспроизведения на отдельных его этапах. Несмотря на различие систем воспроизведения, вполне возможно [Л. 45 и 49] установить три общие по своему назначению стадии любого субтрактивного процесса воспроизведения цветов. Такими стадиями процессов воспроизведения цветов являются:

а) *цветоделение* (аналитическая стадия процесса);

б) *выбор градационных характеристик* перехода от первой стадии ко второй (переходная стадия процесса);

в) *синтез воспроизводимых цветов* (синтезирующая стадия процесса).

Аналитическая стадия процесса воспроизведения цветов заключается в разделении излучения, поступающего от каждой точки оригинала, на три компонента:

$$\left.\begin{aligned} \Phi_1 &= \int \varphi_0(\lambda)\,\rho_0(\lambda)\,g_1(\lambda)\,d(\lambda); \\ \Phi_2 &= \int \varphi_0(\lambda)\,\rho_0(\lambda)\,g_2(\lambda)\,d(\lambda) \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}123)$$

и

$$\Phi_3 = \int \varphi_0(\lambda)\,\rho_0(\lambda)\,g_3(\lambda)\,d(\lambda),$$

где Φ_1, Φ_2 и Φ_3 — эффективные компоненты цвета излучения, определяющие уровень действия излучения на каждый из трех приемников первой стадии процесса;

$\varphi_0(\lambda)$ — спектральная интенсивность излучения источника, освещающего объект;

$\rho_0(\lambda)$ — коэффициент отражения объекта;

$g_1(\lambda)$, $g_2(\lambda)$, $g_3(\lambda)$ — спектральные чувствительности трех приемников.

Как можно видеть из (2-123), определяющего эффективные компоненты воспроизводимого цвета, цветоделение осуществляется тремя приемниками с различной спектральной чувствительностью. Такими приемниками являются: три слоя негативной пленки в цветной кинематографии, три фотоснимка через разделяющие светофильтры в цветной полиграфии и пр. Условимся в дальнейшем называть *излучения* оригинала *равноэффективными* относительно одного из трех приемников процесса воспроизведения цвета, если эффективные компоненты сравниваемых излучений одинаковы применительно к этому же приемнику. Основным условием обеспечения правильности первой стадии воспроизведения цвета является соответствие цветов равноэффективных излучений цветам, изохромным относительно

того же приемника, и, наоборот, — изохромные цвета должны быть равноэффективны. Вследствие того, что существует множество одноцветных и разноспектральных излучений, цветоделение необходимо осуществлять так, чтобы соотношение и величины эффективных компонентов излучения определялись однозначно его цветом, а не спектральным составом.

Вторая стадия процесса воспроизведения цветов состоит из нескольких этапов, определяющих: технологию печати позитивных копий в цветной кинематографии, изготовление качественных растровых цветоделенных негативных изображений с оригинала в цветной полиграфической печати и пр. Эта переходная стадия от цветоделения к синтезу цветной репродукции определяется функциями, характеризующими зависимости субтрактивных координат воспроизводимого цвета от его эффективных компонентов:

$$u = f_1(\Phi_1);\ v = f_2(\Phi_2) \text{ и } w = f_3(\Phi_3). \qquad (2\text{-}124)$$

Основным этапом этой стадии процесса в цветной фотографии и кинематографии является выбор исправляющих фильтров и контратипирование цветного фильма. В цветной полиграфической печати наиболее существенным этапом этой стадии является правильный выбор маскирующих диапозитивов, исправляющих дефекты цветоделенных растровых изображений с учетом цвета красок, применяемых в синтезе.

Синтез воспроизводимых цветов в условиях цветной репродукции характеризуется тремя функциями, выражающими зависимости координат воспроизводимых цветов от субтрактивных координат этих же цветов с учетом всех специфических особенностей процесса воспроизведения:

$$\left.\begin{aligned} x_i' = \varphi_1(u_i v_i w_i);\quad y_i' = \varphi_2(u_i v_i w_i) \\ \text{и} \\ z_i' = \varphi_3(u_i v_i w_i) \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}125)$$

или зависимостью субтрактивных координат от координат воспроизводимого цвета в международной цветовой системе XYZ:

$$\left.\begin{aligned} u_i = \psi_1(x_i'\ y_i'\ z_i');\quad v_i = \psi_2(x_i'\ y_i'\ z_i') \\ \text{и} \\ w_i = \psi_3(x_i'\ y_i'\ z_i'). \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}125\text{а})$$

Из определения изохромных цветов и поверхностей в цветовом пространстве следует, что постоянство любой из трех последних

функций (2-125а) определяет геометрическое место точек концов векторов изохромных цветов:

$$\left.\begin{aligned} \psi_1(x_i'\ y_i'\ z_i') = \text{const};\quad \psi_2 = (x_i'\ y_i'\ z_i') = \text{const} \\ \text{или} \\ \psi_3(x_i'\ y_i'\ z_i') = \text{const}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}125\text{б})$$

Следовательно, (2-125б) являются уравнениями изохромных поверхностей в пространстве $\overrightarrow{XYZ}$. Основным критерием анализа синтеза воспроизведения цветов служит тело цветового охвата системы воспроизведения (рис. 2-58).

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦВЕТА

2-18. Светофильтры

Характеристики светофильтров. Светофильтром (фильтром) принято называть некоторый ограниченный в пространстве слой среды, частично и, как правило, избирательно пропускающей падающее на нее излучение. Избирательное ослабление направленно проходящего через фильтр излучения может осуществляться за счет избирательного поглощения, избирательного рассеяния, интерференции, поляризации, вращательной дисперсии и т. д. В светотехнической практике получили наибольшее распространение поглощающие — *абсорбционные светофильтры* [Л. 50].

Эффективный поток[1] направленного пучка излучения, прошедшего через фильтр, определится (ч. I, § 1-24) как

$$F_\tau = \int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,\tau(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda,$$

где $\tau(\lambda)$ — спектральная функция направленного пропускания фильтра;

$g(\lambda)$ — спектральная чувствительность приемника, для которого определяется эффективный поток.

---

[1] В дальнейшем изложении математическая запись характеристик фильтра произведена в системе световых величин как одной из возможных систем эффективных величин.

Интегральной характеристикой любого светофильтра является интегральное значение его эффективного коэффициента направленного пропускания (ч. 1, § 1-26)

$$\tau_э = \frac{F_\tau}{F} = \frac{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,\tau(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda} = \frac{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,\tau(\lambda)K(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,K(\lambda)\,d\lambda} \qquad (2\text{-}126)$$

или его эффективная оптическая плотность

$$D_э = \lg\frac{F}{F_\tau} = \lg\frac{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,\tau(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda} = \lg\frac{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,K(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{0,77} \varphi(\lambda)\,\tau(\lambda)\,K(\lambda)\,d\lambda}, \qquad (2\text{-}126а)$$

где $K(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемника.

Очень часто эффективный коэффициент пропускания заменяется *кратностью светофильтра*, определяемой числом раз, в которое уменьшается яркость пучка лучей, прошедших сквозь фильтр. При оценке кратности светофильтра яркость следует выразить в единицах системы эффективных величин. Из (2-126) можно видеть, что кратность фильтра определится величиной, обратной его эффективному коэффициенту направленного пропускания:

$$\beta = \frac{B}{B_\tau} = \frac{\int_{0,38}^{0,77} b(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{0,77} b(\lambda)\,\tau(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda} = \frac{1}{\tau_э}. \qquad (2\text{-}126б)$$

Из сопоставления (2-126а) и (2-126б) можно видеть связь между кратностью фильтра и его эффективной оптической плотностью:

$$\left.\begin{aligned} D_э &= \lg\beta \\ \text{или} \\ \beta &= 10^{D_э}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}126в)$$

Эффективные интегральные характеристики светофильтра определяются не только его спектральными оптическими свойствами $\tau(\lambda)$, но также спектральным составом излучения $\varphi(\lambda)$ и спектральной чувствительностью приемника $g(\lambda)$. Для большинства поглощающих фильтров коэффициент пропускания

можно определить уравнением Бугера — Беера (ч. 1, § 2-22):

$$F_\tau = \int_{0,38}^{0,77} 10^{-m_\lambda cl}\varphi(\lambda)\,g(\lambda)\,d\lambda,$$

где m_λ — спектральное значение десятичного молекулярного показателя ослабления;

c — концентрация молекул поглощающего (красящего) вещества;

l — длина пути излучения в веществе фильтра.

Согласно этому уравнению спектральные оптические свойства светофильтров принято определять функциями спектральной прозрачности $\tau_1(\lambda) = 10^{-m_\lambda c}$ или удельного значения спектральной оптической плотности фильтра $d(\lambda) = m_\lambda c$ для $l = 1$ *мм* (рис. 2-62).

Типы светофильтров. По своему назначению все светофильтры принято делить на три группы:

а) нейтральные; б) разделяющие; в) исправляющие (корригирующие).

Нейтральные светофильтры, предназначенные для уменьшения яркости пучка лучей без изменения его спектрального состава, находят широкое применение в фотометрии[1]. Вследствие постоянства спектрального коэффициента пропускания нейтрального светофильтра на всем используемом участке спектра кратность такого фильтра определится как

$$\beta = \frac{1}{\tau} = \tau_1^{-l}, \qquad (2\text{-}127)$$

где τ_1 — прозрачность фильтра на всем используемом участке спектра, $мм^{-1}$;

l — толщина фильтра, *мм*.

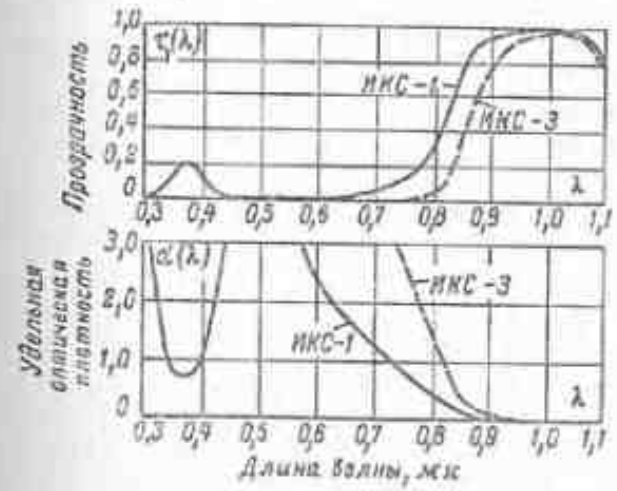


Рис. 2-62.

Из (2-126б) можно видеть, что кратность нейтрального фильтра одинакова как для излучений любого спектрального состава, так и для приемников любой спектральной чувствительности на том участке спектра, где фильтр нейтрален.

[1] Кроме нейтральных фильтров с постоянной кратностью в фотометрии применяются фотометрические клинья, представляющие нейтральные фильтры с переменной оптической плотностью по длине полосы фильтра.

Разделяющие светофильтры предназначены для запирания той области спектра, излучение которой нежелательно или недопустимо. Так, например, в установках сигнализации инфракрасными излучениями пучок, излучаемый сигнальным прибором, не должен быть виден невооруженным глазом, следовательно, видимые излучения этого пучка лучей должны быть поглощены фильтром. Для отделения инфракрасной области излучения от видимой применяются фильтры типа ИКС[1], спектральные характеристики которых приведены на рис. (2-62). Согласно назначению разделяющие фильтры должны иметь минимальное — близкое к нулю пропускание в зоне поглощения



Рис. 2-63.

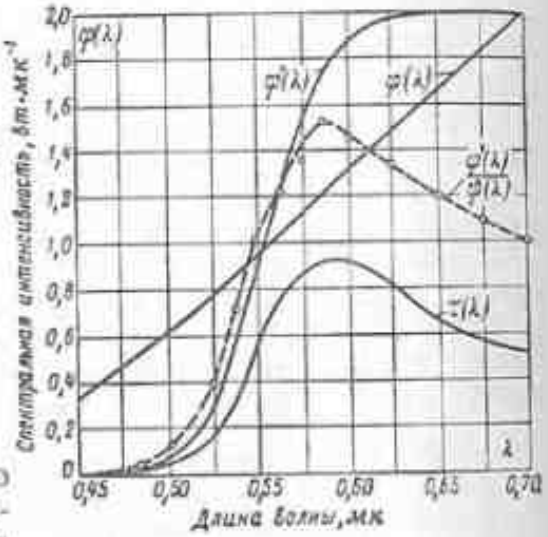


Рис. 2-64.

и максимально возможную прозрачность в зоне пропускания. Ширина полосы перехода от зоны поглощения к зоне пропускания должна быть минимальной (рис. 2-63). Идеальным разделяющим фильтром является фильтр с нулевой шириной переходной полосы, обладающий $\tau(\lambda)=0$ в зоне поглощения и $\tau(\lambda)=1$ в зоне пропускания. Разделяющие фильтры применяются в цветной полиграфии, при фотографировании в инфракрасных лучах, в установках люминесцентного анализа, а также в других установках ультрафиолетового облучения люминофоров и пр. К числу разделяющих фильтров следует также отнести интерференционные *монохроматические фильтры*, по существу представляющие собой интерферометр Фабри — Перо с очень тонким промежуточным слоем, а также фильтры Христиансена и др.

[1] Для поглощения видимого излучения при высоких значениях коэффициента пропускания в области инфракрасного излучения $\lambda \geqslant 0{,}8$ мк применяются стекла с Mn_2O_3, окрашивающим стекла в фиолетово-пурпурный цвет. При введении в шихту стекла до 10—15% марганца разделяющий фильтр толщиной 2 мм пропускает менее 0,05% видимых излучений [Л. 51].

Исправляющие фильтры представляют наибольший интерес для светотехнической практики. Большую группу этих фильтров следует разделить на три подгруппы:

а) фильтры, исправляющие спектральное распределение излучения;

б) фильтры, исправляющие распределение яркости;

в) фильтры, исправляющие цветность излучения.

Фильтры, исправляющие спектр. Исправление спектрального распределения излучения с помощью избирательно ослабляющего фильтра основано на изменении спектрального состава излучения, прошедшего через избирательно поглощающий фильтр. Функцию спектрального коэффициента пропускания фильтра, исправляющего спектр исходного излучения до требуемой формы кривой спектральной интенсивности (рис. 2-64), можно установить из сопоставления требуемой $\varphi'(\lambda)$ и исходной $\varphi(\lambda)$ функций спектральной интенсивности лучистого потока:

$$a\varphi'(\lambda)=\varphi(\lambda)\tau(\lambda). \qquad (2\text{-}128)$$

Коэффициент пропорциональности a можно определить из условий предельно максимального значения $(\tau_\lambda)_{макс}=0{,}92$ с учетом потерь на френелевское отражение при перпендикулярном падении излучения на фильтр:

$$a=0{,}92:\left(\frac{\varphi'_\lambda}{\varphi_\lambda}\right)_{макс},$$

откуда спектральная оптическая характеристика исправляющего фильтра определится как

$$\tau(\lambda)=0{,}92\,\frac{\varphi'(\lambda)}{\varphi(\lambda)}:\left(\frac{\varphi'_\lambda}{\varphi_\lambda}\right)_{макс}. \qquad (2\text{-}128а)$$

Исправляющими фильтрами можно корректировать не только спектральное распределение излучения, но также и спектральную чувствительность приемников лучистой энергии. Для этой цели необходимо выбирать фильтр с такой спектральной функцией $\tau(\lambda)$, которая удовлетворяет условиям, аналогичным (2-128):

$$ag'(\lambda)=\tau(\lambda)g(\lambda), \qquad (2\text{-}129)$$

где $g'(\lambda)$ — требуемая спектральная чувствительность;

$g(\lambda)$ — заданная (исходная) спектральная чувствительность приемника;

a — коэффициент пропорциональности.

Решая (2-129) относительно $\tau(\lambda)$, получим ответ, аналогичный решению (2-128а):

$$\tau(\lambda) = 0{,}92\,\frac{g'(\lambda)}{g(\lambda)} : \left(\frac{g'_\lambda}{g_\lambda}\right)_{\text{макс}}. \qquad (2\text{-}129\text{а})$$

Как можно видеть из (2-128а) и (2-129а), коррекция спектрального распределения излучения, так же как и коррекция спектральной чувствительности приемников с помощью абсорбционных светофильтров, базируется на поглощении излучения фильтром в тех областях спектра, в которых имеются избытки излучения или избыточная чувствительность приемника.

Для изготовления исправляющего фильтра по найденной кривой $\tau(\lambda)$ часто приходится применять несколько красителей различной концентрации или несколько стеклянных фильтров различной толщины с различными спектральными характеристиками. Определение требуемой концентрации красителей или толщины составных стеклянных фильтров можно осуществлять подбором или расчетом. При расчете фильтра существенно важно обеспечить правильную форму кривой $\tau(\lambda)$ рассчитываемого фильтра, определяемую не абсолютными спектральными значениями коэффициента пропускания, а их отношениями $\frac{\tau_1}{\tau_2}$; $\frac{\tau_1}{\tau_3}, \ldots, \frac{\tau_1}{\tau_{n+1}}$ для длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{n+1}$. Заданные отношения коэффициентов пропускания, как известно, можно заменить разностью соответствующих спектральных значений оптической плотности $(D_2 - D_1)$; $(D_3 - D_1)$; …; $(D_{n+1} - D_1)$.

Предполагая в общем виде фильтр состоящим из n компонентов (красителей или отдельных фильтров), напишем выражения спектральных значений оптической плотности для наиболее характерных длин волн:

$$\left.\begin{array}{ll}
\text{для } \lambda_1 & c_1 d_{11} + c_2 d_{21} + \ldots + c_n d_{n1} = D_1; \\
\text{для } \lambda_2 & c_1 d_{12} + c_2 d_{22} + \ldots + c_n d_{n2} = D_2; \\
\quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\
\text{для } \lambda_{n+1} & c_1 d_{1(n+1)} + c_2 d_{2(n+1)} + \ldots + c_n d_{n(n+1)} = D_{n+1},
\end{array}\right\} \qquad (2\text{-}130)$$

где $c_1, c_2, \ldots, c_n$ — неизвестные концентрации каждого красителя или толщины каждого фильтра;

d_{ij} — удельные значения спектральной оптической плотности i-го красителя или частичного фильтра для излучения с длиной волны λ_j;

$D_1, D_2, \ldots, D_{n+1}$ — спектральные значения оптической плотности рассчитываемого фильтра для длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{n+1}$.

Как следует из условия, i изменяется от 1 до n и j — от 1 до $n+1$. Вычитая из всех полученных уравнений первое, получим систему уравнений n-го порядка:

$$\begin{aligned}
&D_2 - D_1 = (d_{12} - d_{11})\,c_1 + (d_{22} - d_{21})\,c_2 + \ldots + (d_{n2} - d_{n1})\,c_n; \\
&D_3 - D_1 = (d_{13} - d_{11})\,c_1 + (d_{23} - d_{21})\,c_2 + \ldots + (d_{n3} - d_{n1})\,c_n; \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&D_{n+1} - D_1 = (d_{1(n+1)} - d_{11})\,c_1 + (d_{2(n+1)} - d_{21})\,c_2 + \ldots + \\
&\qquad + (d_{n(n+1)} - d_{n1})\,c_n.
\end{aligned} \qquad (2\text{-}130\text{а})$$

Корни этой системы уравнений определят искомые c_i-концентрации каждого из n красителей.

В том случае, если исправляющий фильтр состоит из n составляющих фильтров различной толщины и с различными спектральными характеристиками, в расчетном уравнении (2-128а) значения концентраций $c_1, c_2, \ldots, c_n$ следует заменить искомыми значениями толщины составляющих светофильтров $l_1, l_2, \ldots, l_n$.

В виде примера применения фильтра для коррекции спектральной чувствительности приемника рассмотрим выбор кривой $\tau(\lambda)$ фильтра для коррекции спектральной чувствительности селенового фотоэлемента с запирающим слоем под кривую чувствительности среднего глаза. Пользуясь стандартной кривой относительной видности (ОСТ 8485) и кривой спектральной чувствительности селенового фотоэлемента, рассчитаем по (2-129а) спектральную кривую пропускания исправляющего фильтра. Как показывает опыт [Л. 52], такой фильтр можно изготовить из двух красителей в водном растворе желатина: нафтол зеленый Б ($C_{20}H_{12}N_2O_{10}S_2FeNa_2$) и аурофенин О ($C_{20}H_{26}N_4O_3S_2Na_2$). Для приготовления окрашенного желатинового раствора необходимо сделать отдельные растворы красителей и желатина на дистиллированной воде при температуре 70° С в следующих пропорциях:

нафтол зеленый Б	— 0,8	г	на	100	мл воды
аурофенин О	— 0,4	»	»	25	» »
желатин [1]	— 5	»	»	25	» »

Теплые растворы смешиваются в пропорции: 7 мл раствора желатина, 4 мл — нафтола зеленого и 3 мл аурофенина. Для предупреждения загнивания желатина в смесь добавляется одна капля 10%-ного раствора формалина и для сообщения эластичности фильтровой пленки — одна капля глицерина. После тщательного процеживания смесь наливается на чистое стекло (подложка фильтра) из расчета 0,2—0,25 мл на 1 см².

Фильтры, исправляющие распределение яркости, обычно применяются для увеличения контраста яркости между разноцветными поверхностями. Пусть излучения по-

[1] Желатин растворяется в воде после 2—3-часового вымачивания в холодной дистиллированной воде.

верхностей, контраст яркости между которыми должен быть изменен с помощью фильтра, заданы (рис. 2-65) спектральными функциями $b_1(\lambda)$ и $b_2(\lambda)$. Пользуясь кривыми спектральной интенсивности излучения $b_1(\lambda)$ и $b_2(\lambda)$, можно рассчитать контраст лучистой яркости для любого участка спектра от λ_1 до λ_2:

$$k_{\lambda_1,\lambda_2}=\frac{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_1(\lambda)\,d\lambda-\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_2(\lambda)\,d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_2(\lambda)\,d\lambda}. \qquad (2\text{-}131)$$

В частности, для бесконечно узкого участка спектра этот контраст будет:

$$k_\lambda=\frac{b_1(\lambda)-b_2(\lambda)}{b_2(\lambda)}. \qquad (2\text{-}131а)$$

Назвав величину k_λ *спектральным контрастом яркости*, построим график его изменения в пределах всего видимого участка спектра (рис. 2-65). Как можно видеть из хода этой кривой на некотором участке спектра от λ' до λ'', спектральный контраст яркости превышает значения суммарного контраста, рассчитанного по (2-131) при подстановке $\lambda_1=0{,}38$ *мк* и $\lambda_2=0{,}77$ *мк*. Участок спектра от λ' до λ'' является полезным с точки зрения поставленной задачи увеличения контраста яркости. Выбрав такой фильтр, у которого значения $\tau_\lambda=1$ на всем полезном участке спектра и $\tau_\lambda=0$ на остальных участках спектра с длинами волн $\lambda<\lambda'$ и $\lambda>\lambda''$, получим увеличение контраста яркости по сравнению с суммарным значением контраста. Это увеличение контраста будет расти по мере сокращения полезной полосы спектра до бесконечно узкой полоски в зоне максимума функции $k(\lambda)$. Наряду с ростом контраста яркости сужение полосы пропускания фильтра будет снижать яркость сопоставляемых поверхностей, так как уменьшению ширины полосы пропускания фильтра обязательно соответствует уменьшение его коэффициента пропускания. Предел целесообразного сжатия полосы пропускания контрастного фильтра должен выбираться по максимуму видимости (заметности) наблюдаемого предмета.

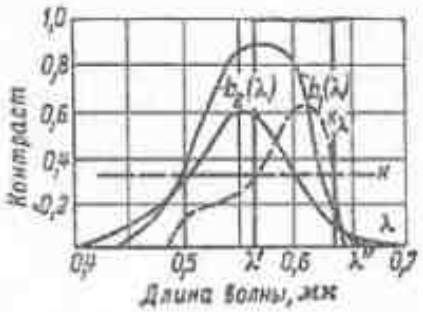


Рис. 2-65.

Применение контрастных фильтров возможно в практике черно-белой фотографии и черно-белого телевидения, когда встречается необходимость увеличения различия изображения разноцветных излучений примерно одинаковой яркости. Характерным примером может служить желтый фильтр, повышающий контраст яркости между изображением голубого неба и белых облаков в черно-белой фотографии.

Фильтры, исправляющие цветность. Одним из требований, предъявляемых к фильтрам, исправляющим цветность, является максимально большое значение интегрального

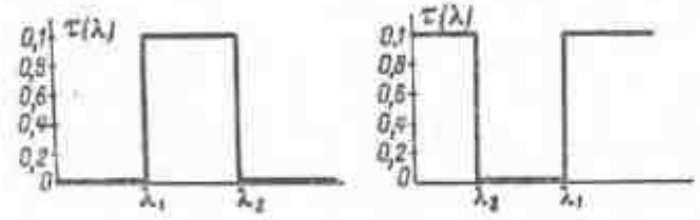


Рис. 2-66.

коэффициента пропускания. Это требование обеспечивает не только максимальную энергетическую эффективность преобразования излучения, но также расширяет цветовой охват (§ 2-16) системы субтрактивного воспроизведения цвета. Фильтры, обладающие теоретически предельными значениями τ, принято называть *оптимальными фильтрами*. Такие фильтры характеризуются предельно максимальными значениями $\tau_\lambda=1$ в полосах пропускания и предельно минимальными значениями $\tau_\lambda=0$ в полосах поглощения (рис 2-66).

Оптимальные фильтры могут быть двух типов: с одной и двумя полосами пропускания. Для исследования возможности охвата всего поля цветностей оптимальными фильтрами, через которые проходит белое излучение со сплошным спектром, рассмотрим принцип расчета расположения полос пропускания оптимальных фильтров. Координаты цвета излучения, прошедшего через оптимальный фильтр, определяются (2-101а):

$$\left.\begin{aligned} x'&=\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi_\lambda(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda;\\ y'&=\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi_\lambda(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda;\\ z'&=\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi_\lambda(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}132)$$

и интегральный коэффициент пропускания фильтра как

$$\tau = \frac{\int_{0,77}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}{\int_{0,38}^{\lambda_1} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}. \qquad (2\text{-}133)$$

Для определения границ полосы пропускания фильтра, обеспечивающего заданную цветность, введем три монотонные интегральные функции:

$$x(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \varphi_0(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \qquad \eta(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \varphi_0(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda$$

и

$$\xi(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \varphi_0(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda$$

и их сумму:

$$\sigma(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \varphi_0(\lambda)\,[\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)]\,d\lambda.$$

Для равноинтенсивного белого исходного цвета эти интегральные функции примут более простое выражение:

$$x(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \quad \eta(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \quad \xi(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} \bar{z}(\lambda)\,d\lambda$$

и

$$\sigma(\lambda) = \int_{0,38}^{\lambda} [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)]\,d\lambda.$$

Для белого цвета равноинтенсивного излучения имеем:

$$x_{\lambda=0,77} = \eta_{\lambda=0,77} = \xi_{\lambda=0,77} = \frac{1}{3}\sigma_{\lambda=0,77},$$

так как координаты цветности этого излучения равны:

$$x_0 = y_0 = z_0 = \frac{1}{3}.$$

Координаты цвета и цветности излучения, прошедшего через фильтр первого типа, определяются как

$$\left.\begin{aligned} &x' = x(\lambda_2) - x(\lambda_1), \quad y' = \eta(\lambda_2) - \eta(\lambda_1) \quad \text{и} \quad z' = \xi(\lambda_2) - \xi(\lambda_1); \\ &x = \frac{x(\lambda_2) - x(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2) - \sigma(\lambda_1)}; \quad y = \frac{\eta(\lambda_2) - \eta(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2) - \sigma(\lambda_1)} \quad \text{и} \quad z = \frac{\xi(\lambda_2) - \xi(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2) - \sigma(\lambda_1)} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}134)$$

и для фильтра второго типа:

$$\left.\begin{aligned} &x' = x_{\lambda=0,77} - x(\lambda_1) + x(\lambda_2); \qquad y' = \eta_{\lambda=0,77} - \eta(\lambda_1) + \eta(\lambda_2) \\ &\qquad \text{и } z' = \xi_{\lambda=0,77} - \xi(\lambda_1) + \xi(\lambda_2); \\ &x = \frac{x_{\lambda=0,77} - x(\lambda_1) + x(\lambda_2)}{\sigma_{\lambda=0,77} - \sigma(\lambda_1) + \sigma(\lambda_2)}; \qquad y = \frac{\eta_{\lambda=0,77} - \eta(\lambda_1) + \eta(\lambda_2)}{\sigma_{\lambda=0,77} - \sigma(\lambda_1) + \sigma(\lambda_2)} \\ &\qquad \text{и } z = \frac{\xi_{\lambda=0,77} - \xi(\lambda_1) + \xi(\lambda_2)}{\sigma_{\lambda=0,77} - \sigma(\lambda_1) + \sigma(\lambda_2)}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}134\text{а})$$

Располагая функциями $x(\lambda)$, $\eta(\lambda)$, $\xi(\lambda)$ и $\sigma(\lambda)$, можно рассчитать координаты цветности излучений, прошедших через оптимальный фильтр с постоянной начальной границей полосы пропускания $\lambda_1 = \text{const}$ и перемещающейся второй границей $\lambda_2 = \text{var}$. Соединяя точки с $\lambda_1 = \text{const}$ и $\lambda_2 = \text{const}$, нанесенные на диаграмму цветности, получим кривые цветности излучений, прошедших через оптимальные фильтры с постоянными границами начальной $\lambda_1 = \text{const}$ и конечной $\lambda_2 = \text{const}$ (рис. 2-67, *а* и *б*). Эти кривые подтверждают предположение о возможности с помощью одного оптимального фильтра воспроизвести из белого цвета любой цвет при свободном выборе границ областей пропускания фильтра.

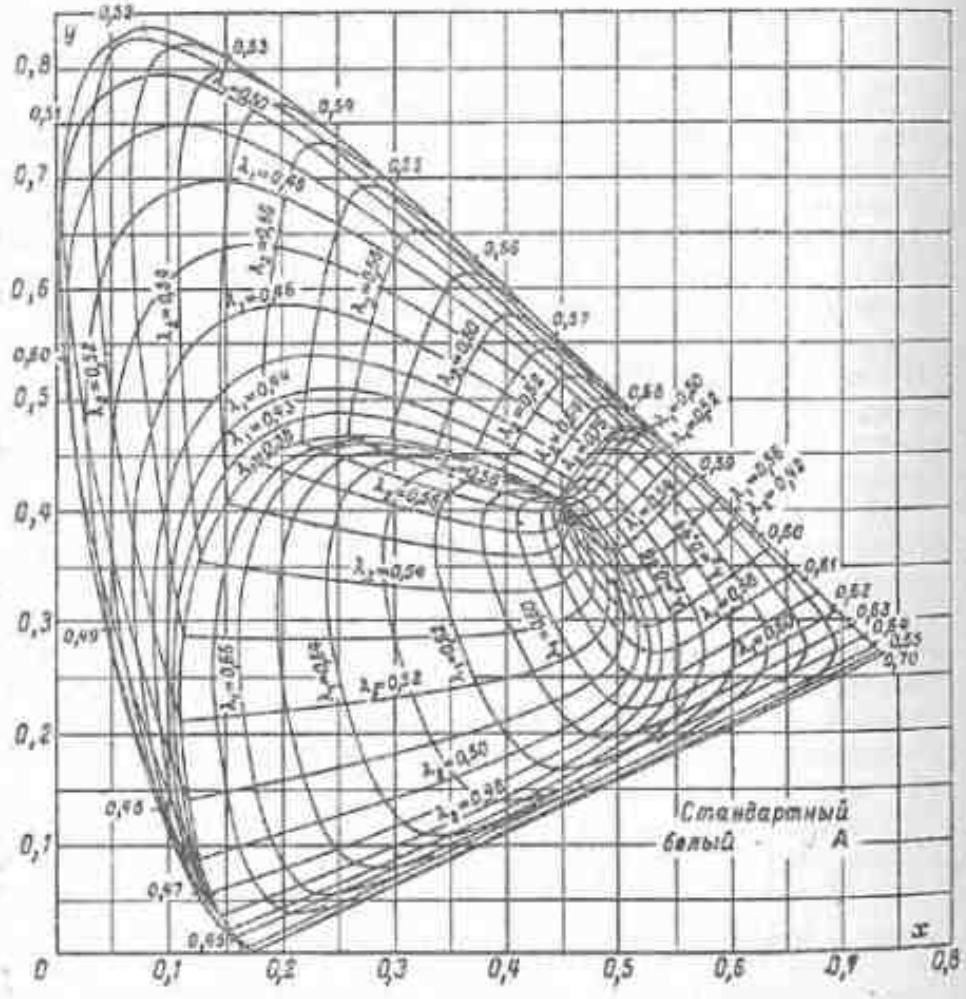
С помощью этих кривых очень легко найти границы полосы пропускания фильтров по заданным координатам цветности, следовательно, определить характеристики оптимального фильтра. Как можно видеть (рис. 2-67, *а* и *б*), формы изолиний границ полос пропускания в значительной мере определяются исходным белым, в особенности для цветов малой частоты, для которых ширина полосы пропускания значительна, следовательно, роль спектрального распределения излучения достаточно велика. Для анализа энергетической характеристики оптимального фильтра рассмотрим сечение тела цветового охвата системы воспроизведения цветов оптимальными фильтрами (рис. 2-68). Такое сечение осуществим плоскостью, проходящей через вектор воспроизводимого цвета $\vec{\Phi}_c$ и вектор исходного белого цвета $\vec{\Phi}_0$. Вследствие того, что цвет $\vec{\Phi}_a$ поглощенного фильтром излучения будет

дополнительным к воспроизводимому цвету, направление и величину его вектора определим векторной разностью (рис. 2-68а):

$$\vec{\Phi}_a = \vec{\Phi}_c - \vec{\Phi}_s.$$

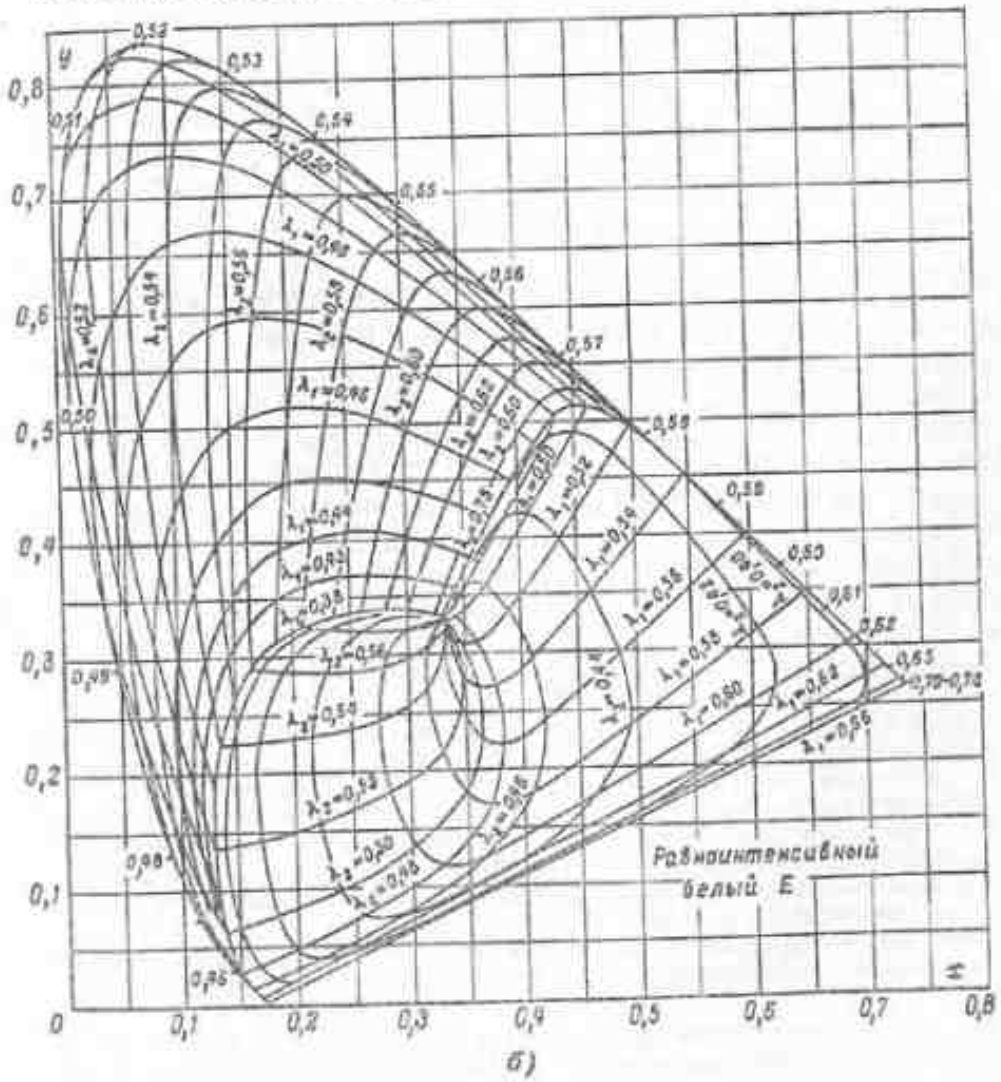
На диаграмме цветности эти цвета обозначены точками s и a (рис. 2-68,*б*). Сделаем предположение о наличии такого фильтра, который, обеспечивая заданную цветность воспроизводимого цвета, обладает большим коэффициентом пропускания. Вектор цвета излучения, прошедшего через такой фильтр, имея прежнее заданное направление, будет обладать большей величиной. Согласно правилу векторного суммирования цвет поглощенного новым фильтром излучения $\vec{\Phi}'_a$ изменится не только по величине, но и по цветности.

Как можно видеть из векторной диаграммы, увеличению вектора цвета, прошедшего через фильтр, должно обязательно



а)

соответствовать повышение чистоты цвета, поглощенного фильтром. Рассмотрим реальность этого условия, исследуя для этой цели спектральную характеристику нового фильтра. Возможные изменения спектральной характеристики фильтра, обеспечивающие постоянство цветности прошедшего через фильтр излучения, заключаются в некотором размытии границ полосы пропускания оптимального фильтра в пределах от λ'_1 до λ''_1 и от λ'_2 до λ''_2 (рис. 2-68,*б* и *в*). Как можно видеть из спектральной кривой пропускания нового фильтра (пунктирная кривая), ширина его полосы поглощения расширяется за счет некоторого уменьшения коэффициента пропускания нового фильтра в пределах полосы пропускания оптимального фильтра (рис. 2-68, *б* и *в*). Расширению полосы поглощения должно соответствовать уменьшение чистоты цвета поглощенного излучения или ее постоянство, но никак не



б)

Рис. 2-67.

увеличение. Это предположение можно полностью подтвердить рассмотрением смещения на диаграмме цветности (рис. 2-68, *б*) центра тяжести цвета, поглощенного фильтром. Вследствие того, что излучение, поглощенное новым фильтром, будет частично ослаблено на участках спектра от λ_1 до λ_1' и от λ_2 до λ_2' и усилено на участках от λ_1 до λ_1'' и от λ_2'' до λ_2, более удаленных от центра тяжести цвета α-поглощенного излучения, смещение центра тяжести возможно лишь по направлению к белому, а не наоборот. Из этого следует, что оптимальный фильтр с нулевой

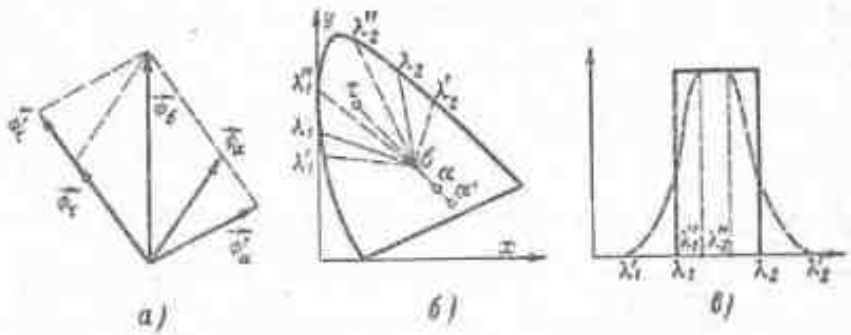


Рис. 2-68.

шириной переходных полос обладает максимальным коэффициентом пропускания, определяющим яркость воспроизводимого цвета. Для характеристики изменения яркости цвета, прошедшего через оптимальные фильтры, на диаграмме цветности (рис. 2-69) нанесены кривые разных значений коэффициентов пропускания равноинтенсивного исходного излучения. Из этой диаграммы отчетливо видно уменьшение коэффициента пропускания фильтра по мере повышения чистоты воспроизводимого цвета, что объясняется сужением полосы пропускания. Все изложенное относительно оптимальных фильтров в полной мере относится и к оптимальным краскам с заменой во всех случаях рассуждения коэффициента пропускания фильтра на коэффициент отражения краски.

Абсорбционные светофильтры, имеющие наиболее широкое применение, могут быть твердыми, жидкостными и газообразными. Благодаря неудобству пользования газообразные светофильтры применяются очень редко[1]. Жидкостные светофильтры выполняются в виде плоско-параллельных кювет, заполняемых раствором красителя требуемой концентрации. В жидкостных светофильтрах часто применяют смесь растворов различных красителей. В тех случаях, когда светофильтр применяется для видимых излучений, кювета изготовляется из стекла.

Наибольшее распространение получили твердые светофильтры, выполняемые из окрашенных стекол или желатиновых и целлофановых пленок.

[1] Газообразные светофильтры (пары Cl и Br) применяются в качестве разделяющих коротковолновые ультрафиолетовые излучения $\lambda \leqslant 0{,}3$ *мк* от длинноволновых $\lambda > 0{,}3$ *мк*.

Окрашивание стекол, применяемых в качестве светофильтров, может быть молекулярным или коллоидным [Л. 53]. При молекулярном окрашивании стекол молекулы красителя равномерно распределяются в массе стекла, которую следует рассматривать как истинный раствор красителя. Коллоидное окрашивание стекол отличается тем, что молекулы красителя соединяются в группы кристаллического строения — микрокристаллы. В этом случае

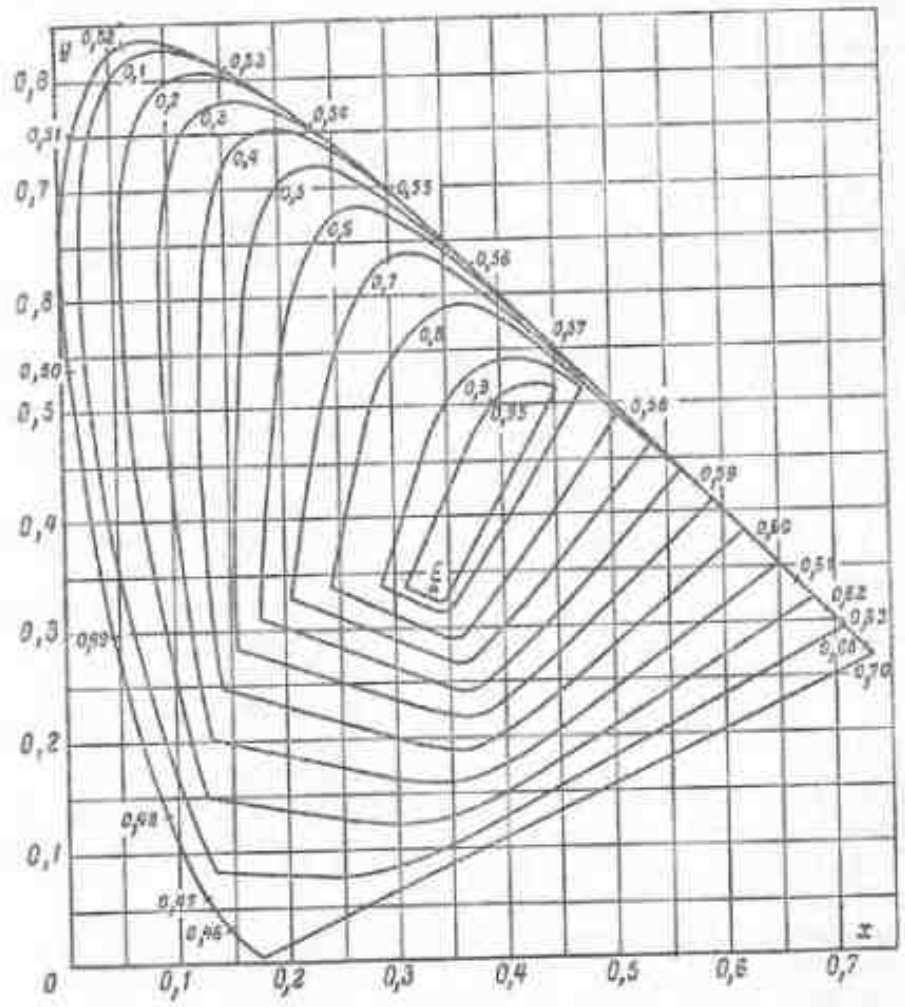


Рис. 2-69.

стекло представляет собой коллоидный раствор красителя. В молекулярном окрашивании в качестве красителей применяют окислы металлов (железа, кобальта, марганца, меди, никеля, титана, урана и др.), окислы редкоземельных элементов (церия, празеодима и неодима), а также некоторые металлоиды (серу, селен и др.). Красителями в коллоидном крашении стекол бывают металлы (золото, кадмий, медь, серебро), сурьма, а также сульфиды.

Для окраски желатиновых и целлофановых пленок обычно применяют анилиновые красители, обладающие большим разнообразием спектральных характеристик [Л. 54, 55].

2-19. Цвет в световой сигнализации

Цветовые сигналы. В световой сигнализации, применяемой на всех видах транспорта, широко используются в качестве условных знаков *цветовые сигналы*. Наиболее широко используемыми в сигнализационной технике являются цвета: красный, зеленый, желтый, синий и белый. Для воспроизведения этих цветов применяются цветовые светофильтры в виде плоских стекол и линз, а также фигурные дутые стекла. Основным требованием, предъявляемым к таким светофильтрам, используемым в сигнализации, является безошибочная опознаваемость сигналов. В особенности должны быть наиболее различны по ощущению цветности красный и зеленый сигналы, запрещающий и разрешающий движение в дорожной сигнализации. Для обеспечения этих свойств цветовых сигналов на основе международного соглашения установлены пределы допустимых значений их цветности. Эти пределы регламентируются координатами цветности четырех угловых точек (табл. 17), ограничивающих поле допустимых значений цветности каждого фильтра [Л. 56, 57].

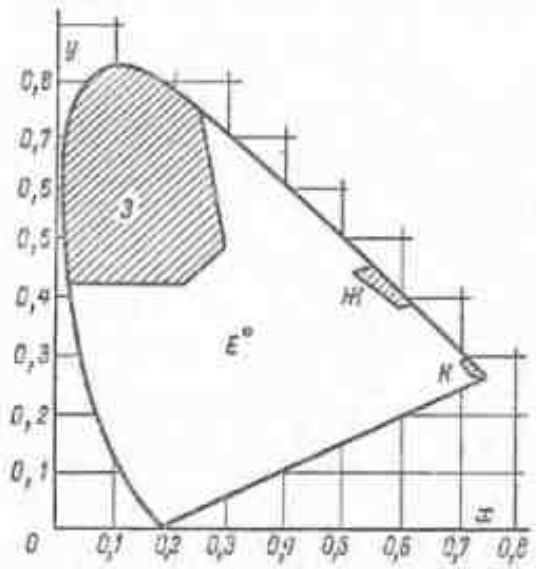


Рис. 2-70.

Опознаваемость цветовых сигналов. Поле допустимых значений цветности дорожных сигнальных огней изображено на диаграмме цветности x, y (рис. 2-70). Из этой диаграммы можно видеть, что допустимые различия цветности достаточно значительны, за исключением красного сигнала, вероятность опознавания которого должна быть особенно высокой вследствие того, что этот сигнал запрещающий. Значительные допуски отклонения цветности следует объяснить большим различием колориметрических характеристик исходного белого цвета, применяемого в сигнальных установках[1], а также достаточно высокой опознаваемостью цветовых сигналов.

Таблица 17

Пределы допустимых цветностей сигналов

Тип светофильтра	Координаты цветности							
	x	y	x	y	x	y	x	y
Красный . .	0,735	0,265	0,705	0,295	0,700	0,295	0,725	0,267
Зеленый . .	0,241	0,746	0,022	0,420	0,240	0,420	0,300	0,490
Желтый . .	0,610	0,390	0,545	0,455	0,527	0,442	0,595	0,390
Синий . . .	0,091	0,133	0,144	0,03	0,165	0,065	0,160	0,190
Белый . . .	0,425	0,375	0,425	0,465	0,300	0,330	0,300	0,300

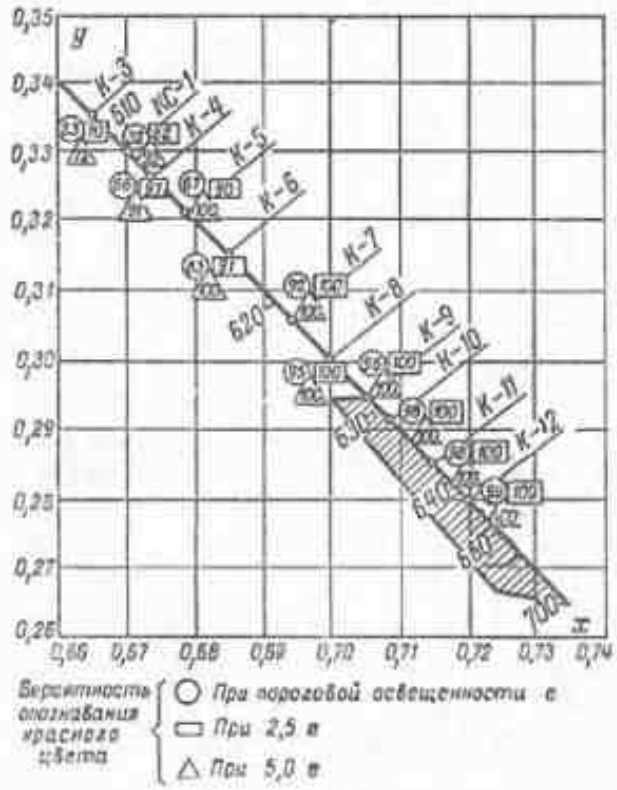


Рис. 2-71.

Для характеристики опознаваемости цветовых сигналов приведем результаты исследования, проведенного во Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта [Л. 58]. Исследованию были подвергнуты желтые, красные, зеленые и синие светофильтры по 10—11 различных светофильтров каждого цвета. В исследовании принимали участие 34 наблюдателя. Сигналы передавались с интервалом 55—56 *сек* сериями по 10—16 сигналов с перерывами между сериями 5 *мин*. Длительность каждого сигнала была установлена 4—5 *сек*. Исследования производились при пороговых значениях освещенности на зрачке наблюдателя, а также при увеличении освещенности на зрачке в 2,5 раза и 5 раз. В качестве пороговых значений освещенности зрачка наблюдателя были приняты для красного $e_к = 6 \cdot 10^{-4}$ *лк*, для зеленого $e_з = 9 \cdot 10^{-4}$ *лк*, для желтого $e_ж =$

[1] Источники света, применяемые в световой сигнализации, имеют цветовую температуру излучения от 1 900° К (керосиновые фонари) до 2 600° К (электрические лампы накаливания).

$=12\cdot10^{-4}$ *лк* и синего $e_c=8\cdot10^{-4}$ *лк*. Результаты исследования, приведенные на диаграмме цветности (рис. 2-71), показывают достаточно высокую вероятность опознавания цвета, достигающую для красного сигнала при пороговом уровне освещенности не менее 0,96 с повышением ее до 1,0 при увеличении освещенности зрачка сверх пороговой величины.

2-20. Цвет в кинематографии

Цвето-фотографические материалы. В основе современной цветной кинематографии, так же как и цветной фотографии, лежит применение трехслойных фотографических материалов. Трехслойные фотографические материалы применяются для получения как позитивных, так и негативных изображений. Фотохимические принципы образования на трехслойной пленке негативных и позитивных изображений основаны, так же как и в черно-белой фотографии (ч. 1, § 3-17), на процессах взаимодействия фотонов с кристаллами галоидного серебра и сенсибилизаторов. При изготовлении цветной пленки как негативной, так и позитивной, в фотоэмульсию добавляются особые бесцветные вещества (компоненты красителя), превращающиеся в красители в процессе проявления скрытого изображения. Окрашивание каждого слоя кинопленки происходит в результате действия продуктов окисления проявляющего вещества на компоненты красителя. Компоненты красителей, вводимые в фотоэмульсионные слои пленок и цветной фотобумаги, различны для разных слоев. Первый (внешний) слой содержит компонент, преобразующийся в желтый краситель, второй (средний) — пурпурный и третий (внутренний) — голубой.

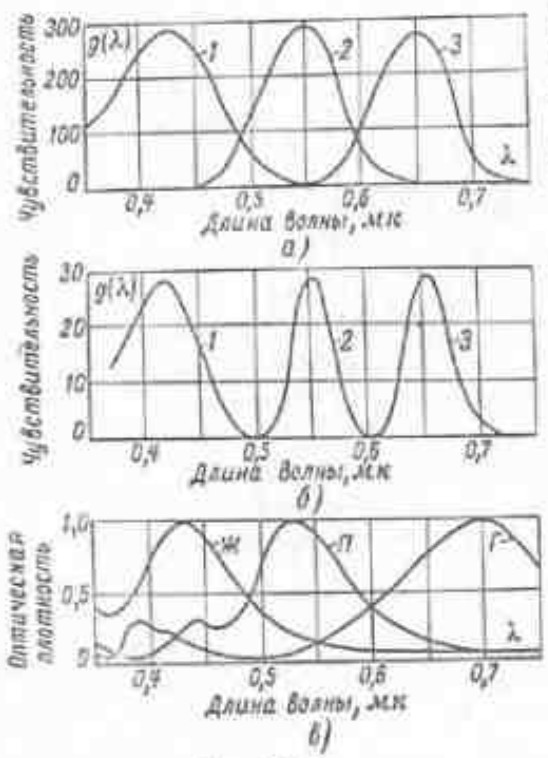


Рис. 2-72.
а—негатив; б—позитив; в—красители.

Спектральная чувствительность каждого слоя также неодинакова. Каждый слой пленки очувствляется к тому участку спектра, который является дополнительным к спектру пропускания излучения красителем этого слоя. Следовательно, каждый эмульсионный слой пленки чувствителен к тому участку спектра излучения, на котором краситель этого слоя поглощает излучения. На рис. 2-72 приведены кривые спектральной чувствительности негативной (2-72а) и позитивной (2-72б) пленок, а также спектральной оптической плотности красителей каждого их слоя. Из этих кривых можно видеть [Л. 59], что внешний слой пленки *1* чувствителен к коротковолновой (синей) части спектра, средний слой *2*—к средней (зеленой) части и внутренний *3*—к длинноволновой (красной) части спектра. Сопоставление спектральных кривых чувствительности слоя и поглощательной способности его красителя показывает, что их максимумы практически совпадают как для позитивных, так и для негативных пленок. Отличительной особенностью негативных пленок является перекрытие спектральных зон чувствительности смежных слоев (рис. 2-72,*а*). Зоны чувствительности слоев позитивной пленки

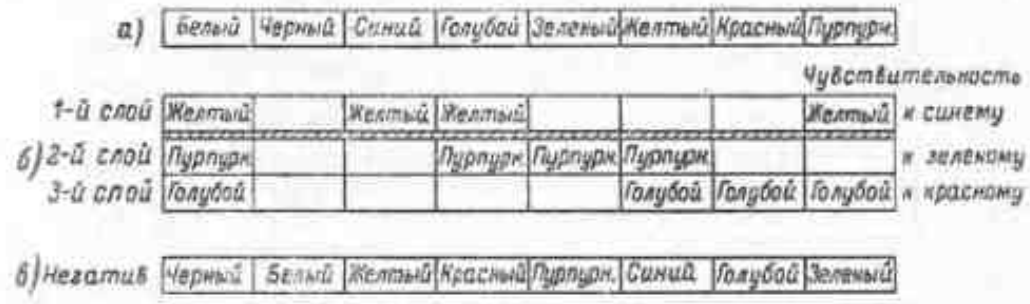


Рис. 2-73.

(рис. 2-72,*б*) значительно уже и не прекрывают друг друга. Это отличие сенсибилизации отдельных слоев позитивной и негативной пленок определяется различием их функций. В то время как позитивная пленка должна реагировать на все спектральное и цветовое многообразие внешнего мира, эмульсионные слои позитивной пленки должны обладать чувствительностью к тем зонам спектра, в которых преимущественно поглощают красители соответствующих слоев негативной пленки. Следовательно, позитивная пленка должна реагировать лишь на спектрозональное разнообразие излучения, проходящего через негатив.

Наряду с этим следует указать, что раздельность зон спектральной чувствительности слоев позитивной пленки создает более благоприятные условия изолированного регулирования концентрации красителя в каждом слое позитива, что существенно важно в градационном процессе фотографического воспроизведения цвета.

Процесс образования цветного изображения на негативной и позитивной пленках представлен на схемах (рис. 2-73 и 2-74). На этих схемах [Л. 60, 61] показано, что между внешним и средним слоями негативных и позитивных пленок расположен желтый фильтровый слой, предназначенный для поглощения синих излучений, не поглощенных внешним слоем. Необходимость по-

глощения синих лучей объясняется тем, что второй и третий слои пленок обладают чувствительностью не только к зеленой и красной зонам спектра, но также и к синей зоне, чувствительность к которой свойственна природе галоидно-серебряных соединений (ч. I, § 3-17).

На схеме образования цветного негативного изображения (рис. 2-73) показан восьмицветный оригинал. Белое излучение первого поля оригинала, действуя на все три слоя пленки, вызовет в них образование красителей: желтого — во внешнем, пурпурного — во втором и голубого — в третьем (внутреннем) слоях. Второе поле оригинала — черное не окажет никакого дейст-

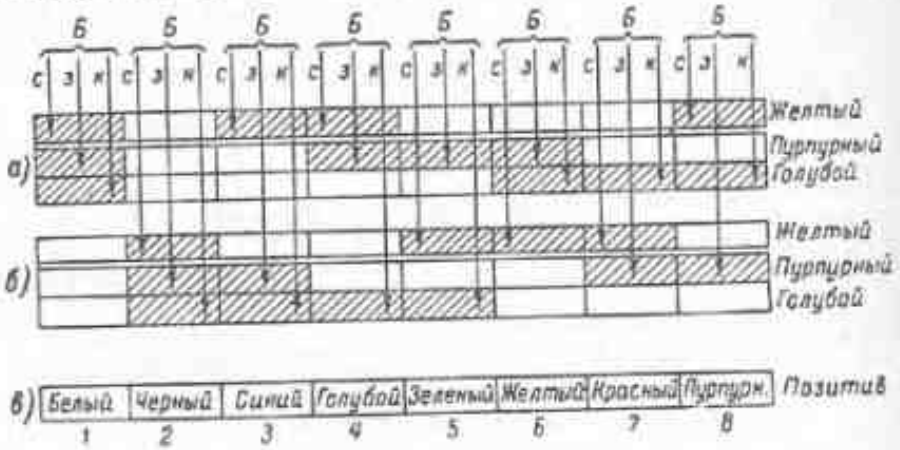


Рис. 2-74.

вия ни на один из слоев негативной пленки. Синее поле оригинала подействует на первый слой, окрасив его в желтый цвет. Голубое излучение четвертого поля, расположенное в синей и зеленой частях спектра, зафиксируется во внешнем и среднем слоях и т. д. В результате проявления в каждом слое, на тех участках, на которые упали эффективные для данного слоя компоненты излучения, образуется металлическое серебро и соответствующий краситель. Вследствие того, что металлическое серебро обладает значительно большей кроющей способностью, чем краситель[1], окраска слоя становится заметной лишь после отбеливания и фиксирования негатива. В процессе отбеливания и фиксирования металлическое серебро удаляется из всех трех эмульсионных слоев, так же как и желтый краситель фильтра между первым и вторым слоями, после чего их оптическая плотность определяется исключительно концентрацией красителей. Просвечивая белым светом отбеленный и отфиксированный негатив (рис. 2-73,*в*), сопоставим цветности его полей с цветностью

[1] Фотоэмульсионные красители должны обладать очень высокой прозрачностью.

полей оригинала. Как и следует ожидать от негативного изображения, любому цвету оригинала будет соответствовать дополнительный цвет негатива: белому — черный, синему — желтый, голубому — красный, зеленому — пурпурный и т. д.

Позитивное изображение получается путем фотографической печати с цветного негатива на позитивную пленку или фотобумагу. При большом числе позитивных копий негатив изнашивается, что недопустимо вследствие большой материальной ценности негатива. Для сохранения негатива-оригинала с него снимают копии — *контратипы*.

Схема печати цветного позитива (рис. 2-74) показывает, что белый цвет падающего на контратип (негатив) излучения, преобразуется по субтрактивной схеме, путем вычитания из него цветов излучений, поглощаемых тремя слоями цветного негатива. Так, например, через первое поле негатива белое излучение не пройдет вследствие того, что синяя составляющая будет поглощена желтой краской первого слоя, зеленая составляющая — пурпурной краской второго слоя и красная составляющая — голубой краской третьего слоя (рис. 2-74,*а* и *б*). Второе поле негатива прозрачно, так как ни один из трех слоев негатива в этом месте не содержит красителей. Все три составляющие белого цвета, пройдя через негатив, будут поглощены соответствующими слоями позитивной пленки: синяя — первым, зеленая — вторым и красная — третьим. В результате такого поглощения и последующего проявления первый слой окрасится в желтый цвет, второй — в пурпурный и третий — в голубой, следовательно, позитив на втором поле будет непрозрачен (черный цвет). Желтая окраска третьего поля негатива пропускает зеленую и красную составляющие белого цвета, которые взаимодействуют с эмульсией второго (зеленоощущающего) и третьего (красноощущающего) слоев, образуя на третьем поле позитива синий цвет как результат субтрактивного смешения пурпурного и голубого цветов второго и третьего слоев позитива. Желтый и пурпурный фильтры первого и второго слоев четвертого поля негатива пропустят лишь красную составляющую, которая и приведет в результате взаимодействия с третьим слоем позитива к голубой окраске и т. д.

Проявленный и закрепленный после печати позитив, при освещении его белым излучение, будет иметь цвета, соответствующие оригиналу (рис. 2-73,*а* и 2-74,*в*). Наличие спектральных характеристик красителей, применяемых в цветной позитивной пленке (рис. 2-72,*в*), позволяет рассчитать цветность любой комбинации концентраций красителей каждого слоя пленки, следовательно, определить все поле цветностей, воспроизводимых современной позитивной пленкой (рис. 2-75). Как можно видеть из диаграммы [Л. 62], многие цветности не воспроизводимы цветной многослойной кинопленкой. Эти дефекты передачи цве-

та на киноэкране могут усугубляться из-за недостаточно высокого качества цвето-фотографического материала, а также вследствие возможности возникновения дополнительных погрешностей на отдельных этапах съемки, изготовления и показа цветного фильма.

Сенситометрия цвето-фотографических материалов. Для анализа возможностей устранения этих причин, а также выбора способов коррекции цветовоспроизведения в процессе изготовления и проецирования цветного фильма необходимо ознакомиться с цвето-фотографическими свойствами цветных фотоматериалов. Так же как и в сенситометрии[1] черно-белых фотографических материалов, цветофотографические многослойные материалы оцениваются по интегральным и спектральным или спектрозональным (цветоделительным) характеристикам [Л. 63, 64]. Наличие трех цветоделенных изображений в трех слоях цвето-фотографического материала усложняет методы их сенситометрии, требуя индивидуальной характеристики для каждого светочувствительного слоя.

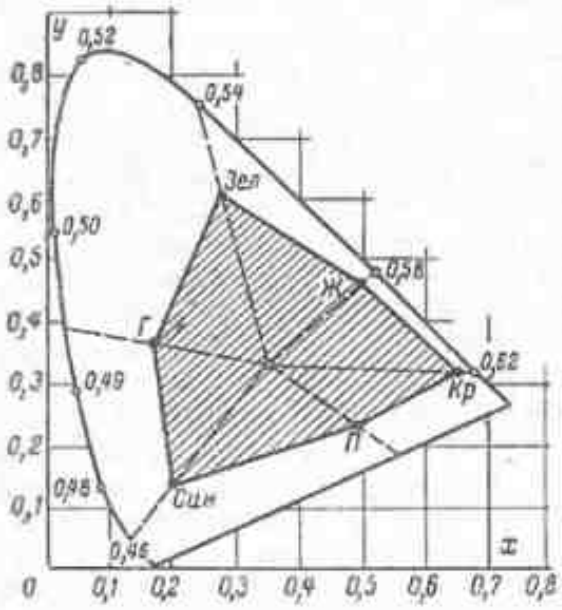


Рис. 2-75.

Как уже было показано (§ 2-16), однозначной характеристикой цвета, субтрактивно преобразованного из исходного белого, могут служить поверхностные концентрации красителей всех трех фильтров субтрактивного преобразования. Для полной характеристики цвето-фотографического материала этим методом необходимо знать зависимость концентрации красителей в каждом слое пленки не только от количества освещения, но и от спектрального состава излучения, падающего на многослойную пленку.

Как показывает опыт производства цветных кинофильмов, для текущего контроля всех стадий технологического процесса можно ограничиться исследованием зависимости оптических

[1] Сенситометрия — учение об установлении связей количества освещения и его спектрального состава, действующего на фотоэмульсию, с фотографическим эффектом и о методах измерения фотографических свойств светочувствительных материалов. Основные понятия и величины фотографической сенситометрии определены ГОСТ 2653-44.

плотностей или концентрации красителя в каждом слое лишь для одного спектрального состава излучения. В качестве такого исходного излучения принимают белое со сплошным спектром и цветовой температурой $T_ц = 5\,000°$ К (средний дневной) — для пленок ДС и $T_ц = 3\,200°$ К (лампы накаливания) — для пленок ЛН. Таким образом, критерием количественной (градационной) характеристики цвето-фотографического материала могут служить три характеристические кривые, изображающие зависимость поверхностной концентрации красителя в каждом слое от логарифма количества освещения, падающего на исследуемую фотоэмульсию (рис. 2-76,*а*). Поверхностную концентрацию красителя в каждом слое пленки можно заменить *эффективной оптической плотностью* этого слоя, оцениваемой величиной, обратной уровню реакции того приемника, который предназначен для оценки излучения, прошедшего через пленку в полосе пропускания исследуемого слоя.

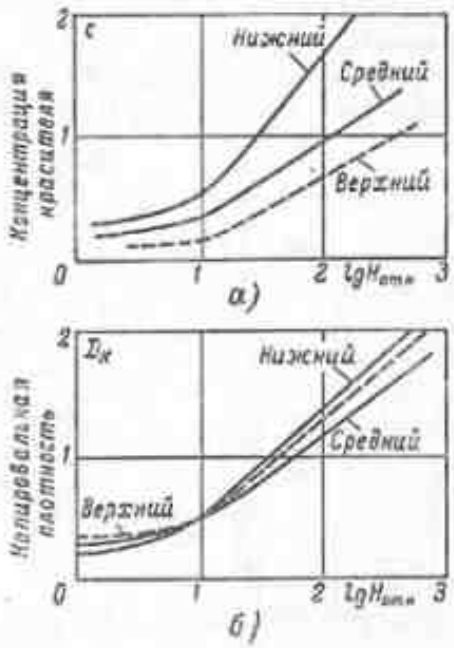


Рис. 2-76.

Исходя из этого определения, эффективная плотность каждого слоя негативной пленки должна оцениваться с учетом спектральной чувствительности соответствующего слоя позитивной пленки. Следовательно, эффективная плотность первого слоя негативной пленки должна оцениваться величиной, обратной эффективному потоку для первого слоя позитивной пленки, и т. д. Эффективную плотность слоев негативной пленки принято называть *копировальной плотностью*. На рис. 2-76,*б* приведены характеристические кривые негативной пленки в виде графиков $D_к = f(El)$. Эффективная плотность слоев позитивной пленки оценивается по спектральной чувствительности *кзс*-рецепторов глаза человека, вследствие чего она получила название *визуальной плотности*.

Характеристические кривые всех трех слоев цвето-фотографических материалов определяются для ахроматической (серой) шкалы яркости. В качестве единиц эквивалентной серой шкалы эффективных плотностей каждого слоя приняты оптические плотности (концентрации) трех красителей, обеспечивающие серый цвет суммарной оптической плотностью всех трех слоев, равной единице. Так, например единица ВЭСП (*визуально-эквивалент-*

нал серая плотность) для каждого слоя определяет такую концентрацию красителя исследуемого слоя, которая с двумя другими красящими веществами позитивной пленки, взятыми в соответствующих концентрациях, обеспечит визуально серое излучение при общей оптической плотности позитива, равной единице [Л. 65].

Измерение визуально-эквивалентных значений серой плотности позитива осуществляется зрительным субтрактивным колориметром (рис. 2-77) с тремя цветными клиньями из тех же красителей, которые применяются в исследуемом цвето-фотографическом материале. Такой колориметр принято называть *цветовым денситометром.*

Измеряемый образец позитива *1* (рис. 2-77) помещается в правый пучок колориметра и уравновешивается тремя клинья-

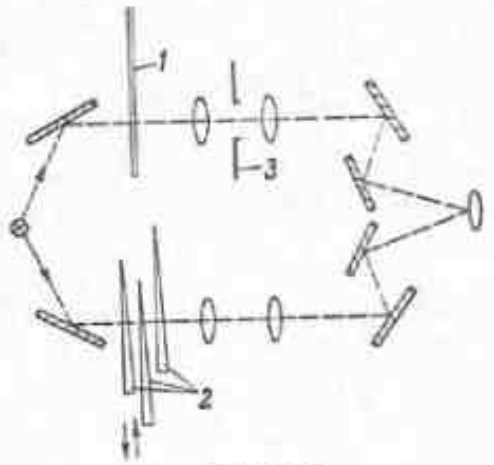


Рис. 2-77.

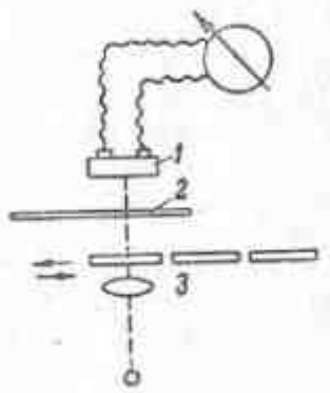


Рис. 2-78.

ми *2*, расположенными в левом пучке прибора. Каждому колориметрируемому цвету соответствует одно вполне определенное положение трех клиньев. Градуировка колориметра производится с помощью серых фильтров, помещаемых в левом пучке, или с помощью диафрагмы *3*.

Характеристические кривые позитивной пленки получаются в результате измерения визуально-эквивалентных серых плотностей ее полей, получивших различные значения *Et* от образцового источника света. Характеристические кривые негативной пленки *2* исследуются аналогично, но приемником при измерении служит фотоэлемент *1* с тремя сменными фильтрами *3*, исправляющими его чувствительность до чувствительности трех слоев позитивной пленки (рис. 2-78).

Три характеристические кривые каждого слоя цветной пленки, построенные в одной системе координат, позволяют оценить ее качество и наметить приемы исправления некоторых несущественных ее недостатков. В том случае, когда все три кривые

совпадают в рабочей части (рис. 2-79,*а*), серый оригинал, характеризуемый равными значениями эффективных компонентов излучения, будет воспроизводиться без искажения цветности — серым [1]. Такое сочетание характеристических кривых соответствует *балансу чувствительности элементарных слоев* цвето-фотографического материала.

При хорошем совпадении характеристических кривых в рабочей части, как правило, кривые не балансированы в зонах недодержки и передержки. Отсутствие баланса в этих зонах характеристических кривых может привести к искажению цветопередачи в глубоких тенях или на участке максимальной ярко-

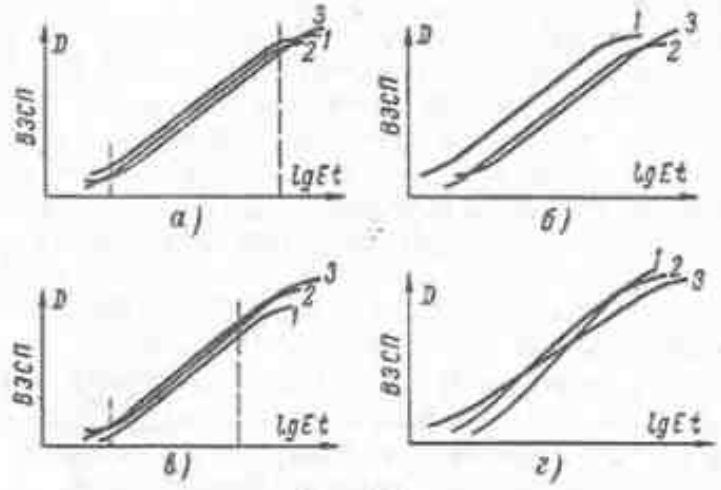


Рис. 2-79.

сти оригинала с большими контрастами яркости, а также при неправильном выборе экспозиции или при недостаточной фотографической широте исследуемого материала.

Копировальные фильтры и корригирующие маски. При разбалансе слоев по чувствительности (рис. 2-79,*б*) возможна коррекция цветопередачи в процессе печати позитива путем применения цветных исправляющих фильтров. Коррекция также возможна изменением спектрального состава источников, освещающих объект фотографирования, по сравнению с образцовым излучением, для которого рассчитан баланс чувствительности слоев [Л. 66]. Фильтры, применяемые для исправления цветности негатива в процессе печати позитива, принято называть *копировальными фильтрами.*

На рис. 2-79,*б* изображены характеристические кривые негативной пленки, у которой первый слой имеет повышенную чув-

[1] Характеристические кривые позитивной пленки иногда строят в функции логарифма количества освещения негативного материала, в результате чего малым значениям количества освещения соответствуют наибольшие оптические плотности.

ствительность. В результате избыточной синей чувствительности негативной пленки в ее первом слое выделится избыточное количество желтого красителя, который вызовет в позитиве преобладание синего тона за счет недостаточного выделения желтого красителя в первом слое позитива, или, что то же, избыточного выделения пурпурного и голубого красителей во втором и третьем слоях позитива. В результате такого разбаланса по чувствительности ахроматические цвета позитива будут иметь синеватые оттенки тем в большей степени, чем больше разбалансирована по чувствительности первого слоя негативная пленка. Вполне понятно, что аналогичное искажение позитивного изображения может быть также в результате пониженной чувствительности второго — зеленочувствительного и третьего — красночувствительного слоев позитивной пленки. Третьей причиной аналогичного искажения цветопередачи может быть избыток синих излучений в спектре источника света, освещающего оригинал, или избыток желтых лучей в спектре источника света копировального прибора. Для устранения любой из перечисленных причин излишнего посинения позитива необходимо в процессе его печати (копировки) поместить между источником света копировального прибора и негативом комбинированный синий фильтр, состоящий из пурпурного и голубого.

Применение пурпурного и голубого копировальных фильтров, исправляющих избыточную чувствительность первого слоя негативной пленки, эквивалентно смещению характеристической кривой этого слоя вниз, следовательно, относительному уменьшению его эффективной оптической плотности (поверхностной плотности концентрации желтого красителя) при том же количестве освещения (рис. 2-79,*в*). Такое смещение характеристической кривой, как видно из рис. 2-79,*в*, уменьшает фотографическую широту негативной пленки. Значительное уменьшение фотографической широты, имеющее место при сильном исправлении цвета в процессе копировки негатива, приводит к неизбежному искажению цветопередачи в тенях и на ярких участках позитивного изображения.

Применением копировальных фильтров совершенно невозможно исправить разбаланс отдельных слоев пленки по контрасту (рис. 2-79,*г*), так как исправление такого разбаланса копировальными фильтрами в области малых экспозиций приводит к увеличению искажения цветов в области больших значений Et. Незначительный разбаланс негативных пленок по контрасту можно компенсировать разбалансом по контрасту позитивных пленок в противоположном направлении. Вследствие того, что такой подбор противоположно разбалансированных позитивных и негативных пленок затруднителен, пленки, не балансированные по контрасту, бракуются [Л. 67]. Из приведенного примера применения копировальных фильтров для улучшения цветопередачи позитивного изображения можно видеть, что этот метод применим для исправления разбаланса по чувствительности негативных и позитивных пленок, несоответствия спектра излучения источника, освещающего оригинал, образцовому спектру, а также несоответствия спектра излучения источника света в копировальном приборе. Для возможности исправления разбаланса чувствительности любого слоя или качественно любого несоответствия спектра излучения, падающего на оригинал, необходимо располагать набором пурпурных, голубых и желтых копировальных фильтров различной плотности. Примеры применения исправляющих копировальных фильтров приведены в табл. 18 [Л. 68]. Полный набор копировальных фильтров состоит из 60 фильтров с изменением эффективной плотности через 0,05 — от 0,05 до 1,00 для каждого из трех цветов.

Таблица 18

Схема исправления цветопередачи при копировании

Преобладающий цветовой тон		Исправление путем увеличения плотности копировальных фильтров	Исправление путем уменьшения плотности копировальных фильтров
в позитиве	в негативе		
Желтый	Синий	Желтого	Пурпурного + голубого
Пурпурный	Зеленый	Пурпурного	Желтого + голубого
Голубой	Красный	Голубого	Желтого + пурпурного
Красный	Голубой	Желтого + пурпурного	Голубого
Зеленый	Пурпурный	Желтого + голубого	Пурпурного
Синий	Желтый	Пурпурного + голубого	Желтого

За последние годы все шире внедряется в цветную кинематографию и фотографию коррекция цветопередачи с помощью применения *корригирующих масок*.

Методы маскирования при печати позитива или контратипа заключаются в оптической нейтрализации вредных цветных изображений или в усилении недостающего красителя [Л. 69]. Возникновение вредных цветных изображений возможно в результате неудовлетворительного цветоделения, например, в результате частичного поглощения синих излучений пурпурным и голубым красителями второго и третьего слоев негативной пленки, что эквивалентно недостатку в негативе синего цвета. Такой недостаток синего можно рассматривать как избыточную плотность изображений пурпурного и голубого цветов, следовательно, как возникновение эквивалентных вредных изображений пурпурного и голубого. Это приведет к тому, что на позитивном изображении будет наблюдаться недостаток желтого красителя, тем больший, чем большее участие голубого и пурпурного красителя требует в позитиве воспроизводимый цвет. Все цвета оригинала, требующие при восстановлении произведения голубого и пурпурного красителя, получатся на позитивной пленке с излишней плотностью первого слоя желтого цветоделенного изображения. В результате этого позитив будет обладать недостатком желтого, в частности все зеленые тона получат голубовато-синий оттенок, а синие будут почти черными. Все желтые тона будут обладать малой чистотой.

Вследствие поглощения зеленого компонента излучения голубым красителем негатива в нем возникает вредное изображение голубого цвета. При этом второй слой позитива пурпурного цвета будет обладать чрезмерной плотностью, что приведет к загрязнению пурпурным оттенком всех цветов оригинала, содержащих желтую компоненту, например зеленого, оранжевого и пр.

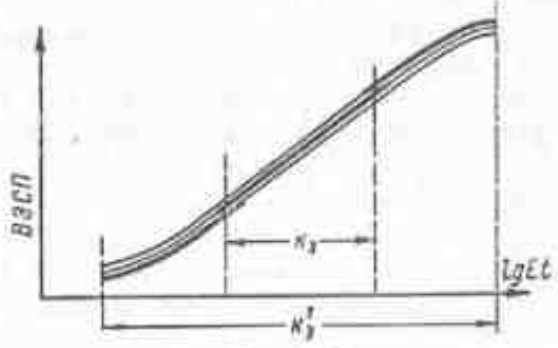


Рис. 2-80.

Такие искажения цвета нельзя исправить копировальным фильтром постоянной плотности, так как они не одинаковы на различных участках цветной репродукции. Оптической нейтрализации вредных цветных негативных изображений можно добиться лишь только печатью позитива с корректируемого негатива в контакте с малоконтрастным цветным позитивом, называемым маской. Маска должна иметь цвет, дополнительный к цвету вредного изображения. Контрастность маскового позитива определяется свойствами применяемых красителей. Чем больше поглощение синего цвета пурпурным красителем, тем контрастнее должен быть масковый позитив, печатаемый с зеленофильтрового негатива.

Выбор источника света. Широта исправления цвета при копировании ограничена фотографической широтой цветофотографического материала, которая, как правило, недостаточна[1]. Учитывая ограниченные возможности исправления цвета копировальными фильтрами, необходимо по мере возможности устранять причины, вызывающие искажение цвета на всех этапах производства цветного фильма. Одной из таких причин, как уже указывалось, может являться несоответствие спектрального состава источника, освещающего оригинал, спектральному составу образцового белого излучения (для пленок ДС $T_ц = 5\,000°$ К и пленок ЛН — 3 200° К.

На схеме сбалансированных характеристических кривых негативной пленки ДС (рис. 2-80) изображено действие излучения с цветовой температурой $T_ц \gg 5\,000°$ К. Увеличение синей компоненты освещения приведет к смещению зон цветоделенных изображений оригинала в сторону больших Et на кривой первого слоя и в сторону малых Et — на кривой третьего слоя. Такое смещение эффективных составляющих количеств освещения будет эквивалентно увеличению эффективного контраста оригинала от $k_э$ до $k'_э$, приводящему к искажению цветов в теневых и световых участках позитива. Из приведенного примера можно видеть, что наиболее точным критерием контроля спектрального состава освещения при киносъемке является наблюдение за соотношением его эффективных компонентов, определяемых по значениям спектральной чувствительности отдельных слоев негативной пленки:

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\int \tau_0(\lambda)\, g_c(\lambda)\, d\lambda}{\int \tau_0(\lambda)\, g_з(\lambda)\, d\lambda}; \\ \text{и}\quad \beta &= \frac{\Phi_3}{\Phi_2} = \frac{\int \tau_0(\lambda)\, g_к(\lambda)\, d\lambda}{\int \tau_0(\lambda)\, g_з(\lambda)\, d\lambda}, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}135)$$

где Φ_1, Φ_2, Φ_3 — эффективные потоки, для первого — синечувствительного, второго — зеленочувствительного и третьего — красночувствительного слоев пленки;

$g_c(\lambda)$, $g_з(\lambda)$, $g_к(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности первого, второго и третьего слоев негативной пленки.

Для удобства пользования этим методом на практике введены [Л. 70] единицы: $1СК$ (сине-красная) и $1ЗК$ (зелено-красная), наглядно выражающие спектральный состав в эквивалентных 5%-ных ступеньках копировальных исправляющих фильтров для пленок с коэффициентом контрастности $\gamma = 0{,}7$. При изменении спектрального состава излучения на $1СК$ при неизменном числе $ЗК$ разность значений эффективной копировальной плотности синечувствительного (первого) и красночувствительного (третьего) слоев негатива будет примерно равна одной 5%-ной ступени желтой серии копировальных фильтров. Изменение излучения на $1ЗК$ при постоянстве числа $СК$ эквивалентно изменению эффективных копировальных плотностей второго и третьего слоев на одну ступень пурпурных фильтров.

Отношения цвето-фотографического баланса α и β, выраженные в единицах $СК$ и $ЗК$, определятся как

$$N_с = 10 \lg \alpha \text{ и } N_з = 16 \lg \beta. \qquad (2\text{-}136)$$

В практических условиях цветной киносъемки вследствие применения источников света со сплошным спектром (лампы накаливания, угольные, дуговые, ксеноновые и др.) необходимым и достаточным критерием контроля может быть соотношение спектральных интенсивностей контролируемого излучения в двух областях спектра. Как известно, этот критерий однозначно определяется цветовой температурой излучения (ч. I, § 1-20), связанной с коэффициентами цвето-фотографического баланса пленки ДС следующими равенствами:

$$\lg \alpha = 0{,}832 - \frac{5\,000}{T_ц}; \quad \lg \beta = 0{,}4 \lg \alpha + 0{,}042. \qquad (2\text{-}137)$$

Из (2-135) и (2-137) следует возможность контроля цвето-фотографических свойств освещения объекта киносъемки методом измерения цветовой температуры исходного белого излучения.

Спектрозональный метод контроля качества фотографического воспроизведения цвета. Одной из существенно важных причин, вызывающих искажение цветопередачи, не учитываемой балансом эквивалентных плотностей

[1] Фотографическая широта цветных пленок не превышает 2,0, в то время как черно-белые негативные пленки имеют широту до 5,0.

отдельных слоев, является несовершенство красителей, применяемых в эмульсионных слоях пленки. Как было показано при изложении принципов оценки качества воспроизведения цветов субтрактивным методом (§ 2-16), правильное цветовоспроизведение возможно лишь при обязательном соответствии цветов равноэффективных излучений цветам изохромным. Это требование соответствует условию, когда постоянству эффективного компонента излучения, действующего на один из слоев негативной пленки, будет соответствовать постоянство соответствующей субтрактивной координаты результирующего цвета (§ 2-17). Таким образом, цветовоспроизведение может быть правильным лишь тогда, когда каждый из трех светочувствительных слоев негативной пленки регулирует концентрацию только одного из трех красителей цветного позитивного изображения. Это условие, выполняемое в схеме идеализированного субтрактивного процесса, нарушается в реальных условиях цветоделения в результате того, что эффективная оптическая плотность реальных красителей в зонах пропускания не равна нулю, причем распределение ее по полосе пропускания каждого красителя изменяется в зависимости от концентрации (рис. 2-54). Эти причины искажения цветопередачи, так же как и другие, ранее перечисленные, не позволяют ограничиться лишь контролем качества передачи цвета ахроматической шкалы яркостей и требуют для более глубокого анализа причин недостаточно высокого качества воспроизведения цвета спектрального исследования свойств цвето-фотографических материалов. Такие исследования в первом приближении можно ограничить изучением распределения контролируемого излучения по трем зонам спектра.

Трехзональная система контроля цветофотографических процессов, разработанная в Научно-исследовательском кино-фото институте [Л. 71], предусматривает разделение всего видимого участка спектра на три зоны: синюю с длинами волн $\lambda_с \leqslant 0{,}48$ *мк*, зеленую — $0{,}48$ *мк* $\leqslant \lambda_з \leqslant 0{,}56$ *мк* и красную $\lambda_к \geqslant 0{,}56$ *мк*. Любое излучение характеризуется в этой системе тремя значениями коэффициентов пропускания $\tau_с$, $\tau_з$ и $\tau_к$ исходного белого цвета или оптических плотностей $D_с$, $D_з$ и $D_к$ в каждой из зон спектра. Для иллюстрации применения этих субтрактивных координат цвета предположим, что произвольно заданный цвет воспроизводится некоторыми вполне определенными значениями концентрации желтого, пурпурного и голубого красителей. Этим концентрациям каждого красителя соответствуют вполне определенные значения спектрозональных коэффициентов пропускания каждого слоя цветной пленки или значения их спектрозональных оптических плотностей $\tau_с^ж$, $\tau_з^ж$, $\tau_к^ж$ или $D_с^ж$, $D_з^ж$, $D_к^ж$ — для желтого красителя первого слоя; $\tau_с^п$, $\tau_з^п$, $\tau_к^п$ или $D_с^п$, $D_з^п$, $D_к^п$ — для пурпурного красителя второго слоя и $\tau_с^г$, $\tau_з^г$, $\tau_к^г$ или $D_с^г$, $D_з^г$, $D_к^г$ — для голубого красителя третьего слоя. Субтрактивными координатами такого цвета будут являться три значения спектрозональных коэффициентов пропускания всех трех слоев пленки:

$$\left.\begin{aligned} \tau_с &= \tau_с^ж \tau_с^п \tau_с^г; \\ \tau_з &= \tau_з^ж \tau_з^п \tau_з^г; \\ \tau_к &= \tau_к^ж \tau_к^п \tau_к^г. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}138)$$

Принимая в качестве субтрактивных координат значения спектрозональных оптических плотностей, что удобнее для практики вследствие большей простоты расчетов, получим:

$$\left.\begin{aligned} D_с &= D_с^ж + D_с^п + D_с^г; \\ D_з &= D_з^ж + D_з^п + D_з^г; \\ D_к &= D_к^ж + D_к^п + D_к^г. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}138а)$$

Как показывает опыт, применение трехзональной системы субтрактивных координат значительно упрощает расчет отдельных стадий любого субтрактивного процесса воспроизведения цвета и выбор копировальных фильтров в процессе печати позитива.

Следует также отметить необходимость учета возможных причин искажения цветов фильма в процессе его демонстрации. К числу таких причин следует в первую очередь отнести: несоответствие спектра источника света в кинопроекторе требованиям правильной цветопередачи; недостаточный уровень яркости киноэкрана с учетом малого коэффициента пропускания цветных фильмов, так как согласно закону Бецольда—Брюкке (§ 1-10) уменьшение яркости приводит к изменению ощущения цветности; наличие цветовой переадаптации, возможной в условиях резкой по цветности смены смежных кадров, а также наличие индуктивного влияния на ощущение цветности смежных, резко отличающихся по цвету участков кадра и другие менее существенные причины.

Несмотря на множество причин, влияющих на качество воспроизведения цвета на киноэкране, и существенные отклонения цвета репродукции от цвета оригинала, оценка кинозрителей, как правило, бывает удовлетворительной при отсутствии резких нарушений правил цветопередачи. Этому способствует демонстрация движущихся быстро меняющихся изображений, отсутствие в поле зрения оригинала, вследствие чего сопоставление возможно лишь по памяти и обобщению, желание наблюдать не только за актером, но и за всем происходящим на экране. Вполне понятно из наложенного, что для удовлетворительной оценки кинозрителем качества воспроизведения цветов на киноэкране существенно важно обеспечить правильную передачу хорошо известных зрителю цветов, например цвета лица, цвета неба и зелени, а также всех ахроматических оттенков.

2-21. Цвет в полиграфии

Способы полиграфического воспроизведения цвета. Современная многоцветная полиграфическая печать основана на фотомеханических процессах цветного репродуцирования[1], первая стадия которых заключается в получении трех цветоделенных негативов. Эта стадия цветного фотомеханического репродуцирования называется цветоделительной. Во второй градационной стадии этого процесса создаются три цветоделенные печатные формы (клише), с помощью которых желтая, пурпурная и голубая краски наносятся на бумажную подложку. Печать многоцветного изображения с трех цветоделенных печатных форм является заключительной стадией процесса полиграфического репродуцирования — синтезом.

Многоцветное фотомеханическое репродуцирование, так же как и цветная кинематография, основано на субтрактивном способе воспроизведения цветов [Л. 71]. Для примера рассмотрим репродуцирование голубого цвета с субтрактивными координатами в трехзональной системе $D_c = 0{,}16$; $D_з = 0{,}07$ и $D_к = 0{,}37$. Этим координатам соответствуют следующие зональные коэффициенты отражения слоя красок, нанесенных на белую бумажную подложку: $\rho_c = 0{,}69$, $\rho_з = 0{,}85$ и $\rho_к = 0{,}43$.

Следовательно, совокупность трех красок, нанесенных на подложку, должна поглощать: в синей зоне спектра 31% потока этой зоны, в зеленой — 15% и в красной — 57%. Для оптимальных красителей, оптическая плотность которых в поле пропускания равна нулю, желтая краска должна обеспечить поглощение 31% синей составляющей падающего излучения, пурпурная — 15% зеленой составляющей и голубая — 57% красной составляющей. В этом случае поверхностная концентрация желтой краски однозначно определит синюю составляющую отраженного излучения, концентрация пурпурной краски — зеленую составляющую и концентрация голубой — красную составляющую. В условиях применения реальных красок каждая из трех составляющих отраженного излучения будет определяться совокупностью концентраций всех трех красителей. Эта особенность реальных красок, значительно уменьшающая возможности правильного воспроизведения цветов (§ 2-17), определяется неодинаковым поглощением каждой краской части излучения в своей полосе пропускания, а также неодинаковым пропусканием излучения каждой краской в своей полосе поглощения (рис. 2-59). Несмотря на то, что каждый из трех зональных коэффициентов пропускания совокупности трех красок зависит от концентраций каждой из них, как было показано на примере цветной кинематографии, три выбранных значения концентрации трех исходных красок однозначно определяют цвет, субтрактивно ими воспроизведенный. Следовательно, субтрактивными координатами цвета репродукции могут быть, так же как и в цветной кинематографии, значения поверхностной концентрации трех красок, воспроизводящих цвет оригинала.

Дозирование концентрации трех красок цветной полиграфической репродукции может осуществляться двумя способами [Л. 72]:

а) регулированием толщины слоя краски;

б) регулированием плотности расположения точечных (штриховых) растровых печатающих элементов.

Первый из указанных способов возможен лишь при *глубокой печати*, когда печатающие элементы печатных форм (клише) углублены относительно пробельных[1]. В этом способе печати краска заполняет углубленные печатающие элементы и покрывает тонким слоем выступающие пробельные. Перед печатанием с пробельных элементов краска механически удаляется и остается лишь в углубленных печатающих элементах формы. Поверхностная концентрация краски на каждом печатающем элементе зависит от его глубины, которая определяется необходимостью переноса с клише на репродукцию слоя большей или меньшей толщины. Темным участкам оригинала с наиболее чистыми цветами на клише должны соответствовать наиболее глубокие печатающие элементы. Наименьшей глубиной должны обладать те элементы, которые печатают участки репродукции наиболее светлые — с малой чистотой цвета.

Второй способ дозирования количества краски используется в *высокой* и *плоской формах печати*, при которых толщина слоя краски на всех участках репродукции одинакова. В высокой печати в отличие от глубокой пробельными элементами являются углубленные участки клише, а печатающими — выступающие. Краска, нанесенная на печатающие элементы клише, имеющие в высокой печати одинаковую высоту, переносится на бумагу слоем одинаковой толщины.

В плоской печати краска наносится на печатающие элементы, покрытые олеофольной пленкой, легко воспринимающей жирную типографскую краску. Пробельные элементы, покрытые гидрофильной пленкой, легко воспринимают влагу и совершенно невосприимчивы к краске. Поэтому, несмотря на то, что печатающие и пробельные элементы плоской печатной формы расположены на одном уровне, краска ложится лишь только на печатающие элементы. Так же как и в высокой печати, толщина слоя краски на печатающих элементах плоской печатной формы одинакова, вследствие чего градация яркости и чистоты цвета на репродукции плоской печати может регулироваться лишь только числом и размером печатающих элементов, приходящихся на единицу площади репродукции.

Для обеспечения дозирования трех репродуцирующих красок в высокой и плоской печати применяют растровые цветоделенные печатные формы, на которых изображение разбито на отдельные точки. Цветоделенные растровые негативные изображения получаются в результате трехкратного фотографирования цветного оригинала через три разделяющих фильтра и растр-пластину, состоящую из двух склеенных плоско-параллельных

[1] Процессы репродуцирования принято называть фотомеханическими потому, что они механизированы на основе фотографической техники.

[1] Непечатающие элементы клише принято называть пробельными.

шлифованных стекол, на которые нанесены непрозрачные линии. При фотографировании оригинала растр располагается в плоскости, параллельной негативу, на расстоянии нескольких миллиметров от него. Вследствие расположения растра на некотором расстоянии от фокуса его изображение на негативе получается размытым. Размытие границы изображения растра определяет различие размеров растровых пятен, полученных на проявленном негативе в результате проецирования на него отверстия диафрагмы объектива через растровые ячейки (рис. 2-81). Как можно видеть из приведенной схемы образования растровых точек белого, серого и черного полей оригинала (рис. 2-81), размер темного негативного изображения каждой растровой точки увеличивается по мере увеличения яркости участка поверхности фотографируемого оригинала.

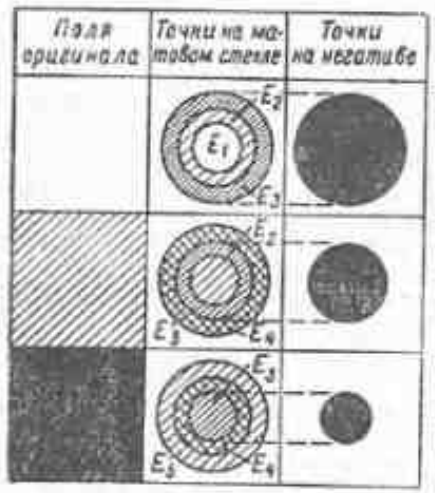


Рис. 2-81.

Растровый негатив после коррекции печатается на позитивном фотографическом материале, в результате чего получается растровое позитивное изображение, которое переводится на печатную форму.

Требования правильного цветовоспроизведения. Для обеспечения правильного воспроизведения цветов необходимо, чтобы цвет эффективного излучения, поглощенного каждым из трех цветоразделяющих приемников, был дополнительным к цвету краски, выделяемой этим приемником [1]. В соответствии с этим правилом выбор в качестве основных красок субтрактивного синтеза желтой, пурпурной и голубой требует разделения репродуцируемого цвета на синюю, зеленую и красную составляющие. Такое разделение репродуцируемого цвета осуществляется синим, зеленым и красным разделяющими фильтрами, применяемыми совместно с панхроматической эмульсией негативных фотоматериалов. Варьируя переменные параметры растровой фотографии (расстояние растра от плоскости негатива, время экспозиции характеристики фотоматериалов и проявляющих веществ), возможно обеспечить соответствие между плотностями распределения растровых печатающих элементов в полутонах цветоделенных негативов и величинами оптической плотности оригинала. Те участки цветоделенных негативов, которые имели одинаковые оптические плотности, должны иметь одинаковую поверхностную концентрацию выделяемой ими краски.

[1] Сокращенно принято говорить, что краска выделяется приемником в тех случаях, когда увеличение уровня реакции приемника, например оптической плотности цветоделенного негатива, приводит к увеличению концентрации выделяемой краски.

Изложенная вкратце схема процесса создания цветоделенных печатных форм позволяет сделать вывод о зависимости цветоделительной и переходной градационной стадии процесса от выбора красок репродукции. Как показывает опыт цветной полиграфии, наиболее существенные нарушения цветопередачи определяются выбором трех основных репродуцирующих красок. Для определения возможностей воспроизведения цветов любой триадой красок, а также для выбора таких красок, которые наиболее соответствуют заданным цветам оригинала, экспериментально определяют цветовые охваты каждой исследуемой триады красок. Вполне понятно, что изменение хотя бы одной краски в исследуемой триаде приводит к изменению цветового охвата в целом. Для изготовления полной шкалы цветового охвата исследуемой триады красителей необходимо иметь для двух цветов (обычно голубого и пурпурного) цветоделенные печатные формы квадратов, разбитых на полоски с постоянным изменением оптической плотности между смежными полосами на величину ΔD (рис. 2-82,*а*, *б*).

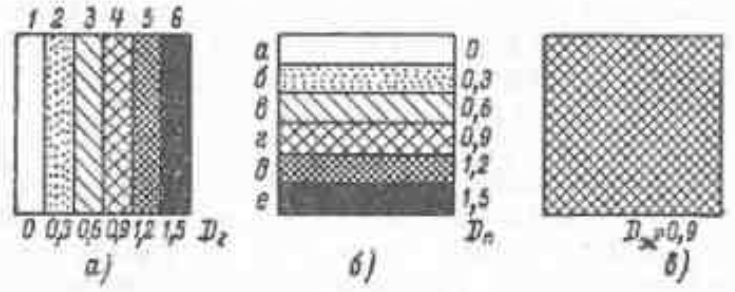


Рис. 2-82.
а — голубая; *б* — пурпурная; *в* — желтая.

Печатные формы третьего (желтого) цвета должны обеспечивать постоянную оптическую плотность третьей краски в пределах всего квадрата (рис. 2-82,*в*). Оптические плотности желтой краски на таких квадратных печатных формах должны отличаться друг от друга на ту же величину ΔD. Принимая $\Delta D=0{,}3$ и варьируя величину оптической плотности от 0 до 1,5, получим по шесть полосок на каждой из печатных форм для голубой и пурпурной красок и пять форм для желтой краски [1] (рис. 2-82). Располагая голубую краску на отпечатке вертикальными полосами, а пурпурную — горизонтальными, получим при совместной

[1] Шестая форма $D=0$ по принятому условию соответствует нулевой концентрации желтой краски.

печати с двух форм 36 цветовых оттенков, каждый из которых будет изохромен относительно голубой краски для вертикальных рядов и относительно пурпурной краски для горизонтальных. Печатая дополнительно пять оттисков с трех форм, варьируя в каждом оттиске оптическую плотность желтой краски, получим увеличение цветового охвата до 216 цветовых тонов, расположенных на шести квадратах, по 36 цветных полей в каждом, причем каждый квадрат будет изохромен относительно желтой краски.

Так, например, для отпечатка с оптической плотностью желтой краски $D_ж = 0{,}9$ поле *6б* (рис. 2-82) будет характеризоваться следующими показателями: $D_г = 1{,}5$; $D_п = 0{,}9$ и $D_ж = 0{,}9$, что будет соответствовать темно-зеленому цвету.

Для большего удобства пользования шкалой цветового охвата целесообразно в каждом стыке четырех смежных цветных полей пробить окно диаметром 5—6 *мм*. Наличие таких окон на шкале охвата позволяет, накладывая шкалу на оригинал, производить более точное сопоставление цветов. В том случае, если сопоставление полученной шкалы цветового охвата с оригиналом показывает, что в оригинале содержатся такие цветовые оттенки, которые значительно отличаются от цветов шкалы охвата, удовлетворительное цветовое воспроизведение оригинала невозможно.

В таких случаях для улучшения качества воспроизведения цветов оригинала увеличивают число основных красок. Наиболее часто в цветной полиграфии в качестве дополнительной четвертой краски применяют черную, в некоторых случаях в зависимости от характера оригинала сообщая ей цветной оттенок. Применение четвертой краски позволяет взять в качестве основных более прозрачные краски, обеспечивающие лучшее цветоделение. Создание теней, а также темных участков оригинала в этом случае обеспечивает четвертая краска.

Для более высокого качества цветной полиграфической репродукции, кроме дополнительной черной краски, применяют еще две дополнительные краски. В качестве пятой и шестой дополнительных красок чаще всего применяют вторую голубую и вторую пурпурную (розовую). Эти краски берут прозрачными для обеспечения качественного воспроизведения светлых цветов оригинала. При наличии двух светлых основных красок (голубой и розовой) две другие этого же тона должны быть более темными (синей и пурпурной).

Коррекция цветовоспроизведения. Качество цветовоспроизведения цветной полиграфической печати может быть значительно повышено в результате устранения погрешностей цветоделения и неудовлетворительных градационных переходов оттенков цвета.

Основные погрешности цветоделения в цветной полиграфии, так же как и в цветной кинематографии, определяются наличием значительных и не одинаковых по величине составляющих коэффициента отражения (пропускания) в зоне поглощения красок, а также их неодинаковым поглощением в зоне отражения. В силу неодинакового несовершенства красок, применяемых в полиграфии (рис. 2-59), не только уменьшается максимально возможная чистота репродуцируемого цвета, но также происходит его значительное искажение по цветовому тону за счет появления в цветоделенных негативах и позитивах вредных дополнительных изображений (§ 2-20). Так, например, на цветоделенном негативе, снятом через синий разделяющий фильтр для изготовления желтой печатной формы, возникает не только нормальное изображение требуемой контрастности, соответствующее на репродукции желтой краске, но также дополнительное, значительно более мягкое изображение, соответствующее пурпурной краске на позитиве. Это второе изображение является вредным, так как оно возникает в результате избыточного отражения пурпурной краски в зеленой части спектра. Благодаря этому все цвета оригинала, требующие наличия пурпурной краски, будут загрязнены желтой краской. Желтая краска будет ложиться в избытке на красные, розовые и синие тона. На цветоделенном негативе для печатной формы пурпурного цвета появляется вредное голубое изображение, приводящее на репродукции к загрязнению пурпурной краской голубых, синих, зеленых и сиреневых оттенков.

Для устранения этих вредных изображений, снижающих качество воспроизведения цвета, применяют цветоделительное маскирование, построенное на принципе совмещения дополнительных—противоположных по цветности и яркости—изображений. Контрасты позитивного изображения на маске и вредного негативного изображения должны быть одинаковыми для полного его уничтожения. Изложенные правила уничтожения вредных изображений методом маскирования позволяют сделать вывод, что маска, предназначенная для устранения вредного негативного изображения, должна быть позитивом, полученным фотографированием оригинала через фильтр цвета, дополнительного к цвету вредного изображения. Так, например, позитивная маска для уничтожения голубого вредного изображения получается фотографированием оригинала через красный фильтр, а для пурпурного вредного изображения — через зеленый фильтр.

Метод маскирования может применяться для исправления не только цветоделительных погрешностей передачи цвета, но также и градационных искажений цвета, возникающих в результате отклонения характеристической кривой от прямолинейности, недостаточной фотографической широты применяемых фотоэмульсий, искажения шкалы контрастов при травлении печатных форм и пр.

Нарушение правильной цветопередачи может иметь место в градационном процессе цветной полиграфической печати, так же как и в цветной кинематографии, в результате разбаланса

цветоделенных негативов по плотности или по контрасту (§ 2-20). Устранение этих недостатков также возможно путем маскирования.

2-22. Цвет в телевидении

Системы телевизионного воспроизведения цвета. Современные установки телевоспроизведения цветов выполняются на основе одного из двух следующих принципов передачи трех видеосигналов [1]:

а) установки с последовательной передачей;

б) установки с одновременной передачей.

В основе последовательной передачи и приема видеосигналов лежит синхронное вращение трех секторных фильтров (красного, зеленого и синего) перед передающей и приемной трубками телевизионной установки. Синхронность вращения фильтров должна обеспечить расположение в каждый данный момент перед всеми телевизионными приемниками фильтров, пропускающих такую спектральную полосу, которую в этот же момент времени пропускает фильтр, расположенный перед фотоэлектрической трубкой телепередатчика. При этом красный цвет оригинала будет вызывать наибольший уровень сигнала в красноощущающем канале, так как красный разделяющий фильтр передатчика будет иметь максимальный коэффициент пропускания. На экране электронно-лучевой трубки приемника репродукция [2] (изображение) будет иметь при этом наибольшую яркость от «красного» сигнала, следовательно, в тот момент, когда перед наблюдателем будет расположен красный фильтр. Таким образом, изображение оригинала красного цвета будет восприниматься наблюдателем также красным.

Скорость вращения секторных дисков должна обеспечивать слитное зрительное ощущение всех трех цветоделенных изображений. В этом случае будет обеспечено аддитивное смешение цветов трех цветоделенных изображений, следовательно, желтый цвет оригинала, имеющий красный и зеленый компоненты, будет виден наблюдателю через красный и зеленый фильтры. Соотношение яркостей красного и зеленого изображений, определяемое соотношением красного и зеленого компонентов цвета оригинала, следовательно, уровнями «красного» и «зеленого» сигналов, определит пропорцию смеси основных цветов изображения. При малой доли красного цвет будет желто-зеленый, а при больших — оранжевый. Вполне понятно, что точное совпадение цвета оригинала и изображения возможно лишь при достаточно широ-

[1] Видеосигналом принято называть сигнал, поступающий с антенны телевизионного передатчика в эфир для зрительного воспроизведения оригинала. В черно-белом телевидении видеосигнал один, а в цветном — три.

[2] В дальнейшем изложении термин «репродукция» заменен на термин «изображение», принятый в телевизионной технике.

ком цветовом охвате системы телеприемника, а также при правильном соотношении цветовых систем приемника и передатчика.

Передатчик в одновременной системе телевидения имеет три цветоразделяющие фотоэлектрические трубки, сигналы которых, после преобразования, передаются одновременно тремя передатчиками в эфир. Преобразование электрических сигналов в цветное изображение осуществляется в телеприемнике с помощью трехлучевой мозаичной трубки или трех трубок с цветными люминофорами и с оптической системой совмещения трех цветных изображений.

Одновременная передача, следовательно, и прием трех цветоделенных сигналов позволяют пользоваться различными цветовыми системами на различных звеньях телевоспроизведения цвета, используя для преобразования одной системы в другую матричные схемы. Эта особенность системы телевоспроизведения цвета одновременной передачей сигналов позволяет в передающей части использовать цветовую систему B, λ, p (§ 2-9). Наличие в такой телевизионной системе сигнала, уровень которого определяется яркостью оригинала, позволяет использовать черно-белые телевизионные приемники для приема цветной телепередачи и цветные телеприемники для приема черно-белой программы. Такая телевизионная цветная система носит название совместимой.

Схема телевоспроизведения цвета. Любая современная установка телевоспроизведения цветов независимо от принципа ее действия должна состоять из трех следующих звеньев [Л. 76].

а) воспринимающего устройства, предназначенного для преобразования цвета излучений, отраженных оригиналом, в три фототока;

б) канала связи, в котором происходит преобразование трех фототоков в три сигнала и передача их в эфир;

в) цветовоспроизводящего устройства, предназначенного для преобразования трех сигналов в излучение требуемого цвета.

В воспринимающем устройстве передающей цветной телевизионной установки производится цветоделение воспроизводимого излучения на три компонента. Это цветоделение осуществляется при помощи трех передающих фотоэлектрических трубок, снабженных разделяющими светофильтрами или зеркалами. Каждый из трех компонентов цвета, полученных в результате цветоделения, преобразуется в фототок

$$i_j = \int e_0(\lambda)\,\rho_0(\lambda)\,\xi_j(\lambda)\,g_j(\lambda)\,d\lambda, \qquad (2\text{-}139)$$

где $e_0(\lambda)$ — спектральная интенсивность плотности облучения оригинала;

$\rho_0(\lambda)$ — спектральная функция отражения излучения оригиналом;

$\xi_j(\lambda)$ — спектральная характеристика оптической части цветоразделяющего устройства;

$g_j(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоэлектрических приемников передающей телевизионной установки.

Цветоразделяющие зеркала действуют аналогично просветляющей пленке (ч. 1, § 2-21) на принципе избирательной интерференции пучков лучей, отраженных от первой и второй границ пленки диэлектрика, нанесенной на стекло.

Материалами для избирательно отражающей пленки цветоразделяющих зеркал служат двуокись титана TiO_2 с показателем преломления $n=2{,}2$ или двуокись кремния SiO_2 с $n=1{,}4$. Толщина отражающей пленки и ее показатель преломления относительно стекла подложки определяют спектральные характеристики разделяющих зеркал. На рис. 2-83 приведена оптическая схема применения зеркал для разделения цвета оригинала на три компонента. Вследствие малых потерь света в толще отражающих пленок и прозрачного стекла подложки цветоразделяющие зеркала обладают более высокими энергетическими показателями, чем разделяющие фильтры. Спектральная характеристика оптической части цветоразделяющего устройства определяется произведением коэффициентов пропускания и отражения всех цветоразделяющих фильтров и зеркал, расположенных по пути цветоделенного пучка лучей. Так, например, для схемы цветоразделения, приведенной на рис. 2-83,

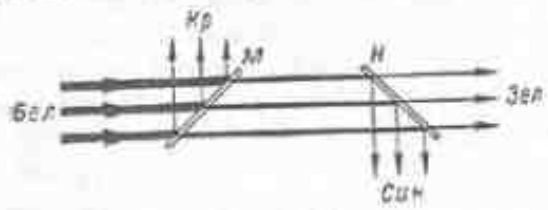


Рис. 2-83.

для красного пучка лучей

$$\xi_к(\lambda) = \tau_л(\lambda)\rho_M(\lambda);$$

для зеленого пучка лучей

$$\xi_з(\lambda) = \tau_л(\lambda)\tau_M(\lambda)\tau_H(\lambda);$$

для синего пучка лучей

$$\xi_с(\lambda) = \tau_л(\lambda)\tau_M(\lambda)\rho_H(\lambda),$$

где $\tau_л(\lambda)$, $\tau_M(\lambda)$ и $\tau_H(\lambda)$ — спектральные коэффициенты пропускания линз оптики и цветоразделяющих зеркал M и H (рис. 2-83);

$\rho_M(\lambda)$ и $\rho_H(\lambda)$ — спектральные коэффициенты отражения тех же зеркал.

Согласно (2-139) компонентами цвета любого однородного излучения являются произведения $e_0(\lambda)\rho_0(\lambda)\xi_j(\lambda)g_j(\lambda)d\lambda$, следовательно, три произведения $\xi_j(\lambda)g_j(\lambda)$ могут служить ординатами кривых сложения в цветовой системе первой стадии телевоспроизведения цвета. При этом три фототока, регистрирующие три компонента излучения оригинала, могут служить координатами цвета этого излучения в системе, основные цвета которой определяются спектральными чувствительностями трех фото-

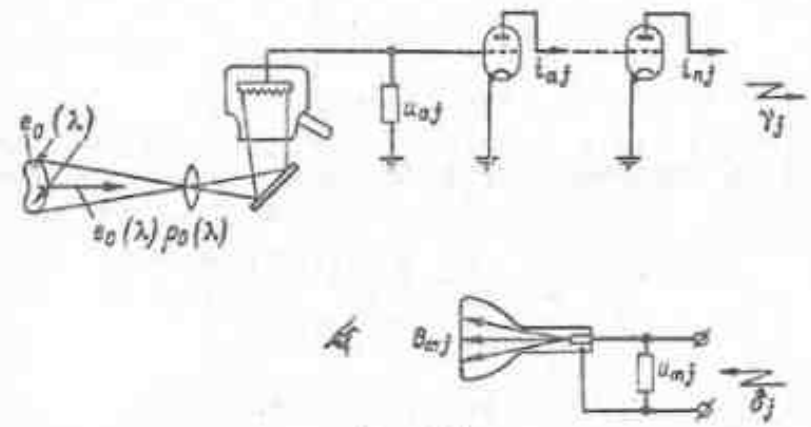


Рис. 2-84.

электрических приемников (суперартиконов) передающей цветной телевизионной установки.

На второй стадии телевоспроизведения цвета три фототока преобразуются в три сигнала γ_j, поступающие на антенну телевизионного приемника, через промежуточные преобразования в три напряжения u_{aj} на входных сопротивлениях первых каскадов усиления видеосигналов, три тока i_{nj} последнего каскада усиления и три видеосигнала γ_j на передающей антенне (рис. 2-84). Три сигнала δ_j, поступившие на антенну телевизионного приемника, определяют напряжение u_{mj} на входных сопротивлениях контуров управляющих электродов трех приемных электронно-лучевых трубок. В этих трубках сигналы δ_j преобразуются в три компонента воспроизводимого цвета, яркость каждого из которых определяется тремя значениями напряжений u_{mj}. Яркости трех цветоделенных излучений и их спектральные составы $\varphi_л(\lambda)$, зависящие от люминофоров экрана трубки, полностью определяют цвет изображения $\Phi_и$. Цвет изображения, полученный в результате многих трансформаций, должен соответствовать цвету оригинала Φ_0:

$$\vec{\Phi}_0 = q\vec{\Phi}_и,$$

где q является функцией многих последовательных трансформаций компонентов исходного цвета оригинала.

Выбор основных цветов передающего звена. Для обеспечения воспроизведения цвета, удовлетворяющего требованиям физиологической точности, необходимо и достаточно (§ 2-17) соблюдение пропорциональности[1] между координатами цвета оригинала и изображения [Л. 78—80]:

$$\left.\begin{aligned} x'_p &= Cx'_o; \\ y'_p &= Cy'_o; \\ z'_p &= Cz'_o. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}140)$$

Координаты цвета оригинала определятся в системе XYZ спектральной характеристикой излучения источника, освещающего оригинал, и спектральной функцией отражения оригинала:

$$\left.\begin{aligned} x'_o &= \int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \\ y'_o &= \int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \\ z'_o &= \int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}141)$$

Координаты цвета изображения определятся значениями трех коэффициентов $a_к$, $a_з$ и $a_с$, зависящих от уровней сигналов, поступающих по каждому каналу на телевизионный приемник, и функциями спектральной интенсивности излучения трехлюминофоров экрана электронно-лучевой трубки телевизионного приемника[2]:

$$\left.\begin{aligned} x'_p &= a_к\int b_к(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda + a_з\int b_з(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda + \\ &\quad + a_с\int b_с(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \\ y'_p &= a_к\int b_к(\lambda)y(\lambda)\,d\lambda + a_з\int b_з(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda + \\ &\quad + a_с\int b_с(\lambda)\bar{y}(\lambda)\,d\lambda; \\ z'_p &= a_к\int b_к(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda + a_з\int b_з(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d(\lambda) + \\ &\quad + a_с\int b_с(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}142)$$

[1] Для упрощения анализа цветопередачи принято допустимым пропорциональное изменение яркости на всех участках оригинала и изображения, что соответствует нулевым отклонениям цветности (2-118).

[2] Для системы последовательной передачи сигналов спектральная интенсивность излучения экрана трубки определяется произведением спектральной интенсивности люминофора на коэффициент пропускания разделяющего фильтра. В этом случае излучение люминофоров должно быть белым.

где $b_к(\lambda)$, $b_з(\lambda)$, $b_с(\lambda)$ — спектральные интенсивности излучения красного, зеленого и синего люминофоров для сигнала единичной интенсивности.

Предполагая в простейшем случае работу электрического канала линейной на всем протяжении от передающей до приемной установок $u_{oj} = C_e i_j \ldots$ до $u_{mj} = C_m \delta_j$, получим коэффициенты интенсивности трех сигналов пропорциональными фототокам каждого канала передающего устройства:

$$\left.\begin{aligned} a_к &= \alpha_к\int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\xi_к(\lambda)g(\lambda)\,d(\lambda); \\ a_з &= \alpha_з\int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\xi_з(\lambda)g(\lambda)\,d(\lambda); \\ a_с &= \alpha_с\int e_o(\lambda)\rho_o(\lambda)\xi_с(\lambda)g(\lambda)\,d(\lambda), \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}143)$$

где $\alpha_к$, $\alpha_з$ и $\alpha_с$ — коэффициенты пропорциональности, регулируемые телезрителем путем изменения коэффициентов усиления любого из трех каналов приемника.

Для определения кривой спектральной чувствительности трех фотоэлектрических передающих трубок (суперартиконов) совместно с их разделяющими оптическими устройствами необходимо решить систему уравнений (2-142), написав ее для удельных координат $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$. Приняв $\alpha_к = \alpha_з = \alpha_с = 1$, преобразуем систему уравнений (2-143) для однородных излучений одинаковой мощности по всему спектру $e_o(\lambda)\rho_o(\lambda) = 1$:

$$\left.\begin{aligned} C\bar{x}(\lambda) &= a_{11}\xi_к(\lambda)g(\lambda) + a_{12}\xi_з(\lambda)g(\lambda) + a_{13}\xi_с(\lambda)g(\lambda); \\ C\bar{y}(\lambda) &= a_{21}\xi_к(\lambda)g(\lambda) + a_{22}\xi_з(\lambda)g(\lambda) + a_{23}\xi_с(\lambda)g(\lambda); \\ C\bar{z}(\lambda) &= a_{31}\xi_к(\lambda)g(\lambda) + a_{32}\xi_з(\lambda)g(\lambda) + a_{33}\xi_с(\lambda)g(\lambda), \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}144)$$

где коэффициенты $a_{11}, \ldots, a_{33}$ определяются соответствующими интегралами уравнения (2-142), так, например,

$$a_{11} = \int b_к(\lambda)\bar{x}(\lambda)\,d\lambda; \ \ldots; \ a_{33} = \int b_с(\lambda)\bar{z}(\lambda)\,d\lambda.$$

Решая систему уравнений (2-144) относительно трех неизвестных: $\xi_к(\lambda)g(\lambda)$; $\xi_з(\lambda)g(\lambda)$ и $\xi_с(\lambda)g\lambda$, получим интересующие нас кривые спектральной чувствительности трех каналов передатчика.

Сопоставляя (2-144) с уравнением для преобразования координат цвета одной цветовой системы в другую (2-51), можно

видеть их тождественность при условии, если принять в основу цветовой системы передатчика три кривые сложения, описываемые искомыми произведениями:

$$\xi_к(\lambda)\,g(\lambda);\ \xi_з(\lambda)\,g(\lambda)\ \text{и}\ \xi_с(\lambda)\,g(\lambda).$$

Приведенная схема колориметрического расчета цветной телевизионной системы показывает, что исходными в этом расчете являются основные цвета цветовоспроизводящего устройства телевизионного приемника. Эти основные цвета в системе с одновременной передачей сигналов определятся согласно (2-142) спектральными характеристиками трех люминофоров. Согласно закону Грассмана (§ 2-3) цвета излучений люминофоров должны быть линейно независимыми, а также должны охватывать максимально большую часть пространства реальных цветов.

Учитывая, что цвета оригиналов очень редко имеют большую чистоту, в качестве основных цветов приемника приняты цвета[1] излучений следующих люминофоров: красного $Zn_3(PO_4)_2$ с координатами цветности $x_к = 0{,}70$ и $y_к = 0{,}30$; зеленого $Zn_2SiO_4Mn - x_з = 0{,}21$ и $y_з = 0{,}65$ и синего $ZnSAg - x_с = 0{,}13$ и $y_с = 0{,}09$. Из кривых спектральной интенсивности излучения этих люминофоров (рис. 2-85) можно видеть, что они излучают в λ_i сравнительно узких, частично перекрывающихся полосах спектра.

Расчет кривых сложения системы передатчика (2-144) на основе принятых основных цветов цветовоспроизводящего устройства приемника приводит к результатам (рис. 2-86), трудно выполнимым в практических условиях. Как можно видеть из рис. 2-86, каждая из кривых сложения имеет, кроме основной ветви, дополнительные, четыре из которых имеют отрицательные ординаты. Так как кривые сложения основных цветов системы приемника выражают зависимость уровня видеосигналов от длины волны излучения, падающего на цветоразделяющие зеркала приемных трубок, воспроизведение отрицательных ветвей этих кривых невозможно. Практически неприемлемы также и кривые с несколькими положительными ветвями, так как для более точного воспроизведения таких кривых сложения необходимо применять по одному приемнику на каждую ветвь кривой. Неприемлемость большого количества передающих трубок, а также возможность применения пересчетных матричных схем заставляют выбрать для передатчика такие основные цвета, которые можно было бы, соблюдая требования физиологической точности телевоспроизведения цвета, характеризовать кривыми смешения с одним максимумом.

[1] Приведенные данные об основных цветах цветовоспринимающего устройства приемника соответствуют экспериментальной установке цветного телевидения [Л. 77]. Стандарт США на систему NTSC (Национального комитета телевизионных систем) предусматривает $x_к = 0{,}67$; $y_к = 0{,}33$; $x_з = 0{,}21$; $y_з = 0{,}71$; $x_с = 0{,}14$ и $y_с = 0{,}08$.

При выборе кривых смешения с одним максимумом следует учитывать следующие очевидные положения [Л. 81]:

а) Отсутствие отрицательных ветвей кривой смешения полностью определяется отсутствием пересечения локуса цветности однородных излучений сторонами цветового треугольника с выбранными основными цветами в вершинах.

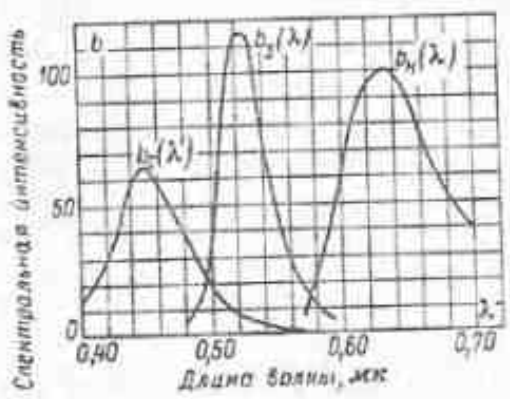


Рис. 2-85.

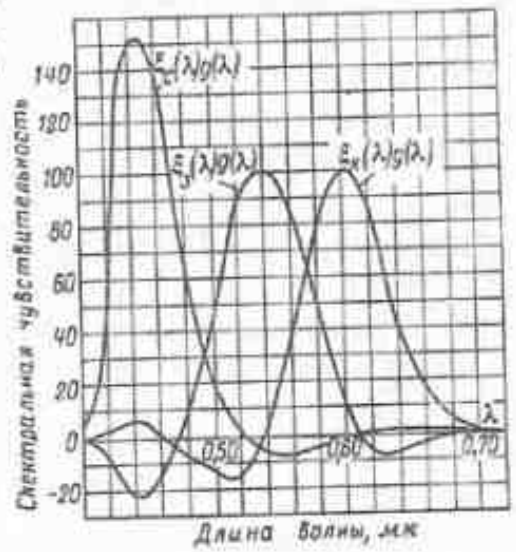


Рис. 2-86.

б) Наличие двух положительных ветвей кривой смешения неизбежно в тех случаях, когда кривая цветности однородных излучений отходит в обе стороны от точки минимального расстояния между ней и прямой нулевого значения исследуемой координаты. Характерным примером этого может служить кривая $\bar{x}(\lambda)$, имеющая ординату, близкую нулю в точке $\lambda = 0{,}505$ *мк* и удаляющаяся от оси ординат ветви локуса в стороны $\lambda > 0{,}505$ *мк* и $\lambda < 0{,}505$ *мк*.

Как показал Мак-Адам [Л. 82], уравнение произвольно выбранной кривой сложения можно выразить через параметры сторон треугольника новой цветовой системы:

$$\bar{m}(\lambda) = (k_m + b_m)\,\bar{x}(\lambda) + (b_m - 1)\,\bar{y}(\lambda) + b_m\bar{z}(\lambda) \qquad (2\text{-}145)$$

или

$$\bar{m}(\lambda) = \left(1 - \frac{1}{a_m}\right)\bar{x}(\lambda) + \left(1 - \frac{1}{b_m}\right)\bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda), \qquad (2\text{-}145а)$$

где a_m и b_m — отрезки, отсекаемые исследуемой m-стороной нового цветового треугольника на координатных осях x и y (рис. 2-87);

$k_m = -\frac{b_m}{a_m}$ — угловой коэффициент прямой m.

Пользуясь (2-145а) исследуем возможность получения кривых сложения с одним максимумом на примере системы XYZ. Из хода кривых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ можно видеть (рис. 2-19), что получение кривой с одним максимумом взамен $\bar{x}(\lambda)$ возможно лишь путем компенсации второй ветви $\bar{x}(\lambda)$ в области $\lambda \leqslant 0{,}505$ *мк* кривой $\bar{z}(\lambda)$ и в меньшей мере $\bar{y}(\lambda)$. Полная компенсация второй ветви $\bar{x}(\lambda)$ кривой $\bar{z}(\lambda)$ невозможна вследствие отсутствия полного подобия кривых $\bar{z}(\lambda)$ и компенсируемой второй ветви $\bar{x}(\lambda)$. Как известно, максимум $\bar{z}(\lambda)$ находится на $\lambda = 0{,}445$ *мк* и равен $\bar{z}_{\text{макс}}(\lambda) = 1{,}7826$ при $\bar{x}_{\lambda=0{,}445} = 0{,}3481$.

Следовательно, для обеспечения наиболее полной компенсации второй ветви $\bar{x}(\lambda)$ необходимо, чтобы доля участия $\bar{z}(\lambda)$ в новой кривой $\bar{m}(\lambda)$ определялась отношением этих значений:

$$\frac{\bar{x}_{\lambda=0{,}445}}{\bar{z}_{\lambda=0{,}445}} = \frac{0{,}3481}{1{,}7826} = 0{,}195^*.$$

Компенсация второй части кривой $\bar{x}(\lambda)$ определится также равенством нулю суммы членов с $\bar{x}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ в (2-145а):

$$\bar{z}(\lambda) + \frac{a_m - 1}{a_m}\bar{x}(\lambda) = 0. \qquad (2\text{-}145б)$$

Подставляя найденное соотношение $\frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{z}(\lambda)} = 0{,}195$ в (2-145б) и решая вновь полученное равенство относительно a_m, определим точку пересечения искомой стороны треугольника с осью абсцисс:

$$\bar{x}(\lambda)\left(\frac{1}{0{,}195} + \frac{a_m - 1}{a_m}\right) = 0,$$

откуда

$$a_m = \frac{0{,}195}{1{,}195} \approx 0{,}1634.$$

---

* Отношение $\frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{z}(\lambda)}$ изменяется от 0,209 до 0,152 в пределах всего участка спектра коротковолновой части $\bar{x}(\lambda)$ — кривой сложения ($\lambda_1 = 0{,}42$ *мк*, $\lambda_2 = 0{,}47$ *мк*).

Нетрудно видеть, что эта точка соответствует пересечению оси абсцисс с прямой чистых пурпурных цветов (рис. 2-88,*а*). Прямые, проходящие через эту точку, не определяют строго математически функций сложения с одним максимумом, так как $0{,}195\,\bar{x}(\lambda)$ не компенсирует полностью вторичную ветвь $\bar{x}(\lambda)$. Несмотря на отсутствие полной компенсации второго максимума $\bar{x}(\lambda)$, прямые, проходящие через точку $x = 0{,}1634$; $y = 0$ и не пересекающие локуса цветности однородных излучений, могут иметь вторичные ветви лишь только пренебрежимо малые. Граничными прямыми пучка прямых, удовлетворяющих этому условию, являются:

а) прямая чистых пурпурных цветов с уравнением $y = 0{,}4643x - 0{,}0758$;

б) прямая, касательная к локусу в точке $\lambda = 0{,}462$ *мк*, с уравнением $y = -1{,}219x + 0{,}200$.

Вследствие того, что локус цветности однородных излучений отходит от касательной $y = -1{,}219x + 0{,}200$ как в зоне $\lambda \geqslant 0{,}462$ *мк*, так и в зоне $\lambda < 0{,}462$ *мк*, этой прямой соответствует кривая сложения, имеющая небольшой второй положительный максимум. Для частичного уравновешивания этого второго положительного максимума можно выбрать из пучка такую прямую, которая пересекает локус цветности в двух

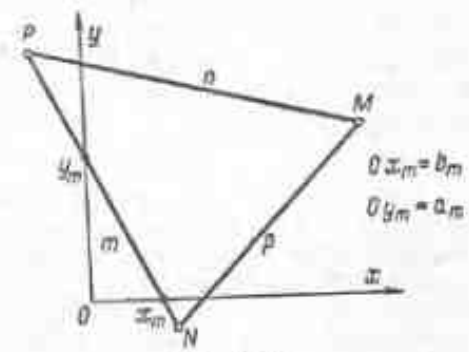
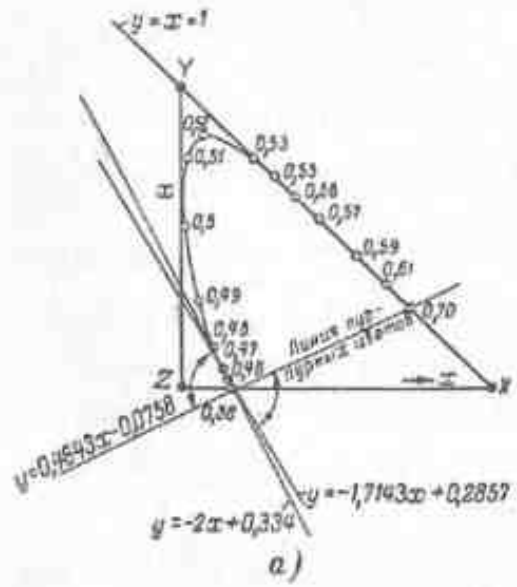
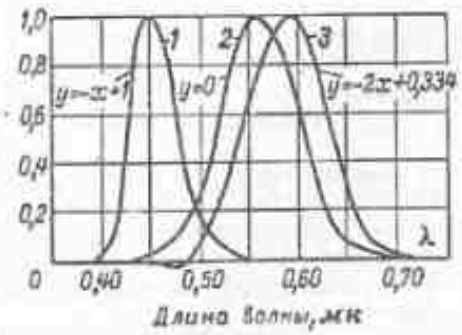


Рис. 2-87.



а)



б)

Рис. 2-88.

точках, близких к $\lambda = 0{,}462$ *мк*, следовательно, соответствует кривой сложения, имеющей небольшие дополнительные положительную и отрицательную ветви. Так, например, на рис. 2-88,*б* приведена кривая сложения $m(\lambda) = 0{,}883\bar{x}(\lambda) + 0{,}333\bar{y}(\lambda) + 0{,}167\bar{z}(\lambda)$, соответствующая уравнению прямой $y = -2{,}00x + 0{,}334$, пересекающая локус цветности в точках $\lambda_1 \approx 0{,}445$ и $\lambda_2 \approx 0{,}485$ *мк*. Эта кривая сложения, принятая приближенно за кривую с одним максимумом, положена в основу построения [Л. 87, 88] фотоэлектронных колориметров с тремя фотоэлементами (§ 2-23). Из схемы расположения пучка прямых, обеспечивающих кривые сложения с одной ветвью (рис. 2-88,*а*), можно видеть, что к этому пучку принадлежит и ось абсцисс, соответствующая кривой $\bar{y}(\lambda)$. Расположение диагонали прямоугольного треугольника диаграммы цветности системы XYZ также гарантирует кривую смешения с одним максимумом, что подтверждается кривой $\bar{z}(\lambda)$. Таким образом, основные цвета системы с кривыми смешения, обладающими пренебрежимо малыми вторыми ветвями, можно выбрать по сторонам треугольника $y = -x + 1$ (сторона z); $y = 0$ (сторона x) или $y = 0{,}4643x - 0{,}0758$ (линия пурпурных цветов) и одной из прямых пучка от $y = -1{,}219x + 0{,}2$ до $y = -2{,}00x + 0{,}334$.

Система *IQY*. Как уже было сказано, для обеспечения совместимости цветной и черно-белой программ телепередачи необходимо в цветной передаче иметь один из трех сигналов соответствующим яркости воспроизводимого цвета. Этот сигнал должен передаваться и приниматься одновременно с двумя другими сигналами, которые в совокупности должны однозначно определять цветность излучения оригинала. Вместе с тем сигнал яркости должен быть независимым от двух остальных, так как он должен обеспечивать телепередачу изображения цветного объекта на экранах приемников черно-белого телевидения в яркостных градациях. Из этих условий следует, что одним из основных цветов совместимой системы телевоспроизведения цветов должен быть Y. В качестве двух других приняты $\frac{Кр - Y}{Y}$ и $\frac{Син - Y}{Y}$, где $Кр$ и $Син$ — основные цвета цветовоспроизводящего устройства совместимой системы телевидения, определяемые спектром излучения люминофоров $Zn_2(PO_4)_2$ и $ZnSAg$. Математическая связь новой системы цветов телепередатчика с системой XYZ и системой телеприемника, имеющей основными цветами $Кр$, $Зел$ и $Син$ — цвета излучений красного, зеленого и синего люминофоров приемной трубки, определяется следующими системами уравнений:

$$\left.\begin{aligned} Кр &= 1{,}712X - 0{,}474Y - 0{,}260Z; \\ Зел &= -0{,}993X + 2{,}010Y - 0{,}030Z; \\ Син &= 0{,}081X - 0{,}167Y + 1{,}280Z. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}146)$$

$$\left.\begin{aligned} Кр - Y &= 1{,}712(X - 0{,}99Y) - 0{,}260(Z - 0{,}85Y); \\ Син - Y &= 0{,}082(X - 0{,}99Y) + 1{,}280(Z - 0{,}85Y); \\ Y &= 0{,}334Кр + 0{,}585Зел + 0{,}081Син. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}147)$$

Так как сигналы, выраженные в величинах $\frac{Кр - Y}{Y}$ и $\frac{Син - Y}{Y}$ определяют цветность, можно их уровни определять точкой на любой диаграмме цветности. В частности, можно на диаграмме xy построить прямые $\frac{Кр - Y}{Y} = \text{const}$ и $\frac{Син - Y}{Y} = \text{const}$. Такая координатная сетка (рис. 2-89) позволит

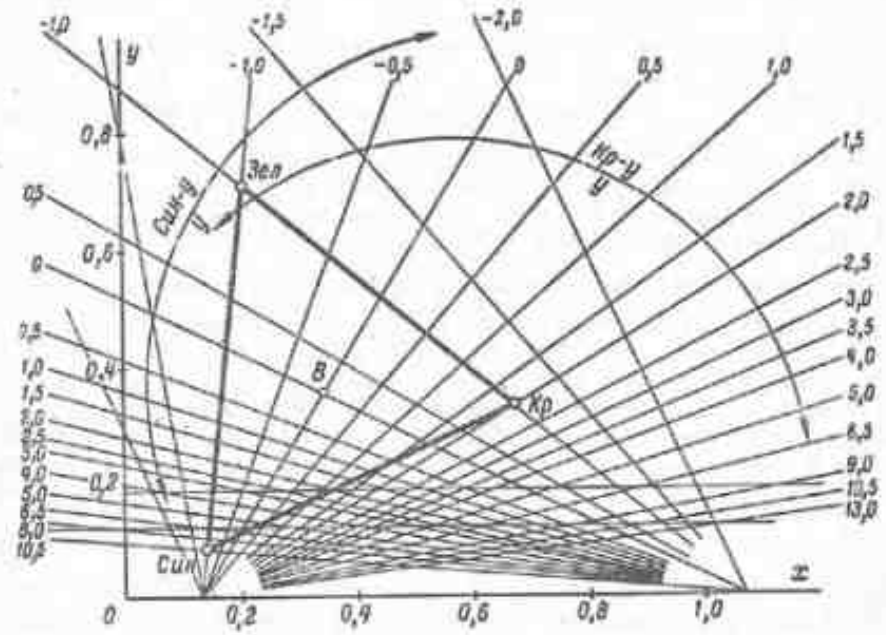


Рис. 2-89.

определять координаты цветности воспроизводимого цвета в новой цветовой системе Y, $\frac{Кр - Y}{Y}$ и $\frac{Син - Y}{Y}$. В том случае, если сигнал цветности $\frac{Кр - Y}{Y} = 0$, система воспроизводит цвета с цветностями на прямой, идущей из точки $x = 0{,}13$; $y = 0$ через точку стандартного белого B с координатами $x = 0{,}348$; $y = 0{,}352$. При отсутствии второго сигнала цветности $\frac{Син - Y}{Y} = 0$ на экране приемника воспроизводятся цветности на прямой, проходящей через точку $x = 1{,}07$; $y = 0$ и ту же точку стандартного белого B. Следовательно, отсутствие двух сигналов цветности соответствует белому цвету B, яркость которого определится уровнем сигнала, пропорционального Y. Координатный треугольник новой цветовой системы в плоскости диаграммы цветности xy изображен на рис. 2-89.

В системе NTSC оба сигнала цветности передаются на одной несущей частоте посредством квадратурной модуляции несущей [Л. 80]. В этом случае сигналы, пропорциональные $\frac{Кр-Y}{Y}$ и $\frac{Син-Y}{Y}$, можно представить в виде двух взаимно-перпендикулярных векторов I и Q. Амплитуда цветовой несущей в этом случае определит модуль результирующего вектора, а ее фаза—угол этого же вектора относительно любого заранее выбранного направления.

В колориметрическом понимании такая трансформация соответствует сечению цветового тела плоскостью, для которой ось x (линия ZX) бесконечно удалена. В этом случае пучки прямых $\frac{Кр-Y}{Y}=\text{const}$ и $\frac{Син-Y}{Y}=\text{const}$ обратятся в два пучка параллельных прямых, взаимно-перпендикулярных друг другу. Начало координат в этой плоскости окажется в точке белого равносигнального (белый B). Цветность любого излучения в этой системе однозначно определится величиной и направлением (принято отсчитывать от $\frac{Кр-Y}{Y}=0$) результирующего вектора $\vec{A}$ (рис. 2-90). Как видно из рисунка, все линии равных углов результирующего вектора $\theta=\text{const}$ проходят через точку равносигнального белого B, следовательно, каждому значению фазы квадратурно модулированной несущей соответствует вполне определенный цветовой тон воспроизводимого цвета. Линии постоянных значений величины вектора $|\vec{A}|=\text{const}$ являются замкнутыми кривыми, следовательно, для каждого цветового тона величина вектора $|\vec{A}|$ определяет чистоту цвета.

Для обеспечения более высокого качества телевоспроизведения цвета желательно, чтобы равным изменениям амплитуды и фазы цветовой несущей, вызываемым помехами и схемными искажениями цвета, соответствовали равные по зрительному ощущению изменения цветности. Выполнение этого условия требует изменения ориентации и формы эллипсов амплитуды модулированных сигналов, что возможно изменением соотношения единичных значений основных цветов $\frac{Кр-Y}{Y}$ и $\frac{Син-Y}{Y}$. В результате сопоставления формы и расположения равнопороговых эллипсов на диаграмме цветности xy (рис. 2-30) было установлено оптимальное соотношение единичных векторов:

$$\frac{Кр-Y}{Y} \text{ и } \frac{Син-Y}{Y}.$$

Трансформированные в соответствии с вновь выбранными величинами основных цветов кривые $|\vec{A}|=\text{const}$, нанесенные на диаграмму цветности xy (рис. 2-91), располагаются большими осями вдоль прямой $\frac{Син-Y}{Y}=0$.

Вследствие того, что ширина полосы частот цветовых сигналов в совместимой системе телевидения ограничена, возникает необходимость передавать некоторые детали изображения с ограничением различия по цветности. Как показал опыт (§ 1-10), способность глаза воспринимать цветность деталей изображения снижается с уменьшением их размеров. По мере уменьшения деталей различение цветоразличающий аппарат глаза из трехкомпонентного как бы превращается в двухкомпонентный, а при очень малых размерах деталей их ощущение становится ахроматичным [Л. 83, 84]. Основными цветами при двухцветном зрении остаются голубой ($\lambda=0{,}49$ мк) и оранжевый ($\lambda=0{,}59$ мк). С учетом этих особенностей цветового зрения ширина полос частот цветовых сигналов принята неодинаковой, причем сигнал с более ши-

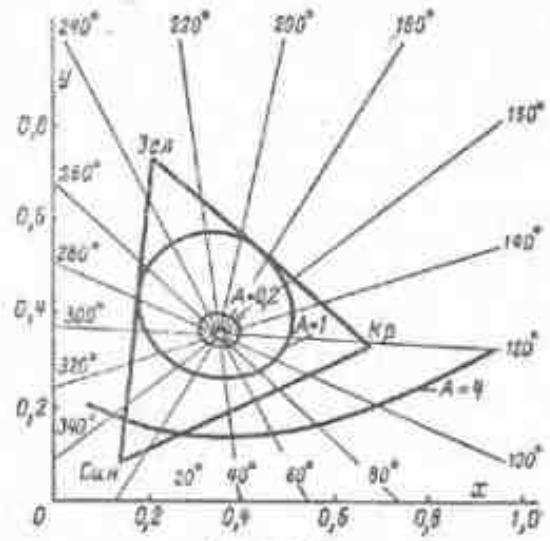


Рис. 2-90.

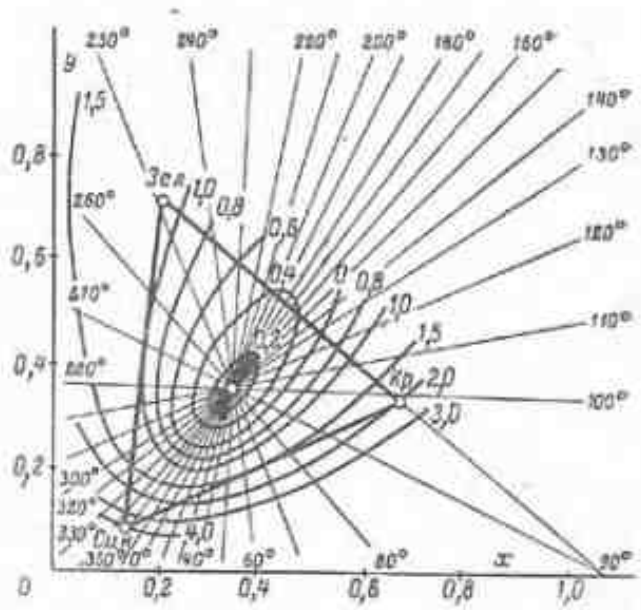


Рис. 2-91.

роким диапазоном частот предназначен для передачи вектора цветности, ориентированного вдоль оси оранжево-голубых излучений. Такой выбор новой оси цветовой системы (рис. 2-92) позволяет по мере уменьшения угловых размеров деталей различения получать информацию о цвете по голубой и оранжевой компонентам, как бы трансформируя график цветности в прямую I. Второй цветовой сигнал в 3 раза более узкой полосы частот пропорционален вектору Q, расположенному под прямым углом к I (рис. 2-92). Начала векторов I и Q находятся в точке равносигнального белого цвета B, так же как и векторов $\frac{Кр-Y}{Y}$ и $\frac{Син-Y}{Y}$, вследствие чего трансформация цветовых систем сводится лишь к повороту осей. Этот поворот осей соответствует разложению результирующего вектора $\vec{A}$ на оси I и Q. Учитывая сдвиг оси Q относительно оси $\frac{Син-Y}{Y}$ на 34°, соотношение основных цветов двух систем имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} Q &= (Кр-Y)\sin 34^\circ + \frac{Син-Y}{2{,}7}\cos 34^\circ; \\ I &= (Кр-Y)\cos 34^\circ + \frac{Син-Y}{2{,}7}\sin 34^\circ. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}148)$$

Подставляя значения $\sin 34^\circ = 0{,}559$ и $\cos 34^\circ = 0{,}829$ и решая совместно уравнения (2-147) и (2-148), получим систему уравнений, определяющих три основных цвета системы NTSC в системе *Кр*, *Зел*, *Син*:

$$\left.\begin{aligned} I &= 0{,}621\,Кр - 0{,}364\,Зел - 0{,}257\,Син; \\ Q &= 0{,}269\,Кр - 0{,}507\,Зел - 0{,}238\,Син; \\ Y &= 0{,}334\,Кр + 0{,}585\,Зел + 0{,}081\,Син. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}149)$$

Эта система уравнений лежит в основе матричных схем, предназначенных вести преобразование координат цвета с цветовой системы передатчика на систему приемника. Все приведенные расчетные соотношения даны без учета искажений, неизбежно возникающих в результате многократных преобразований (рис. 2-84). Коррекция искажений цветности производится методом раздельного усиления трех каналов цветовоспроизводящей телесистемы. Методы коррекции всевозможных искажений достаточно подробно рассмотрены в отечественной литературе [Л. 78—80].

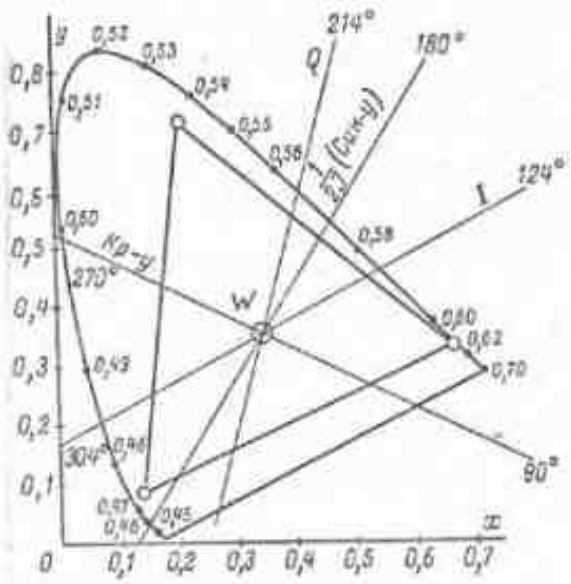


Рис. 2-92.

2-23. Основные принципы измерения цвета

Визуальное измерение цвета. Приборы, предназначенные для измерения цвета излучения, принято называть колориметрами. *Колориметры* в зависимости от применяемого в них приемника бывают *визуальные* или *фотоэлектрические*. В визуальных колориметрах цвет исследуемого излучения сопоставляется на основе зрительного ощущения с цветом, воспроизводимым тремя основными цветами колориметра. В зависимости от способа воспроизведения визуальные колориметры делятся на две группы:

а) *аддитивные колориметры;*

б) субтрактивные колориметры.

В визуальных колориметрах наблюдатель должен установить колориметрическое равенство по зрительному ощущению двух частей поля зрения (поле исследуемого излучения и поле сравнения) с помощью фотометрического кубика (§ 2-13). Поля исследуемого излучения и сравнения, сопоставляемые визуально по яркости и цветности, должны находиться в оптическом контакте, обеспечиваемом с помощью фотометрического кубика или какого-либо другого оптического устройства. Для обеспечения участия колбочкового цветовоспринимающего аппарата размер поля зрения колориметра должен быть 1,5—2° и его яркость не менее 5—10 *нт*.

В аддитивных колориметрах поле сравнения освещается оптической смесью трех цветных излучений, получаемых фильтрацией излучения лампы сравнения тремя разделяющими фильтрами: красным, зеленым и синим. Характерным примером современного аддитивного колориметра может служить колориметр Гилда, описание схемы которого было приведено в § 2-6.

Простейшим аддитивным колориметром является *диск Максвелла*, использованный им для исследования законов оптического смешения цветов наряду с прибором, описанным ранее (§ 2-3). Диск Максвелла, состоящий из трех разноцветных (красный, зеленый и синий) и белого секторов приводится во вращение, обеспечивающее слитное восприятие цвета вращающихся секторов. Белый сектор применяется для уменьшения чистоты смеси трех основных цветов, если исследуемый цвет обладает малой чистотой. В центральной части диска (рис. 2-93) располагается меньший диск, цвет отраженного излучения от которого требуется исследовать. Цвет исследуемого излучения определяется угловым размером секторов, расположенных в поле сравнения. Если цвета секторов выражены через основные цвета системы XYZ, диск можно применять для приближенного определения координат цвета отраженного излучения в международной цветовой системе. Для уменьшения яркости исследуемого цвета, выкраска которого имеет высокий коэффициент отражения, в центральном поле диска приходится применять черный сектор. Коэффициент отражения этого сектора должен быть минимальным для обеспечения постоянства чистоты исследуемого цвета.

В СССР наиболее распространенным визуальным колориметром является колориметр Демкиной [Л. 85, 86], в котором лампа мощностью до 300 *вт*, помещенная в диффузно отражающий цилиндр, служит источником сравнения *Ис* (рис. 2-94). Отверстие *О* этого отражателя, через которое выходит световой поток наружу, проектируется линзой *Л* на экран сравнения *ЭС*. Перед линзой *Л* на пути пучка лучей, идущего из осветителя, распо-

ложены три секторных фильтра *СФ* (красный, зеленый и синий). Каждый из этих трех фильтров может частично или полностью перекрываться секторной диафрагмой, передвигаемой наблюдателем отдельно для каждого фильтра. Соотношение площадей раскрытия трех фильтров, регулируемое положением трех диафрагм, определяет цветность смеси излучений, падающих на экран сравнения. Цвет излучения, отраженного от белого матового экрана сравнения, сопоставляется наблюдателем с цветом исследуемого излучения через окуляр *Ок* с помощью фотометри-

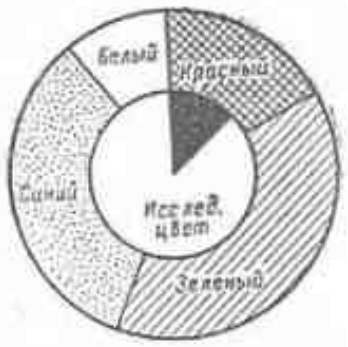


Рис. 2-93.

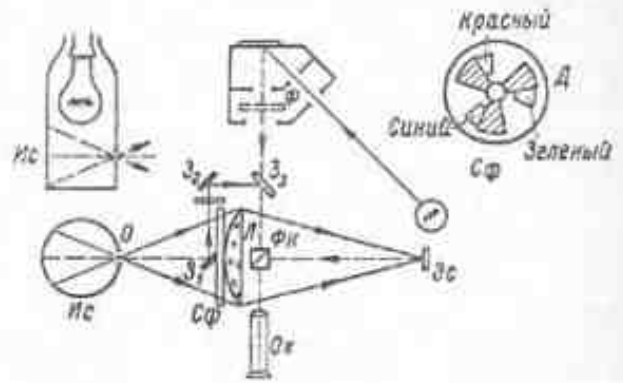


Рис. 2-94.

ческого кубика *ФК*. В тех случаях, когда цвет исследуемого излучения невозможно воспроизвести тремя основными цветами колориметра, пользуются способом разбавления исследуемого цвета. Разбавление исследуемого цвета осуществляется пучком лучей, отведенным от пучка света источника сравнения зеркалами $З_1$, $З_2$ и $З_3$. Последнее из зеркал, расположенное по пути пучка исследуемого излучения, является прозрачной плоско-параллельной стеклянной пластинкой, отражающей около 10% потока, идущего от зеркала $З_2$. Вследствие большой прозрачности этой плоско-параллельной пластинки $З_3$ ослабление ею исследуемого излучения невелико и учитывается при градуировке колориметра. По пути разбавляющего пучка лучей можно вводить светофильтр *Ф* — нейтральный или цветной в зависимости от условий измерения.

В субтрактивных колориметрах воспроизведение исследуемого цвета на поле сравнения осуществляется фильтрацией излучения источника сравнения с помощью трех цветных клиньев, последовательно расположенных на пути пучка лучей сравнения. Характерным примером колориметра этого типа является цветовой денситометр, схема которого приведена на рис. 2-77.

Градуировка визуальных колориметров осуществляется путем экспериментального определения координат основных цветов колориметра *Кр*, *Зел*, *Син* в международной системе координат *XYZ*.

Как известно (2-44), эта задача содержит девять неизвестных:

$$\left.\begin{aligned} Кр &= x'_к X + y'_к Y + z'_к Z; \\ Зел &= x'_з X + y'_з Y + z'_з Z; \\ Син &= x'_с X + y'_с Y + z'_с Z. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}150)$$

Градуировка колориметров может производиться несколькими способами, каждый из которых достаточно подробно изложен в курсе «Фотометрия». В наиболее распространенном способе градуировки, называемом способом трех фильтров, производится измерение цвета излучения источника A, прошедшего через три эталонных фильтра с заданными кривыми $\tau(\lambda)$. Три измерения записываются цветовыми уравнениями, в которых в качестве координат цвета приняты углы раскрытия секторных диафрагм. Решая эти уравнения относительно трех основных цветов колориметра, получим:

$$Кр = \begin{vmatrix} \Phi_1 з'_1 с'_1 \\ \Phi_2 з'_2 с'_2 \\ \Phi_3 з'_3 с'_3 \end{vmatrix} : D; \quad Зел = \begin{vmatrix} к'_1 \Phi_1 с'_1 \\ к'_2 \Phi_2 с'_2 \\ к'_3 \Phi_3 с'_3 \end{vmatrix} : D; \quad Син = \begin{vmatrix} к'_1 з'_1 \Phi_1 \\ к'_2 з'_2 \Phi_2 \\ к'_3 з'_3 \Phi_3 \end{vmatrix} : D, \qquad (2\text{-}151)$$

где $к'_1, з'_1, с'_1 \ldots к'_3, з'_3, с'_3$ — площади раскрытия диафрагм красного, зеленого и синего фильтров колориметра при измерении каждого из трех фильтров (номер фильтра обозначен индексом снизу);

Φ_1, Φ_2, Φ_3 — цвета измеряемых излучений, прошедших через три эталонных фильтра.

Обязательным условием линейной независимости цветов Φ_1, Φ_2 и Φ_3 является следующее неравенство:

$$D = \begin{vmatrix} к'_1 & з'_1 & с'_1 \\ к'_2 & з'_2 & с'_2 \\ к'_3 & з'_3 & с'_3 \end{vmatrix} \neq 0.$$

В дальнейших расчетах можно пренебречь постоянным делителем, общим для каждого корня уравнения.

После замены в каждом определителе (2-151) значений измеренных цветов Φ_1, Φ_2 и Φ_3 их уравнениями в системе *XYZ*, полученными расчетом по заданным кривым $\tau(\lambda)$ и $\varphi(\lambda)$ стандартного излучения, и разложения каждого определителя на три слагаемых, исходя из начального равенства (2-150), будем иметь окончательное решение:

$$x'_к = \begin{vmatrix} x'_1 з'_1 с'_1 \\ x'_2 з'_2 с'_2 \\ x'_3 з'_3 с'_3 \end{vmatrix}; \quad y'_к = \begin{vmatrix} y'_1 з'_1 с'_1 \\ y'_2 з'_2 с'_2 \\ y'_3 з'_3 с'_3 \end{vmatrix}; \quad z'_к = \begin{vmatrix} z'_1 з'_1 с'_1 \\ z'_2 з'_2 с'_2 \\ z'_3 з'_3 с'_3 \end{vmatrix};$$

$$x'_з = \begin{vmatrix} к'_1 x'_1 с'_1 \\ к'_2 x'_2 с'_2 \\ к'_3 x'_3 с'_3 \end{vmatrix}; \quad y'_з = \begin{vmatrix} к'_1 y'_1 с'_1 \\ к'_2 y'_2 с'_2 \\ к'_3 y'_3 с'_3 \end{vmatrix}; \quad z'_з = \begin{vmatrix} к'_1 z'_1 с'_1 \\ к'_2 z'_2 с'_2 \\ к'_3 z'_3 с'_3 \end{vmatrix};$$

$$x'_c = \begin{vmatrix} \kappa'_1 s'_1 x'_1 \\ \kappa'_2 s'_2 x'_2 \\ \kappa'_3 s'_3 x'_3 \end{vmatrix}; \quad y'_c = \begin{vmatrix} \kappa'_1 s'_1 y'_1 \\ \kappa'_2 s'_2 y'_2 \\ \kappa'_3 s'_3 y'_3 \end{vmatrix}; \quad z'_c = \begin{vmatrix} \kappa'_1 s'_1 z'_1 \\ \kappa'_2 s'_2 z'_2 \\ \kappa'_3 s'_3 z'_3 \end{vmatrix}.$$

где x'_1, y'_1, z'_1 ... $x'_3 y'_3 z'_3$ — расчётные значения координат цветов Φ_1, Φ_2 и Φ_3 в системе XYZ.

Фотоэлектрическое измерение цвета. В фотоэлектрических колориметрах приемниками служат фотоэлементы, спектральная чувствительность которых корригирована при помощи исправляющих фильтров под кривые сложения той колориметрической системы, в которой производятся измерения [Л. 87]. Обычно этой системой является международная система XYZ. В этой системе с достаточно высокой точностью спектральная чувствительность селеновых фотоэлементов с запирающим слоем корригируется под кривые $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$, имеющие по одному максимуму. Подбор исправляющих фильтров для коррекции чувствительности селенового фотоэлемента применительно к функции $\bar{x}(\lambda)$ затруднен наличием в ней двух максимумов. Достаточно точного решения этой задачи можно достичь применением двух фотоэлементов, один из которых должен иметь корригированную кривую $\bar{x}(\lambda)$ в области $\lambda \geqslant \geqslant 0{,}505$ *мк*, а другой — в области $\lambda \leqslant 0{,}505$ *мк*. В этом случае токи четырех фотоэлементов[1] определят координаты измеряемого цвета:

$$i_y = \int \varphi(\lambda)\, \tau_y(\lambda)\, g(\lambda)\, d(\lambda) = c_y \int \varphi(\lambda)\, \bar{y}(\lambda)\, d\lambda;$$

$$i_z = \int \varphi(\lambda)\, \tau_z(\lambda)\, g(\lambda)\, d\lambda = c_z \int \varphi(\lambda)\, \bar{z}(\lambda)\, d\lambda;$$

$$i_x = i'_x + i''_x = \int \varphi(\lambda)\, \tau'_x(\lambda)\, g(\lambda)\, d\lambda + \int \varphi(\lambda)\, \tau''_x(\lambda)\, g(\lambda)\, d\lambda = c_x \int \varphi(\lambda)\, \bar{x}(\lambda)\, d\lambda,$$

где $\tau_y(\lambda)$, $\tau_z(\lambda)$, $\tau'_x(\lambda)$ и $\tau''_x(\lambda)$ — спектральные характеристики исправляющих фильтров для каждого из четырех фотоэлементов колориметра;

$\varphi(\lambda)$ — спектральная интенсивность излучения, цвет которого измеряется;

[1] Для устранения влияния различия нестабильности у четырех различных фотоэлементов колориметра их часто заменяют одним со сменными исправляющими фильтрами. В этом случае измерение цвета осуществляется раздельно по компонентам.

i'_x, i''_x, i_y и i_z — токи четырех фотоэлементов, освещаемых измеряемым излучением;

c_y, c_z, c'_x и c''_x — градуировочные коэффициенты.

Трудности точного подбора исправляющих фильтров применительно к кривым $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ приводят к приближенным решениям, снижающим точность измерения. Устранение причин этих погрешностей возможно при помощи применения трех фотоэлементов, функции спектральной чувствительности которых с исправляющими фильтрами выбраны произвольно в пределах, ограниченных некоторыми условиями. Эти условия определяют расположение основных цветов новой цветовой системы, характеризуемых произвольными кривыми сложения $\tau_m(\lambda)\, g(\lambda)$, $\tau_n(\lambda)\, g(\lambda)$ и $\tau_p(\lambda)\, g(\lambda)$. Согласно закону Грассмана эти цвета должны быть линейно независимы, а также охват цветовой системы, основанной на этих цветах, был бы достаточным.

Согласно (2-44) связь между удельными координатами новой и международной системами определится как

$$\left.\begin{aligned} \bar{m}(\lambda) &= \tau_m(\lambda)\, g(\lambda) = a_{11}\bar{x}(\lambda) + a_{12}\bar{y}(\lambda) + a_{13}\bar{z}(\lambda); \\ \bar{n}(\lambda) &= \tau_n(\lambda)\, g(\lambda) = a_{21}\bar{x}(\lambda) + a_{22}\bar{y}(\lambda) + a_{23}\bar{z}(\lambda); \\ \bar{p}(\lambda) &= \tau_p(\lambda)\, g(\lambda) = a_{31}\bar{x}(\lambda) + a_{32}\bar{y}(\lambda) + a_{33}\bar{z}(\lambda). \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}152)$$

В этом случае токи трех фотоэлементов i_m, i_n и i_p не определят непосредственно координаты цвета в международной системе, а будут равны линейной комбинации искомых координат:

$$\left.\begin{aligned} c_m i_m &= a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}z'; \\ c_n i_n &= a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}z'; \\ c_p i_p &= a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z', \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}153)$$

где c_m, c_n и c_p — коэффициенты пропорциональности между координатами измеряемого цвета и фототоками каждого из трех фотоэлементов.

Сопоставляя изложенный метод измерения цвета с измерением при помощи визуального колориметра, можно видеть полное соответствие их принципов. Вследствие этого градуировку фотоэлектрического колориметра с тремя приемниками произвольно выбранной спектральной чувствительности следует производить аналогично градуировке визуальных колориметров.

Для упрощения перерасчета результатов измерения на цветовые координаты международной системы, а также для возможности непосредственного измерения одним из трех фотоэлементов количественной характеристики цвета принято две кривые сложения цветовой системы колориметра оставлять такими же, как в системе XYZ (рис. 2-19). Как было показано ранее (§ 2-22), каждая из кривых сложения определяется ориентацией стороны цветового треугольника, расположенного против точки основного цвета, соответствующего искомой кривой, определяемой уравнением (2-145,а).

Из множества возможных ориентаций стороны треугольника, лежащей против точки красного основного цвета, некоторые характеризуют кривую сложения красного основного цвета с пренебрежимо малыми вторыми ветвями (рис. 2-88,б). К числу таких ориентаций следует отнести прямую $y=-2{,}00x+0{,}334$, пересекающую локус цветности однородных излучений в точках $\lambda_1=0{,}445$ *мк* и $\lambda_2=0{,}485$ *мк* (§ 2-22). Кривую сложения, соответствующую этому расположению прямой m, можно выразить следующим уравнением [1]:

$$\overline{m}(\lambda)=0{,}833\overline{x}(\lambda)+0{,}333\overline{y}(\lambda)+0{,}167\overline{z}(\lambda). \qquad (2\text{-}154)$$

Оставляя две другие кривые смешения без изменения:

$$\left.\begin{aligned}\overline{n}(\lambda)&=\overline{y}(\lambda);\\ \overline{p}(\lambda)&=\overline{z}(\lambda),\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}154а)$$

получим новую колориметрическую систему с основными цветами M, N и P. Для определения основных цветов новой системы воспользуемся уравнениями ее кривых смешения (2-154) и (2-154а). Используя эти уравнения для установления соотношения координат любого цвета в новой MNP и прежней XYZ системах, напишем выражения прежних координат через новые для произвольно выбранного цвета:

$$\left.\begin{aligned}x'&=1{,}2m'-0{,}4n'+0{,}2p';\\ y'&=n';\\ z'&=p',\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}155)$$

так как согласно (2-154)

$$\overline{x}(\lambda)=1{,}2\overline{m}(\lambda)-0{,}4\overline{n}(\lambda)+0{,}2\overline{p}(\lambda).$$

По условию Мак-Адама (§ 2-22) вторая сторона нового цветового треугольника совпадает с гипотенузой $z=0$ и третья —

[1] Выбор основного красного цвета с кривой смешения, определяемой уравнением (2-154), был предложен Д. А. Шкловером [Л. 87—89].

с катетом $y=0$ в соответствии с (2-154а). Согласно (2-44) и (2-155) новые основные цвета определяются следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned}M&=1{,}2X;\\ N&=-0{,}4X+1{,}0Y;\\ P&=0{,}2X+1{,}0Z.\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}156)$$

Положение новых основных цветов на диаграмме цветности международной системы (рис. 2-95) определим, задавшись отношением единичных значений белого цвета в прежней и новой системах координат (2-37). Приняв $q=0{,}833$, что соответствует

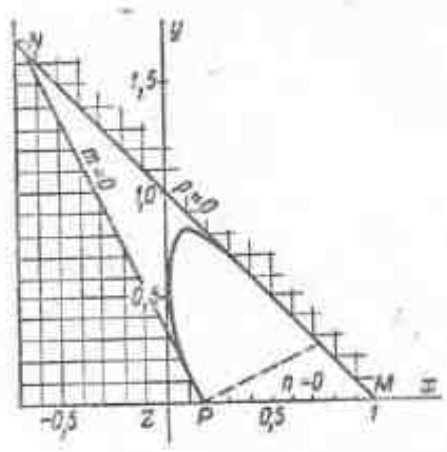


Рис. 2-95.

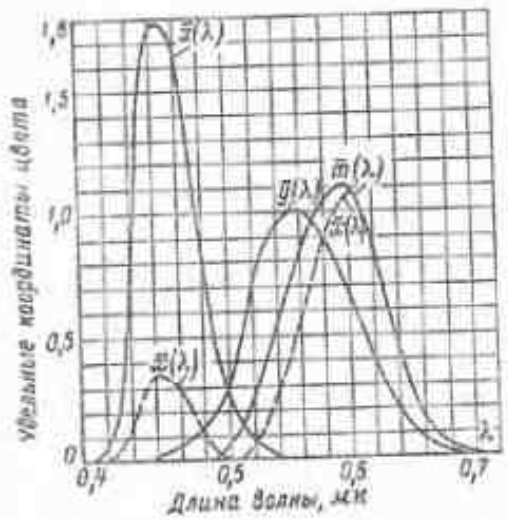


Рис. 2-96.

равенству векторов основных цветов $\vec{X}$ и $\vec{M}$, получим: $M\,(x_M=1;\ y_M=0)$; $N\,(x_N=-0{,}667;\ y_N=1{,}667)$ и $P\,(x_P=0{,}167;\ y_P=0)$.

Кривые сложения основных цветов новой системы, определяемые (2-154) и (2-154а), представлены на рис. 2-96.

Подобрав градуировку колориметра [1] так, чтобы каждый из трех коэффициентов пропорциональности (2-153) был равен единице:

$$c_m=c_n=c_p=1,$$

[1] На выбор градуировочных коэффициентов c_m, c_n и c_p можно влиять изменением площади фотоэлементов с помощью диафрагм.

получим согласно (2-155):

$$\left.\begin{aligned} x' &= 1{,}2i_m - 0{,}4i_y + 0{,}2i_z; \\ y' &= i_y; \\ z' &= i_z, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}157)$$

где i_m, $i_y = i_n$ и $i_z = i_p$ — токи трех фотоэлементов колориметра с корригированными спектральными чувствительностями $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$.

Координаты цветности измеряемого излучения определятся согласно (2-157) как

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1{,}2i_m - 0{,}4i_y + 0{,}2i_z}{1{,}2i_m + 0{,}6i_y + 1{,}2i_z}; \\ y &= \frac{i_y}{1{,}2i_m + 0{,}6i_y + 1{,}2i_z}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}158)$$

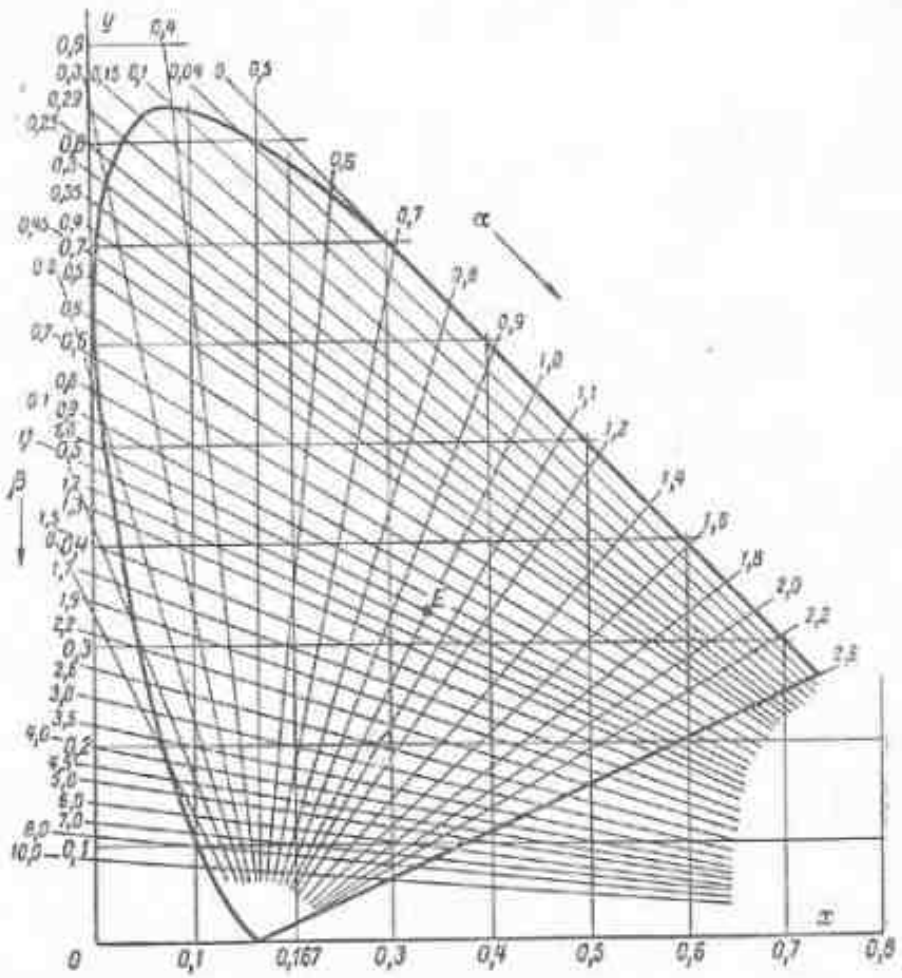


Рис. 2-97.

Д. А. Шкловер [Л. 89] показал, что для непосредственного отсчета цветности измеряемого излучения по шкале прибора удобнее пользоваться шкалами отношений токов:

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{i_m}{i_y} = \frac{m'}{y'}; \\ \beta &= \frac{i_z}{i_y} = \frac{z'}{y'}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}159)$$

Подставляя в (2-159) значение m' из (2-154) и заменяя $z = 1 - x - y$, получим:

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{x + 0{,}5y - 0{,}167}{y}; \\ \beta &= \frac{1 - x - y}{y}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}160)$$

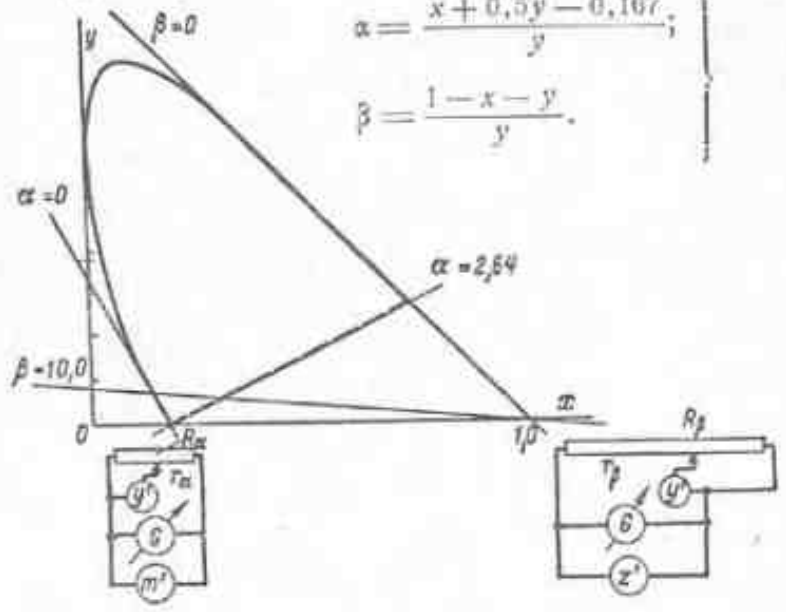


Рис. 2-98.

Как можно видеть из полученных уравнений (2-160), линии равных значений α и β объединены в два пучка прямых (рис. 2-97) с полюсами в точке ($x = 0{,}167$; $y = 0$) — для прямых $\alpha = \text{const}$ и в точке ($x = 1$; $y = 0$) — для прямых $\beta = \text{const}$.

Как следует из (2-159), каждая из прямых $\alpha = \text{const}$ или $\beta = \text{const}$ соответствует постоянству отношения уровней возбуждения двух из трех цветовоспринимающих приемников колориметра.

Измерение отношения токов α и β осуществляется мостиковыми схемами с нулевыми гальванометрами G (рис. 2-98). Фототоки приемников со спектральными чувствительностями $\bar{m}(\lambda)$ и $\bar{y}(\lambda)$ компенсируются на потенциометре R_α, а приемников $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{y}(\lambda)$ — на потенциометре R_β. При внутреннем сопротив-

лении фотоэлементов, значительно большем сопротивлений R_α и R_β, нулевое показание α и β гальванометров определится следующими равенствами:

$$\left.\begin{aligned}\alpha &= \frac{i_m}{i_y} = \frac{r_\alpha}{R_\alpha};\\ \beta &= \frac{i_z}{i_y} = \frac{r_\beta}{R_\beta}.\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}161)$$

Из (2-161) следует, что отношения фототоков определятся положением движков потенциометров R_α и R_β, расположенных параллельно оси x диаграммы цветности. Пересечение найденных прямых $\alpha=\text{const}$ и $\beta=\text{const}$ однозначно определит на диаграмме цветность измеряемого излучения. В фотоэлектрическом колориметре с непосредственным отсчетом КНО-3, разработанным во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте на основе описанной принципиальной схемы, компенсация каждого из трех фототоков осуществляется током селенового выпрямителя, на который подается стабилизированное напряжение. Некоторое усложнение электрической схемы и наличие стабилизированного источника тока компенсации позволили применить в колориметре один фотоэлемент со сменными фильтрами, что способствовало повышению точности измерений.

ТАБЛИЦА П-1

УДЕЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ ЦВЕТА И КООРДИНАТЫ ЦВЕТНОСТИ ОДНОРОДНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ *RGB*

Удельные координаты цвета			Длина волны λ, мк	Координаты цветности		
$\bar{r}_\lambda$	$\bar{g}_\lambda$	$\bar{b}_\lambda$		r_λ	g_λ	b_λ
0,0000	0,0000	0,0012	0,380	0,0272	—0,0115	0,9843
0,0001	0,0000	0,0056	0,390	0,0263	—0,0114	0,9851
0,0003	—0,0001	0,0121	0,400	0,0247	—0,0112	0,9865
0,0008	—0,0004	0,0371	0,410	0,0225	—0,0109	0,9884
0,0021	—0,0011	0,1154	0,420	0,0181	—0,0094	0,9913
0,0022	—0,0012	0,2477	0,430	0,0088	—0,0048	0,9960
0,0026	0,0015	0,3123	0,440	—0,0084	0,0048	1,0036
—0,0121	0,0068	0,3167	0,450	—0,0390	0,0218	1,0172
—0,0261	0,0148	0,2982	0,460	—0,0809	0,0517	1,0392
—0,0393	0,0254	0,2299	0,470	—0,1821	0,1175	1,0646
—0,0494	0,0391	0,1449	0,480	—0,3667	0,2906	1,0761
—0,0581	0,0569	0,0826	0,490	—0,7150	0,6996	1,0154
—0,0717	0,0854	0,0478	0,500	—1,1685	1,3905	0,7780
—0,0890	0,1285	0,0270	0,510	—1,3371	1,9318	0,4053
—0,0926	0,1747	0,0122	0,520	—0,9830	1,8534	0,1296
—0,0710	0,2032	0,0055	0,530	—0,5139	1,4761	0,0398
—0,0315	0,2147	0,0015	0,540	—0,1707	1,1628	0,0079
0,0228	0,2118	—0,0006	0,550	0,0974	0,9051	—0,0025
0,0906	0,1970	—0,0013	0,560	0,3164	0,6881	—0,0045
0,1677	0,1709	—0,0014	0,570	0,4973	0,5057	—0,0040
0,2453	0,1361	—0,0011	0,580	0,6449	0,3579	—0,0028
0,3003	0,0975	—0,0008	0,590	0,7617	0,2402	—0,0019
0,3443	0,0625	—0,0005	0,600	0,8475	0,1537	—0,0012
0,3397	0,0356	—0,0003	0,610	0,9059	0,0949	—0,0008
0,2971	0,0183	—0,0002	0,620	0,9425	0,0580	—0,0005
0,2268	0,0083	—0,0001	0,630	0,9649	0,0354	—0,0003
0,1597	0,0033	—0,0000	0,640	0,9797	0,0205	—0,0002
0,1017	0,0012		0,650	0,9888	0,0113	—0,0001
0,0593	0,0004		0,660	0,9940	0,0061	—0,0001
0,0315	0,0001		0,670	0,9966	0,0035	—0,0001
0,0169	0,0000		0,680	0,9984	0,0016	—0,0000
0,0082			0,690	0,9996	0,0004	
0,0041			0,700	1,0000	0,0000	
0,0021			0,710	1,0000		
0,0010			0,720	1,0000		
0,0005			0,730	1,0000		
0,0002			0,740	1,0000		
0,0001			0,750	1,0000		
0,0001			0,760	1,0000		
0,0000			0,770	1,0000		

ТАБЛИЦА П-2

УДЕЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ ЦВЕТА И КООРДИНАТЫ ЦВЕТНОСТИ ОДНОРОДНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ *XYZ*

Удельные координаты цвета			Длина волны λ, мк	Координаты цветности		
$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$		x_λ	y_λ	z_λ
0,0014	0,0000	0,0065	0,380	0,1714	0,0050	0,8209
0,0042	0,0001	0,0210	0,390	0,1738	0,0048	0,8213
0,0143	0,0004	0,0679	0,400	0,1733	0,0048	0,8219
0,0435	0,0012	0,2074	0,410	0,1726	0,0048	0,8226
0,1344	0,0040	0,6456	0,420	0,1714	0,0051	0,8235
0,2839	0,0116	1,3856	0,430	0,1689	0,0069	0,8242
0,3483	0,0230	1,7471	0,440	0,1614	0,0109	0,8247
0,3362	0,0380	1,7721	0,450	0,1569	0,0177	0,8257
0,2908	0,0600	1,6592	0,460	0,1440	0,0297	0,8263
0,1954	0,0910	1,2876	0,470	0,1241	0,0578	0,8181
0,0956	0,1390	0,8130	0,480	0,0913	0,1327	0,7760
0,0320	0,2080	0,4652	0,490	0,0454	0,6596	0,6396
0,0049	0,3230	0,2720	0,500	0,0082	0,5384	0,4534
0,0093	0,5030	0,1582	0,510	0,0139	0,5702	0,2359
0,0633	0,7100	0,0782	0,520	0,0743	0,8338	0,0919
0,1655	0,8620	0,0422	0,530	0,1547	0,8059	0,0394
0,2904	0,9540	0,0203	0,540	0,2296	0,7543	0,0161
0,4334	0,9950	0,0087	0,550	0,3016	0,6923	0,0061
0,5945	0,9950	0,0039	0,560	0,3731	0,6245	0,0024
0,7621	0,9520	0,0021	0,570	0,4441	0,5547	0,0012
0,9163	0,8700	0,0017	0,580	0,5125	0,4866	0,0009
1,0263	0,7570	0,0011	0,590	0,5725	0,4242	0,0006
1,0622	0,6310	0,0008	0,600	0,6270	0,3725	0,0005
1,0026	0,5030	0,0003	0,610	0,6658	0,3340	0,0002
0,8544	0,3810	0,0002	0,620	0,6915	0,3083	0,0002
0,6424	0,2650	0,0000	0,630	0,7079	0,2920	0,0001
0,4479	0,1750	0,0000	0,640	0,7190	0,2810	0,0001
0,2835	0,1070	0,0000	0,650	0,7260	0,2740	
0,1649	0,0610		0,660	0,7300	0,2700	
0,0874	0,0320		0,670	0,7320	0,2680	
0,0468	0,0170		0,680	0,7334	0,2666	
0,0227	0,0082		0,690	0,7344	0,2656	
0,0114	0,0041		0,700	0,7347	0,2653	
0,0058	0,0021		0,710	0,7347	0,2653	
0,0029	0,0010		0,720	0,7347	0,2653	
0,0014	0,0005		0,730	0,7347	0,2653	
0,0007	0,0003		0,740	0,7347	0,2653	
0,0003	0,0001		0,750	0,7347	0,2653	
0,0002	0,0001		0,760	0,7347	0,2653	
0,0001	0,0000		0,770	0,7347	0,2653	
			0,780	0,7347	0,2653	

ТАБЛИЦА П-3

ИЗБРАННЫЕ ОРДИНАТЫ ПО ХАРДИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦВЕТА ОТРАЖЕННОГО И ПРОШЕДШЕГО ИЗЛУЧЕНИЙ

№ ординат	Источники незадолго до цвета												№ ординат
	E			B			C			A			
	λ_x	λ_y	λ_z	λ_x	λ_y	λ_z	λ_x	λ_y	λ_z	λ_x	λ_y	λ_z	
1	0,426	0,472	0,415	0,426	0,472	0,415	0,425	0,466	0,414	0,410	0,479	0,416	1
2	0,427	0,485	0,433	0,427	0,485	0,433	0,425	0,490	0,422	0,420	0,480	0,425	2
3	0,427	0,515	0,457	0,427	0,515	0,457	0,425	0,501	0,430	0,424	0,515	0,429	3
4*	0,426	0,472	0,481	0,426	0,472	0,481	0,425	0,509	0,433	0,425	0,509	0,433	4*
5	0,426	0,515	0,493	0,426	0,515	0,493	0,425	0,521	0,461	0,425	0,521	0,461	5
6	0,425	0,493	0,525	0,425	0,493	0,525	0,424	0,529	0,474	0,424	0,529	0,474	6
7*	0,425	0,530	0,539	0,425	0,530	0,539	0,424	0,536	0,484	0,423	0,536	0,484	7*
8	0,425	0,534	0,549	0,425	0,534	0,549	0,423	0,543	0,494	0,422	0,543	0,494	8
9	0,761	0,438	0,443	0,552	0,438	0,443	0,439	0,534	0,486	0,446	0,548	0,486	9
10*	0,760	0,512	0,444	0,549	0,512	0,444	0,441	0,538	0,496	0,448	0,552	0,496	10*
11	0,673	0,545	0,446	0,544	0,545	0,446	0,443	0,542	0,505	0,450	0,555	0,505	11
12	0,577	0,549	0,459	0,543	0,549	0,459	0,445	0,545	0,514	0,451	0,559	0,514	12
13*	0,584	0,552	0,462	0,542	0,552	0,462	0,447	0,548	0,523	0,453	0,563	0,523	13*
14	0,588	0,556	0,464	0,544	0,556	0,464	0,449	0,552	0,533	0,455	0,567	0,533	14
15	0,588	0,559	0,466	0,547	0,559	0,466	0,451	0,555	0,543	0,457	0,571	0,543	15
16	0,592	0,563	0,469	0,551	0,563	0,469	0,453	0,559	0,553	0,459	0,575	0,553	16
17*	0,594	0,565	0,471	0,554	0,565	0,471	0,455	0,562	0,563	0,461	0,579	0,563	17*
18	0,597	0,568	0,474	0,558	0,568	0,474	0,457	0,565	0,573	0,463	0,582	0,573	18
19	0,598	0,572	0,476	0,562	0,572	0,476	0,459	0,568	0,583	0,465	0,586	0,583	19
20*	0,601	0,575	0,479	0,565	0,575	0,479	0,461	0,571	0,593	0,467	0,589	0,593	20*
21	0,604	0,579	0,481	0,569	0,579	0,481	0,463	0,574	0,603	0,469	0,593	0,603	21
22	0,607	0,582	0,484	0,572	0,582	0,484	0,465	0,577	0,613	0,471	0,597	0,613	22
23*	0,611	0,586	0,486	0,576	0,586	0,486	0,467	0,580	0,623	0,473	0,600	0,623	23*
24	0,614	0,589	0,489	0,579	0,589	0,489	0,469	0,583	0,633	0,475	0,604	0,633	24
25	0,618	0,593	0,491	0,583	0,593	0,491	0,471	0,587	0,643	0,477	0,608	0,643	25
26*	0,622	0,596	0,494	0,587	0,596	0,494	0,474	0,590	0,653	0,479	0,611	0,653	26*
27	0,627	0,604	0,496	0,591	0,604	0,496	0,476	0,594	0,663	0,481	0,615	0,663	27
28	0,632	0,611	0,499	0,596	0,611	0,499	0,478	0,597	0,673	0,483	0,619	0,673	28
29*	0,633	0,619	0,501	0,600	0,619	0,501	0,480	0,601	0,683	0,485	0,623	0,683	29*
30	0,648	0,639	0,504	0,605	0,639	0,504	0,482	0,605	0,693	0,487	0,627	0,693	30
Мин-имум	$n=10$	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	0,10000	
	$n=31$	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	0,03333	

Примечание: Номера ординат, отмеченные звездочкой, для расчета по десяти избранным ординатам.

ЛИТЕРАТУРА

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ РУКОВОДСТВА

1. Сеченов И. М., Избранные философские и психологические произведения, Госполитиздат, 1947.
2. Павлов И. П., Избранные произведения, Госполитиздат, 1951.
3. Кравков С. В., Глаз и его работа, Изд. АН СССР, 1950.
4. Кравков С. В., Цветовое зрение, Изд. АН СССР, 1951.
5. Кравков С. В., Взаимодействие органов чувств, Изд. АН СССР, 1948.
6. Майзель С. О., Свет и зрение, Гостехиздат, 1932.
7. Авербах М. И., Офтальмологические очерки, Медгиз, 1940.
8. Гинецинский А. Г., Либединский А. В., Курс нормальной физиологии, Медгиз, 1956.
9. Хартридж Г., Современные успехи физиологии зрения, Изд. иностранной литературы, 1952.
10. Le Grand J., Optique physiologique, 1954.
11. Helmholtz H., Handbuch der physiologischen Optik, 1911.
12. Hecht S., Energy and vision, 1944.
13. Granit R., Sensory mechanisms of the retina, 1947.
14. Гранит Р., Электрофизиологическое исследование рецепции, Изд. иностранной литературы, 1958.

§ 1

1. Сеченов И. М., Физиологические очерки, ч. II, Госиздат, 1923.
2. Павлов И. П., Полное собрание сочинений, т. III, Медгиз, 1951.
3. Кравков С. В., Взаимодействие органов чувств, Изд. АН СССР, 1948.

§ 2

4. Вербицкий В. К., Оптическая система глаза, Русский офтальмологический журнал, № 5, 1926.
5. Мешков В. В. и Смелянский З. Б., Гигиена освещения, Медгиз, 1934.
6. Ярбус А. Л., Скорость движения изображения неподвижной точки на сетчатке, Биофизика, т. I, 1956, вып. 6.
7. Гассовская Л. Н., Никольская Н. А., Подвижность глаза в процессе фиксации точки, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941.
8. Зильбер Д. А., Трумпайц Я. И., Влияние работы на глаз, Изд. Ленинградского института гигиены труда, 1938.
9. Кравков С. В., Глаз и его работа, Изд. АН СССР, 1950.
10. Le Grand J., Optique physiologique, 1954, t. II.
11. Пинегин Н. И., Влияние яркости и угловых размеров поля зрения на диаметр зрачка, Труды 1-й конференции по физиологической оптике, Изд. АН СССР, 1936.

12. Stiles W., Crawford B., The liminal brightness increment, for white light for different conditions of the foveal and parafoveal retina, Proc. Roy. Soc., B. 1934, p. 55.
13. Ivanoff A., On the influence of accomodation on spherical aberration in the human eye, JOSA, 1947, № 9.
14. Хартридж Г., Современные успехи физиологии зрения, Изд. иностранной литературы, 1952.
15. Гуртовой Г. К., Изображение светящей точки в области сетчатки, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1955.
16. Покровский Г. И., Über die Lichtzerstreurung im Auge, Ztschr. f. Phys., 1926, H. 10.

§ 3

17. Polyak S., The retina, Chicago, 1941.
18. Белостоцкий Е. М., Величина слепого пятна, Проблемы физиологической оптики, т. XI, 1955.
19. Hecht S., La base chimique et structurale de la vision, Paris, 1938.

§ 4

20. Гальвани Л., Вольта А., Избранные работы о животном электричестве, 1937.
21. Чаговец В. Ю., Очерки электрических явлений на живых тканях с точки зрения новейших физико-химических теорий, СПБ, вып. 1—2, 1903—1906.
22. Лазарев П. П., Ионная теория возбуждения живых тканей, Сочинения, т. II, Изд. АН СССР, 1950, Исследования по ионной теории возбуждения, М., 1916.
23. Пинегина Н. И., Независимость от длины волны порогового числа квантов при палочковом и колбочковом зрении, Проблемы физиологической оптики, т. XII, 1958.
24. Hartline H., The nerve messages in the fibres of the visual pathway, JOSA, 1945, p. 657.
25. Либединский А. В., Пеймер И. А., О происхождении биоэлектрических явлений в сетчатке, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1955.
26. Шпильберг П. И., Электрофизиологические исследования зрительного аппарата, Проблемы физиологической оптики, т. V, 1948.
27. Бронштейн А. И., Зимкин Н. В., Либединский А. В., Роль центральной нервной системы в явлениях адаптации к условиям освещения при электрическом раздражении различных элементов зрительного анализатора, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941.

§ 6

28. Пинегин Н. И., Абсолютная палочковая чувствительность глаза, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1946; Спектральная чувствительность и адаптация глаза человека, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
29. Самсонова В. Г., Кривые видности ночного зрения, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
30. Weaver K., The visibility of radiation at low intensities, JOSA, 1937, № 1.
31. Фольб Р. Л., Применение метода С. И. Вавилова к определению колбочковой спектральной чувствительности глаза, «Светотехника», 1955, № 1.
32. Coblenz W., Emerson W., Relative sensitivity of the average eye to light of different colors and some practical problems, Bul. Bureau of Stand., 1918.

33. Hyde E., Forsythe W., Cady F., The visibility of radiation. Astrophysik, 1918, № 2.
34. Gibson K., Tindall E., Visibility of radiant energy, Scientific pap. of the Bureau of Stand., 1923—1924.
35. Карташевская В. Е., Труды ВНИИМ, 17, 1952.
36. Weawer K., The visibility of radiation at low intensities, JOSA, 1949, № 4.
37. Wright W., The measurement of colour, London, A. Hilger, 1944.
38. Гершун А. А., Формула Д. А. Гольдгамера для спектральной кривой чувствительности глаза, Третье совещание по физиологической оптике (тезисы), 1949.
39. Moon P., Spencer D., Analytical representation of standard response curve, JOSA, 1943, № 2.
40. Волькенштейн А. А., О сложении эквивалентных яркостей, ЖТФ, 1955, № 6.
41. Юров С. Г., О неприменимости закона дистрибутивности к равенству эквивалентных яркостей, «Светотехника», 1957, № 8.

§ 7

42. Самсонова В. Г., Зависимость порога световой чувствительности глаза от угловых размеров и яркости поля окружения, Проблема физиологической оптики, т. III, 1946.
43. Волькенштейн А. А., Материалы к расчету маскировочного освещения, Труды Гос. оптического института, т. XVII, вып. 125—129, 1944.

§ 8

44. Weigel R., Knoll O., Neue Untersuchungen über Schwellenwerte, Das Licht, 1940, № 6.
45. Jainski P., Neue Untersuchungen über Wahrnehmungswelle des Auges, Proc. compte rendu 13 Session CIE, Zurich, 1955.
46. Мешков В. В., Осветительные установки, Госэнергоиздат, 1947, Москва.
47. Демкина Л. И., Опознавание цвета точечных источников, Труды 1-й конференции по физиологической оптике, Изд. АН СССР, 1936.
48. Теплов Б. М., К вопросу об индуктивном изменении абсолютной световой чувствительности, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941.
49. Кроль Ц. И., Некоторые вопросы световой чувствительности глаза, Проблемы физиологической оптики, т. II, 1944.
50. Blackwell H., Contrasts thresholds of the human eye, JOSA, 1946, № 10.
51. Siedentopf H., Kontrastschwelle und Sehschärfe, Das Licht, 1941, № 2.
52. Ратнер Е. С., О пороговой чувствительности приемников излучения, Оптика и спектроскопия, т. IX, 1960, вып. 1.
53. Болдырев Н. Г., Энергетические соотношения, описывающие явления зрительного восприятия, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
54. Болдырев Н. Г., Экспериментальное подтверждение энергетической теории зрения, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
55. Раутиан Г. Н., Пинегин Н. И., Острота различения в зависимости от яркости и контраста, Труды первой конференции по физиологической оптике, Изд. АН СССР, 1936.
56. Conner J., Genoung R., An experimental determination the visual thresholds of low values of illumination, JOSA, 1935, № 9.

57. Moon P., Spencer D., Visual data applied to lighting design JOSA, 1944, № 8.
58. Arnulf A., Etude de la limite de séparation visuelle Réunions de l'Institut d'optique, Paris, 1937.
59. Румянцев М. В., Видимость малых объектов, Проблемы физиологической оптики, т. VII, 1949.
60. Дашкевич Л. Л., Поляризационный бинокулярный измеритель видимости, «Светотехника», 1955, № 3.
61. Мешков В. В., Проектирование прожекторных установок с учетом слепящего действия, «Светотехника», 1932, № 2.
62. Judd D., Measurement of light and color, J. E., 1958, № 2.
63. Майзель С. О., Частота импульсов в волокнах зрительного нерва человека, ДАН, № 5, 1949; Яркость и цветность в свете физической теории зрительного процесса в сетчатке, Изв. АН СССР, ОТН, 1950, № 5.
64. Мешков В. В., Светлота и яркость, «Светотехника», 1958, № 12.
65. Hopkinson R., Appraisement of Brightness, Ill. Eng., 1957, № 4.
66. Вейнберг В. Б., Никольская Н. А., Таблица для измерения остроты зрения, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
67. Moon P., Spencer D., A modified photochemical theory of vision, JOSA, 1945, № 1.
68. Раутиан Г. Н., Пинегин Н. И., Острота различения в зависимости от яркости и контраста, Труды 10-й конференции по физиологической оптике, Изд. АН СССР, 1936.
69. Fortuin G., Visual power and visibility, 1951.
70. Гассовский Л. Н., Буланова К. Н., Энно З. Н., Видимость объектов в условиях низких освещенностей, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1946.
71. Вейнберг В. Б., К вопросу о дальности видимости предметов, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1946.
72. Пинегин Н. И., Буланова К. Н., Острота различения в зависимости от контраста для различных тест-объектов, Проблемы физиологической оптики, т. IV, 1947.
73. Музылев Ф. Н., Острота зрения при различении светлых объектов на темном фоне, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1946.
74. Bouma P., Die Farbenwiedergabe bei der Verwendung verschiedener „weisser" Lichtquellen, Philips techn. Rundschau, 1937, № 2.
75. Arndt W., Über das Sehen bei Natriumdampf- und Glühlampenlicht, Das Licht, 1933, № 11.
76. Arndt W., Dresler A., Über das Sehen bei monochromatischem Licht, Das Licht, 1933, № 12.
77. Вейнберг В. Б., Лапинская Е. А., Исследования остроты зрения при низких цветных яркостях, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941, «Светотехника», 1937, № 8.
78. Hecht S., Mintz E., The visibility of single lines at various illuminations and the retinal basis visual resolution, J. gen. Physiol., 1939, № 6.
79. Слюсарев Г. Г., Геометрическая оптика, Изд. АН СССР, 1946.
80. Гершун А. А., О видимости через оптические приборы, Избранные труды по фотометрии и светотехнике, 1958.
81. Langlands N., Experiments on binocular vision, Trans. Opt. Soc., 1929, № 5.
82. Белостоцкий Е. М., К вопросу о влиянии малых освещенностей на некоторые функции глаза, Сборник «Вопросы медицинского обеспечения авиации», 1939.

83. Самсонова В. Г., Влияние различных факторов на глубинное восприятие, Труды I-й конференции по физиологической оптике, АН СССР, 1936.

§ 10

84. Нюберг Н. Д., Светочувствительные приемники глаза, Проблемы физиологической оптики, т. 9, 1950; Математические основы задачи измерения цвета, Гостехиздат, 1933 (статья опубликована в приложении к книге Н. Т. Федорова «Современное состояние колориметрии»).
85. Болдырев Н. Г., Теоретическая фотометрия, Изд. Ленинградского института охраны труда, Ленинград, 1938.
86. Ломоносов М. В., Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее, Избранные философские произведения, Госполитиздат, 1950, стр. 282.
87. Нюберг Н. Д., Колориметрические эксперименты как средство исследования цветового зрения и требования к ним, Биофизика, т. II, вып. 2, 1957.
88. Пинегин Н. И., Минимум энергии, вызывающий цветное зрение, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1946.
89. Martin L., Warburton F., Morgan W., Determination of the sensitiveness of the eye to differences in the saturation of colours, Mes. Res. Counc. Spec. Rep., London, 1933, ser. 188.
90. Priest I., Brickwedde F., The minimum perceptible colorimetric purity as a function of dominant wavelength, JOSA, 1926, № 5.
91. Purdy D., On the saturations and chromatic thresholds of the spectral colours, Brit. J. Psych., 1931, p. 283.
92. Wright W., Pitt F., The colour vision characteristics of two trichromants, Proc. Phys. Soc., 1937, p. 329.
93. Jones L., Lowry E., Retinal sensibility to saturation differences, JOSA, 1926, № 1.
94. Нюберг Н. Д., О происхождении цветовых понятий, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
95. Sinden R., Studies based on spectral complementaries, JOSA, 1929, № 12.
96. Peddy W., Color vision, London, 1927.
97. Bezold W., Über das Gesetz der Farbenmischung und die physiologischen Grundfarben, Pogg. Ann., 1873, S. 237.
98. Brücke E., Über einige Empfindungen im Gebiete des Schnerven, Wien, Sitzber., 1877, № 2.
99. Purdy D., The Bezold—Brücke phenomenon and contours for constant hue, Amer., J. Psych., 1937, p. 314.
100. Abney W., Researches in colour vision, London, 1913.
101. Раутиан Г. Н., Соловьева В. П., Влияние светлого окружения на остроту цветоразличения, ДАН СССР, 1954, № 3.
102. Гуревич М. М., Мейер Л. М., Зависимость цветоразличительных свойств глаза от яркости поля зрения, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
103. Раутиан Г. Н., Пороги цветоразличения, Проблема физиологической оптики, т. XII, 1958.
104. Charpentier A., La lumière et couleurs, Paris, 1888.
105. Koening A., Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen, Sitzber. Akad. Wiss., Berlin, 1894.
106. Hartridge H., The visual perception of fine detail, Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1947, № 592.
107. Раутиан Г. Н. и Демкина Л. И., Влияние размеров поля зрения на результаты колориметрических измерений, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.

108. Middleton W., Holmes M., The apparent colors of surfaces of small subtense — a preliminary report, JOSA, 1949, № 7.
109. Кустарев А. К., Изменение цветовосприятия при уменьшении угла зрения, «Светотехника», 1958, № 1.
110. Willmer E., Wright W., Colour sensitivity of the fovea centralis, Nature, 1945, № 3952.
111. Burnham R., Newhall S., Color perception in small test fields JOSA, 1955, № 10.
112. Maxwell J., On the theory of compound colors and the relations of the colors of the spectrum, Proc. Roy. Soc., 1860, v. 10, p. 404—409.
113. König A., Dieterici C., Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und Intensitätsverteilung im Spectrum, Gesam. Abh. zur physicl. Optik, 1903.
114. Раутиан Г. Н., Новая классификация форм цветового зрения, Биофизика, т. I, 1956, вып. 3.
115. Федоров Н. Т., Федорова В. И., Фотометрическая чувствительность глаза, ДАН СССР 24, 1939, № 7.
116. Land E., Experiments in color vision, Scientific America, May, 1959 (русский перевод статьи опубликован в УФН, т. LXX, вып. 1, 1960); Зусманович Б. М., Эксперименты по „новой теории цвета", «Техники кино и телевидения», 1960, № 6; Neidhart P., Bilder die Theorie des Farbensehens von Dr. Edwin H. Land die Gründlage für ein neues Farbenfernsehesystem, Elektronische Rundschau; Judd D., Appraisal of Land's work JOSA, 1960, № 3.

§ 11

117. Иванова Н. С., Влияние цветовой адаптации на восприятие цветов, «Светотехника», 1957, № 3.
118. Лазарев П. П., Ionentheorie der Reizung, 1923; Исследования по адаптации, Изд. АН СССР, 1947; Сочинения, т. II, Изд. АН СССР, 1950.
119. Tansley K., Factors affecting the development and regeneration of visual purple in the mammalia retina, Proc. Roy. Soc., Ser. B, 114.
120. Lythgoe R., The resorption spectra of visual purple and of indicator yellow, Journ. of Physiol., 89, p. 331.
121. Hecht S., La base chimique et structurale de la vision, Paris, 1938.
122. Wald G., Visual systems and the vitamins A, Nature, 1937, p. 140.
123. Кравков С. В., О влиянии побочных раздражителей на функции зрения, Сборн. «Зрительные ощущения и восприятия», 1935.
124. Кравков С. В., Острота зрения одного глаза в зависимости от освещения другого, «Журнал прикладной физики», 1930, № 7, вып. 4.
125. Семеновская Е. Н., Световая адаптация одного глаза и ее влияние на световую чувствительность периферического зрения другого глаза, «Вестник офтальмологии», 1937, № 6.
126. Nagel W., Adaptation, twilight vision and the duplicity theory, Helmholz physiological optics, 1911, № 11.
127. Ахматов А. С., О зрительной адаптации в течение 24 часов, «Журнал прикладной физики», 1925, № 1—4.
128. Новицкий А. А., Исследование периферической зрительной адаптации в течение 24 часов, ДАН СССР, 19, 1938, № 1—2.
129. Wright W., Researches on normal and defective colour vision London, 1946.
130. Mandelbaum J., Dark adaptation, Arch. Ophth., 1941, № 5.
131. Пинегин Н. И., Спектральная чувствительность и адаптация глаза человека, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
132. Лазарев П. П., Исследования по ионной теории возбуждения, Москва, 1916.

133. Pütter A., Studien zur Theorie der Reizvorgänze, Pfl. Arch. f. Physical. 1920, s. 180.
134. Hecht S., Photochemistry of visual purple, J. Gen. Phys., 1921, № 3.
135. Гранит Р., Электрофизиологические исследования рецепции, Изд. иностранной литературы, 1958.
136. Kries J., Über den Einfluss der Adaptation auf Licht, Ber. d. naturl. Gesellschaft zu Freiburg, 1894, № 2.
137. Lohmann W., Über Helladaption, Ztschr. f. Sinnesphysiol. 1906, S. 290—311.
138. Юстова Е. Н., Изменение цветового ощущения при адаптации, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
139. Mac-Adam D., Perceptions of colours in projected and televised pictures, J. Soc. Mot. Pict. Televis. Eng., 1956, № 9.
140. Bernham R., Evans R., Newhall S., Predictions of colour appearance with different adaptation illuminations, JOSA, 1957, № 1.
141. Helson H., Judd D., Warren M., Object-colour changes from daylight to incandescent filament illumination, Ill. Eng., 1952, № 2.
142. Helson H., Judd D., Willson W., Colour rendition with fluorescent sources of illumination, Ill. Eng., 1956, № 4.

§ 12

143. Лунизов А. В., О видимости быстродвижущегося тела, Проблемы физиологической оптики, т. IV, 1947.
144. Лунизов А. В., Инерция зрения, Проблемы физиологической оптики, т. XII, 1958.
145. Broca A., Sultzer D., La sensation lumineuse en fonction du temps, Compte Rend. de l'Ac. Scien., 1902, t. 84.
146. Лунизов А. В., Видимость объектов в зависимости от времени экспозиции, ДАН, т. LVII, 1947, № 8.
147. Лунизов А. В., Инерция зрения, Автореферат диссертации, ГОИ имени С. И. Вавилова, 1958.
148. Лунизов А. В., Пороговый контраст во времени, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
149. Blondel A., Rey J., Nouvelle vérification de la loc de perception des lumières brèves à la limite de leur portée, Comptes Rendus de l'Ac. Sc., Paris, 1924, t. 178.
150. Моро-Ано М., Фотометрия кратковременных и переменных световых явлений, Оборонгиз, 1939.
151. Фольб Р. Л., Эффективная сила света и заметность проблесковых огней, «Светотехника», 1958, № 12.
152. Соколов М. В., О видимости световых сигналов, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
153. Вавилов С. И., О микроструктуре света, Изд. АН СССР, 1950.
154. Brown R., Velocity discrimination and the intensity-time relation JOSA, 1953, № 3.
155. Talbot H., Experiments of light, Phil. Mag., 1834, № 5.
156. Porter T., Contributions of the study of flicker, Proc. Soc. Royal of London, 1898, pt I, v. LXIII; 1902, pt II, v. XX.
157. Ives H., A theory of intermittent vision, JOSA, 1922, № 4.
158. Hecht S., Verijip C., Intermittent stimulation by light, Journ. of Gen. Physiology, 1933, v. XVII.
159. Фольб Р. Л., Исследование критической частоты слития мелканий в широком диапазоне яркостей, Проблемы физиологической оптики, т. XII, 1958.
160. Arndt W., Die Flimmergrenze beim Kinobildwurfe, Kinotechnik 1935, № 13.

161. Корзун П. А., Электрическая чувствительность глаза после засвета интенсивными вспышками, Биофизика, т. II, 1957, вып. 4.
162. Зислина Н. Н., Нарушение зрительных последовательных образов при поражениях коры головного мозга, Проблемы физиологической оптики, т. XI, 1955.
163. Зоркина З. М., Исследование хода затухания последовательных образов, «Физиол. журн. СССР», т. XXVIII, 1940, вып. 4.
164. Лазарев П. П., Явления последовательных изображений глаза, Бюлл. Росс. АН, стр. 1245, 1918.
165. Кравков С. В., О ходе затухания последовательных образов от раздражения белым светом, «Изв. физич. института АН СССР», 1920, № 2.
166. Кравков С. В., О ходе затухания последовательных образов от цветных возбуждений, «Ж. прикладной физики», 1924, № 1.
167. Рославцев А. В., Ишакова Н. Г., Длительность последовательных образов, Проблемы физиологической оптики, т. IX, 1950.
168. Федоров Н. Т., Юрьев М. А., Скляревич В. В., Введенская И. В., Исследования одновременного и последовательного цветового контраста, Проблемы физиологической оптики, т. VI, 1948.
169. Goethe W., Zur Farbenlehre, 1810.
170. Голдовский Е. М., Физические основы кинотехники, Госкиноиздат, 1939.
171. Самсонова В. Г., Зависимость времени различения от угловых размеров, яркости и соотношения яркостей периферии и центра, Проблемы физиологической оптики, т. III, 1944.
172. Blackwelle H. R., Use of performance data to specify quantity and quality of interior illumination, J. E., 1955, № 6.
173. Шайкевич А. С., О классификации зрительных работ, «Светотехника», 1958, № 5.
174. Weston H., The relation between illumination and visual efficiency, the effect of brightness contrast, Med. Res. Council, London, 1945.

§ 13

175. Кравков С. В., Цветовое зрение, Изд. АН СССР, 1951.
176. Мешков В. В., Брюллова Н. Б., О методике учета действия блескости на различимость объектов, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941.
177. Галочкина Л. П., Индуктивные процессы в зрительном аппарате, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941.
178. Холмская О. П., О видимости светофорных огней на щитках различных размеров, Проблемы физиологической оптики, т. II, 1944.
179. Селецкая Л. И., О положительной и отрицательной индукции в органе зрения, Проблемы физиологической оптики, т. IX, 1950.
180. Мешков В. В., Учет слепимости методом контрастной чувствительности, Труды 1-й конференции по физиологической оптике, АН СССР, 1936.
181. Мешков В. В., Слепимость и методы ее учета, Труды конференции по блескости, 1940.
182. Покровский Г. И., Über die Lichzerstreurung im Auge, Zeitschr. für Physik, 1926, H. 10.
183. Stiles W., The effect of glare on the brightness difference threshold, Proc. Royal Soc., B series, 1929, p. 322.
184. Le Grand J., Recherces sur la diffusion de la lumière dans l'oeil humain, Rev. d'Opt., 1937, v. XVI, p. 202—241.
185. Fry G., Physiological bases of disability glare, Proc. 13, Session intern. commiss. on illum., p. 1., techn. comm. 1. 4. 2.
186. De Mott D., Boynton R., Retinal distribution of entoptic stray light, JOSA, 1958, № 1.

187. Кравков С. В., К анализу действия побочных раздражителей на зрение, Проблемы физиологической оптики, т. II, 1944.

188. Luckiesh M., Holladay L., Glare and visibility, Trans. Illum. Engin. Soc., 1925, p. 221.

189. Holladay L. The fundamentals of glare and visibility, JOSA, 1926, p. 271.

190. Мешков В. В., Проектирование прожекторного освещения с учетом слепимости, «Светотехника», 1932, № 2.

191. Мешков В. В., Блескость и слепимость, «Светотехника», 1934, № 2.

192. Cobb P., Moss F., Effect of brightness on the precision of visullay controlled operations, Journ. of Franklinst, 1925, p. 507.

193. Lythgoe R., The measurement of visual acuity, Report № 173, Medical research council, 1932.

194. Пинегин Н. И., Острота различения в зависимости от угловых размеров поля зрения, Труды 1-й конференции по физиологической оптике, АН СССР, 1936.

195. Arndt W., Bodmann H., Muck E., Untersuchung über die psychologische Blendung durch mehrere Lichtquellen, XIV Session CIE, Bruxeles, 1959.

196. Crouch C., The relation between illumination and vision, Ill. Eng., 1945, № 9.

197. Moon P., Spenser D., The visual effect of non-uniform surrounds, JOSA, 1945, № 3.

198. Павлов И. П., Лекция о работе больших полушарий головного мозга, 1927.

199. Федоров Н. Т. и др., Об основных закономерностях в явлениях цветового контраста, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.

200. Федоров Н. Т. и др. Исследования по одновременному и последовательному цветовому контрасту, Проблема физиологической оптики, т. VI, 1948.

§ 14

201. Ferree C., Tests for the efficiency of the eye different systems of illumination and a preliminary study of the causes of discomfort, Tr. of the Ill. Eng. Soc., 1912, № 1; Some experiments on the eye with inverted reflectors of different densities, Tr. of the Ill. Eng. Soc., 1915, № 11; The efficiency of the eye under different conditions of lighting, Tr. of the Ill. Eng. Soc., 1915, № 5; The power of the eye to sustain glare and comfortable seeing with different illuminavns, Amer. Journ. of Ophthalmology, 1958, p. 252—259.

202. Luckiesh M., Holladay L., Glare and visibility, Tr. IES, 1925, p. 221.

203. Holladay L., Fundamentals of glare and visibility, JOSA, 1926, p. 271.

204. Crouch C., Brightness limitations for luminaires, Ill. Eng., 1945, № 7.

205. Harrison W., Glare ratings, Ill. Eng., 1945, № 10.

206. Harrison W., Meaker Ph., Further data on glare ratings, Ill. Eng., 1947, № 5.

207. Fry G., The evaluation of discomfort glare, Ill. Eng., 1956, № 11.

208. Luckiesh M., Guth S., Discomfort glare angular distance of glare source, Ill. Eng., 1946, № 6; Brightnesses in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD), Ill. Eng., 1949, № 12.

209. Guth S., Comfortable brightness relationships for critical and casual seeing, Ill. Eng., 1951, № 2; Brightness ratings in lighting practice, Ill. Eng., 1952, № 4; Subjective appraisal of brightness, Proc. of the ICI, Stockholm, 1951, v. II; Quality of lighting, Ill. Eng., 1955, № 6.

210. Logan, Lange, The evaluation of discomfort glare, Ill. Eng., 1952, № 4.

211. Hopkinson R., Discomfort glare in lighting stress, Trans. IEE, London, 1940, № 5; Evaluation of glare, Ill. Eng., 1957, № 6; A study of glare from very large sources, Ill. Eng., 1958, № 9.

212. Hopkinson R., Petherbridge, Discomfort glare and the lighting of buildings, Tr. IES, 1950, № 1; Two supplementary studies on glare, Tr. IES, London, 1954, № 9.

213. Vermuelen D., J. de Boer, La brillance admissible des appareils d'eclairage, Rev. Techn. Philips, 1951, t. XII.

214. Meaker Ph., Brightness v. s. area in the glare factor formula, Ill. Eng., 1949, № 6.

215. Нетушил Я., Количественная оценка ослепленности, «Светотехника», 1959, № 7.

216. Evaluation of direct discomfort glare in lighting installations, Report № 6 of the Committee on standards on quantity and quality for interior illumination of the Illuminating Engineering Society, J. E., 1959, № 7.

217. Untersuchungen über Leistung and Ermüdung des Menschen bei verschiedenen Lichtbedingungen, Lichttechnik, 1956, № 7.

218. Негробов А. И., К вопросу о влиянии утомления на рецепторную функцию зрения, «Профгигиена и охрана труда», 1926, № 5.

219. Нейштадт Я. Э., Данциг Н. М., Шубова Т. Б., Мкртычева Л. И., О методах определения зрительного утомления, Труды 1-й конференции по физиологической оптике, АН СССР, 1936.

220. Мешков В. В., Брюллова Н. Б., О методике учета действия блескости на различимость объектов, Проблемы физиологической оптики, т. I, 1941; Слепимость и зрительное утомление, Сборник трудов конференции по блескости, 1939.

221. Зильбер Д. А., Трумпайц Я. И., Влияние работы на глаз, 1938.

222. Kruithof A., Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für algemeine Beleuchtungszwecke, Rev. Techn. Philips, 1941.

ГЛАВА II

ОСНОВНЫЕ РУКОВОДСТВА

1. Гуревич М. М., Цвет и его измерения, Изд. АН СССР, 1950.

2. Майсель С. О., Ратнер Е. С., Цветовые расчеты и измерения, Госэнергоиздат, 1941.

3. Майсель С. О., Основы учения о цветах, Гостехиздат, 1946.

4. Нюберг Н. Д., Курс цветоведения, Гизлегпром, 1932.

5. Нюберг Н. Д., Теоретические основы цветной репродукции, Изд. «Советская наука», 1948.

6. Федоров Н. Т., Общее цветоведение, Гостехиздат, 1939.

7. Федоров Н. Т., Современное состояние колориметрии, Гостехиздат, 1933.

8. Blottiau F., Colorimétrie, Encyclopédie photométrique, Ed. de la Revue d'Optique, Paris, 1951, t. IV.

9. Bouma P., Farbe und Farbwahrnemung, Technische und wissenschaftliche, Philips-bibliothek, 1951.

10. Hardy A., Handbook of colorimetry, Cambridge, Mass. Inst. of Techn., 1936.

11. Hunt R., The reproduction of colour, London, Ed. Dountain, 1957.

12. Judd D., Colour in business, Science and Industry, New York, 1952.

13. Lovichi A., Weck J., Bases colorimétriques de la trichromie, Ed. de la Revue d'Optique, Paris, 1947.
14. Ostwald W., Physikalische Farbenlehre, Leipzig, 1940.
15. Richter M., Grundriss der Farbenlehre, Dresden u. Leipzig, 1940.
16. Wright W., The measurement of colour, London, Ed. A. Hilger and Watts, 1958.

§ 1

1. Майзель С. О., Основы учения о цветах, Гостехиздат, 1946.

§ 2

2. Нюберг Н. Д., Математические основы задачи измерения цвета, Гостехиздат, 1933 (статья опубликована в приложении к книге Н. Т. Федорова «Современное состояние колориметрии»).
3. Schrödinger E., Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen, Ann. d. Phys., 1920, 63, S. 397—456.
4. Гуревич М. М., Цвет и его измерение, АН СССР, 1950.

§ 4

5. Ньютон И., Оптика, Госиздат, 1927; Лекции по оптике, АН СССР, 1946.
6. Grassman H., Zur Theorie der Farbenmischung, Ann. d. Phys., 1953, S. 69—84.
7. Maxwell J., On theory of compound colours and the relations of the colors of the spectrum, Proc. Roy. Soc., 1860, v. X, p. 404—409.
8. König A., Dieterici C., Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und Intensitätsverteilung im Spectrum, Gesam. Abh. z. physiol. Optik, 1903.
9. Abney W., Colour measurement and mixture, London, 1891.
10. Wright W., A trichromatic colorimeter with spectral primaries, Trans. Opt. Soc., 1927—1928, p. 316; A. redetermination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, Trans. Opt. Soc., 1928—1929, p. 107; A redetermination of the mixture curves of the spectrum. Trans. Opt. Soc., 1929—1930, p. 31.
11. Guild J., A trichromatic colorimeters suitable for standardization work, Trans. Opt. Soc., 1925—1926; The colorimetric properties of the spectrum, Phil. Trans. Royal Soc. A, 1931—1932, p. 130.
12. Нюберг Н. Д. Светочувствительные приемники глаза, Проблемы физиологической оптики, т. IX, 1950.
13. Mac-Adam D., Dependence of colour-mixture functions on choice of primaries, JOSA, 1953, № 6.

§ 5

14. Blottiau F., Les transformations colorimétriques, Rev. d'Opt., 1944, № 4.
15. Ives H., The transformation of colour mixture equations from one system to another, Journ. Frankl. Inst., 1915, 180, p. 673—685; 1923, 195, p. 23—32.
16. Judd D., Saturation scale for yellow colours, JOSA, 1933, № 1; Some colour demonstrations I have shown, JOSA, 1959, № 4.
17. Майзель С. О., Ратнер Е. С., Цветовые расчеты и измерения, Госэнергоиздат, 1941.
18. Болдырев Н. Г., Теоретическая фотометрия, Изд. Ленингр. института охраны труда, 1938.
19. Bingley F., Transformations of chromaticity diagrams, JOSA, 1954, № 2.

20. Кустарев А. К., Графический пересчет координат цветности, «Светотехника», 1956, № 5; Графический пересчет цветовых координат, 1957, № 4; Графический способ построения номограмм для пересчета координат цветности, «Светотехника», 1957, № 8.
21. Blottiau F., Colorimètrie. Paris, 1951.
22. Pitt F., Characteristics of dichromatic vision. Med. Research Council, rep. № 200.
23. Judd D., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision, JOSA, 1945, № 3.
24. Юстова Е. Н., Новое определение кривых чувствительности приемников глаза из опытов с цветослепыми, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
25. Нюберг Н. Д., Определение положения в цветовом треугольнике основного синего цвета, ДАН, АН СССР, т. XV, 1949, № 2.

§ 10

26. Mac-Adam D., Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colours, JOSA, 1950, № 9.

§ 11

27. Judd D., A Maxwell triangle yielding uniform chromaticity diagram, JOSA, 1939, № 4.
28. Майзель С. О., Ратнер Е. С., Цветовые расчеты и измерения, Госэнергоиздат, 1941.
29. Mac-Adam D., Representations of colour tolerance on the chromaticity diagram, JOSA, 1939, № 4; Specification of small chromaticity differences, JOSA, 1943, № 4; Graphical representations of small colour differences, JOSA, 1943, № 10.
30. Moon P., Spencer D., A metric for colour space, JOSA, 1943, № 5.
31. Silberstein L., Mac-Adam D., The distribution of color mat-chings around a color center, JOSA, 1945, № 1.
32. Болдырев Н. Г., Мартынов К. Б., Равноконтрастный цветовой график, Проблемы физиологической оптики, т. VIII, 1953.
33. Wright W., The graphical representation of small color differences, JOSA, 1943, № 10.
34. Шкловер Д. А., Современное состояние колориметрии, «Светотехника», 1956, № 1.
35. Shklover D., The problem of the equicontrast colorimetric system, Report at Symposium on visual problems of colour, National physical laboratory, Teddington, 1957.

§ 12

36. Ostwald W., Der Farbnormenatlas, Leipzig, 1920.
37. Munsell A., Atlas of the Munsell-colour system, Boston; Munsel, colour-company, The Munsell book of colour, Library and pocket editions, Baltimore, 1929.
38. Рабкин Е. Б., Атлас цветов, Медгиз, 1956.

§ 14

39. Hardy A., Handbook of colorimetry, Cambridge—Massachus., 1936.
40. Judd D., Changes in colour temperature of tungsten-filament lamps at constant voltage, JOSA, 1936, № 8.

§ 16

41. Гуревич М. М., Геометрические решения задач смешения цветов, ЖТФ, 1945, № 15.

42. Гюбль А., Ортохроматическая фотография и светофильтры, Теакинопечать, 1930.

§ 17

43. Нюберг Н. Д., Теоретические основы цветной репродукции, Изд. «Советская наука», 1948.
44. Гроховский Ю. Н., Балабуха Д. К. и Левенберг Т. М., Сенситометрия цветографических материалов, Успехи научной фотографии, т. II, Изд. АН СССР, 1954.

§ 18

45. Ратнер Е. С., Федоров П. П., Колориметрический метод оценки цветопередачи, Бюлл. ВЭИ, 1935, № 8.
46. Helson H., Judd D., Warren M., Object-colour changes from daylight to incandenscent filament illumination, Illuminat. Eng., 1952, № 4.
47. Helson H., Judd D., Wilson M., Colour rendition with fluorescent sources of illuminating, Illuminat. Eng., 1956, № 4.
48. Burnham R., Evans R., Newhall S., Prediction of colour appearance with different adaptation illuminations, JOSA, 1957, № 1.
49. Нюберг Н. Д., Искажения цветопередачи и их связь с сенситометрическими характеристиками цветофотографических процессов, Успехи научной фотографии, т. II, 1954.

§ 19

50. Фаас В. А., Светофильтры, Киноиздат, 1936.
51. Марголин И. А., Румянцев Н. П., Основы инфракрасной техники, Воениздат, 1955.
52. Добрынин И. А., Сидельковский Ю. П., Изготовление желатиновых корригирующих фильтров к селеновым фотоэлементам, Сборник материалов по вакуумной технике, вып. IX, Госэнергоиздат, 1956.
53. Даувальтер А. Н., Хрустальные, цветовые и опаловые стекла, Гизлегпром, 1957.
54. Гинзбург В. Л., Светофильтры, Объединенное научно-техническое издательство, 1936.
55. Баранов С. С., Худов С. В., Шпольский Э. В., Атлас спектров пропускания прозрачных окрашенных пленок, Изд. АН СССР, 1948.

§ 20

56. Белов К. П., Световые сигналы на железных дорогах, Трансжелдориздат, 1952.
57. Ашкенази Г. И., Лапшин М. И., Соколов М. В., Зрительная сигнализация в земном обеспечении самолетовождения, Воениз, 1950.
58. Белов К. П., Опознавание цвета железнодорожных сигналов, Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, 1956, № 3.

§ 21

59. Цветная кинематография, под редакцией Е. М. Голдовского, Изд. «Искусство», 1955.
60. Иорданский А., Мертц К., Овечкис Н., Чельцов В., Цветная фотография на трехслойных светочувствительных материалах, Госкиноиздат, 1949.
61. Watter O., Farben-Foto-Praxis, VEB, Leipzig, 1955.
62. Голдовский Е. М., Демонстрация цветных кинокартин, Госкиноиздат, 1949 г.

63. Нюберг Н. Д., Баранов Г. С., Овечкис Н. С., Система сенситометрии цветных кинофотоматериалов и процессов, Успехи научной фотографии, т. II, 1954.
64. Гроховский Ю. Н., Балабуха Д. К. и Левенберг Т. М., Исследования по сенситометрии многослойных цветографических материалов, Успехи научной фотографии, т. II, 1954.
65. Друккер Р. А., Источники света и освещение в цветной фотографии, Изд. «Искусство», 1956.
66. Иофис Е. А., Фотографическая обработка цветных кинофильмов, Госкиноиздат, 1950.
67. Коноплев Б. Н., Технология производства кинофильмов, Изд. «Искусство», 1956.
68. Антонов С. М., Зеликман В. Л., Мархилевич К. И., Кинопленка и ее обработка, Госкиноиздат, 1956.
69. Артюшин Л. Ф., Методы цветовой коррекции фотографических изображений раздельными масками, Техника кино и телевидения, 1957, № 6.
70. Друккер С. А., Цветофотографическая характеристика спектрального состава освещения при цветной киносъемке, Сборник «Киносъемочная техника», Госкиноиздат, 1952.
71. Овечкис Н. С., Трехзональная система координат и ее применение к цветофотографическим процессам, Успехи научной фотографии, т. II, 1954.

§ 22

72. Алексеев С. С., Цветоведение, Изд. «Искусство», 1952.
73. Нечаева И. А., Цветоведение и теория трехцветной репродукции, Изд. «Искусство», 1956.
74. Магас Г. Т., Методы фотографической корректуры, Изд. «Искусство», 1955.
75. Бартмус А., Хауэен Г., Практический опыт применения способа маскирования, Изд. «Искусство», 1956.

§ 23

76. Шмаков П. В., Основы цветного и объемного телевидения, Изд. «Советское радио», 1954.
77. Ефимкин В. И. и Миненко Ю. Г., Экспериментальная установка цветного телевидения, сборник статей «Цветное телевидение», Связьиздат, 1957.
78. Гос М. Э., Гуревич С. Б., Передача и искажение цветов в телевизионной системе со сменой цветов по полям, «Техника телевидения», Госэнергоиздат, 1954, вып. 10.
79. Гуревич С. Б., Об искажениях цветопередачи, связанных с работой передающих трубок в системе цветного телевидения, «Техника телевидения», Госэнергоиздат, 1956, вып. 9(15).
80. Зусманович В. М., Колориметрические принципы расчета совместной системы цветного телевидения, «Техника телевидения», Госэнергоиздат, 1957, вып. 21.
81. Кустарев А. К., Спектральные характеристики воспринимающих устройств в цветном телевидении, «Техника кино и телевидения», 1957, № 6.
82. Mac-Adam D., Dependance of colour-mixture functions on choice of primaries, JOSA, 1953, № 6.
83. Brown G. H., The choice of axes and bandwidths for the chrominance signals in NTS colour television, Proc. IRE, 1954, № 1.
84. Loughren A., Psychophysical and electrical foundations of colour television, Proc. IRE, 1954, № 11.

§ 24

85. Демкина Л. И., Раутиан Г. Н., Диффузный излучатель большой яркости, Труды Гос. оптического института, 1931, № 7.

86. Раутиан Г. Н., Колориметрические приборы, Справочная книга оптика-механика, ч. I, ОНТИ, 1936.

87. Иоффе Р. С., Шкловер Д. А., Фотоэлектрическая установка для контроля цветовых и световых характеристик излучения люминесцентных ламп, «Светотехника», 1955, № 2.

88. Schklover D., Méthodes photoélectriques et appareils pour mesurer la couleur, Compte rendu XIII session Commission Internationale de l'éclairage, v. I.

89. Шкловер Д. А., Иоффе Р. С., Фотоэлектрический колориметр с непосредственным отсчетом цвета КНО-3, «Светотехника», 1957, № 10.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аберрация отрицательная 18
— продольная 19
— сферическая 18
— хроматическая 19
Адаптация зрительная 121
— световая 123, 129
— темновая 125, 127
— цветовая 123, 131
— яркостная 123
Адаптометр 49
Аддитивное смешение цветов 216
Аккомодация глаза 11
Алихна 215

Белый цвет исходный 239
Ближняя точка ясного видения 11
Блоха—Шарпантье закон 146
Быстрота различения 37

Вектор цвета 204
Вероятность зрительного обнаружения 39
— — различения 39
Визуальная плотность 357
Визуально-эквивалентная плотность 357

Глубина аккомодации 12
Градационные кривые 312
Грассмана закон 219
Гюбля оптимальные цвета 313
— схема воспроизведения цвета 313

Дальняя точка ясного видения 11
Дейтераноны 117
Диаграмма цветности 207
Дивергенция 13
Диск Максвелла 387
Дифракция на зрачке 20

Единичный цвет 207

Зрачковый рефлекс 13
Зрительное утомление 150
Зрительной инерции время 135, 141
— — функция 135, 140
Зрительные рецепторы 9
Зрительный анализатор 9
— дискомфорт 182

Изохромные линии 317
— поверхности 317
— цвета 334
Импульс тока действия 30
Индуктивный светлотный контраст 178
— цветовой контраст 178
Индуктированный цвет 180
Индуктирующий цвет 180
Индукция возбуждения 60
Инерционность зрительного анализатора 37, 135
Иодопсин 25
Иррадиация 27

кас-рецепторы 97
Колбочки 22
Количество актиничного освещения 320

Колориметр аддитивный 387
— Демкиной 387
— субтрактивный 387
— фотоэлектрический 390
Колориметрическая система 201
— — измерительная 235
Колориметрический метод контроля цвета 330
Колориметрия 98
Компоненты светлоты 100
— цвета 100
Конвергенция 13
Конус реальных цветов 207
Координаты цвета 205
— цветности 209
Копировальная плотность 357
Копировальные фильтры 359
Корригирующие маски 361
Краски кроющие (рассеивающие) 311
— лессировочные (прозрачные) 311
Кривые сложения (смешения) 224
Критерии точности воспроизведения цвета 322
Критическая частота мелькания 150

Латентный период 30
Локус цветности однородных излучений 209

Метод избранных ординат 297
Минимальный разрешаемый угол 35
Мышечный баланс глаза 12

Нереальный цвет 207
Неустановившийся зрительный процесс 39

Оптимальные фильтры 343
Оптическое усиление 93
Ослепленности коэффициент 171
Основные цвета колориметрической системы 202
Острота различения 35
Относительная актиничность излучения в условиях сумеречного и ночного зрения 57
— видность однородного излучения 46
Ощущение цвета 97
— цветности 97

Палочки 22
Плоскость единичных цветов 207
— равной яркости 213
Показатель дискомфорта 184
— неравномерности 177
Поле зрения 24
Порог абсолютный световой 34
Порог глубины зрения (порог глубины) 36, 95
— на исчезновение 41
— — появление 40
— цветоощущения 36
Пороговая освещенность зрачка 34
— разность яркости 35
— яркость 34
Пороговый блеск 35
— контраст яркости 35
— цветовой контраст 267
Последовательные образы 152
Последовательный цветовой контраст 157
Проблесковая скважность 145
Проблесковые огни 145
Пространство реальных цветов 207
Протаноны 117

Равноконтрастная диаграмма цветности 268
— цветовая система 269
Равноэффективные излучения 334
Распределение вероятности обнаружения 41
Растр 218
Реальные цвета 206
Редуцированный глаз 10
Рецепторное поле (рецептор) 24
Рико-закон 53
Родопсин 25

Светлота 75
Светофильтра кратность 336
Светофильтры исправляющие 339
— нейтральные 337
— разделяющие 338
Сетчатая оболочка (сетчатка) 22
Слепое пятно 23
Собственный свет сетчатки 63
Спектральный контраст яркости 342
Спектрозональный метод контроля цвета 332
Средний глаз 98
Стайлса—Крауфорда эффект 15
Стереоскопическое зрение 94
Стробоскопический эффект 158
Субтрактивное смешение цвета 221
Субтрактивные координаты цвета 319
Сумма координат цвета 208

Точность воспроизведения цвета психологическая 323
— — — физиологическая 323
— — — физическая 322
Трехзональная колориметрическая система 364

Трехцветные коэффициенты 201
Тританопы 118

Удельные координаты цвета 205
Установившийся зрительный процесс 38
Устойчивость ясного видения 194

Физиологическая световая (колориметрическая) системя 200
Физическое увеличение 92
Функция зрения 37
— сложения (смешения) 224

Цвет 99
Цветность 98
Цветоаномалы 117
Цветовая индукция 178
— насыщенность 103
— тональность 103
Цветового охвата тело 317
Цветовое пространство 204
— уравнение 200
Цветовой денситометр 358
— контраст 258
— порог 267
— тон излучения 106
Цветовые сигналы 350
Цветоделение 333
Цветоделенные растровые изображения 357
Цветоделительное маскирование 331
Цветопередача 333
Центральная ямка сетчатки 23

Чистота цвета 105
Чувствительность интегральная световая 34
— контрастная 35
— спектральная 33
— цветоразличительная 35
— электрическая 32

Экивалентная эуалирующая яркость 171
Электрический фосфен 33
Электроретинограмма ЭРГ 31
Эффективная оптическая плотность 357
— освещенность сетчатки 17
— яркость 136
Эффектиный блеск 135
— контраст 136

Яркостный контраст 60
— коэффициент цвета 213