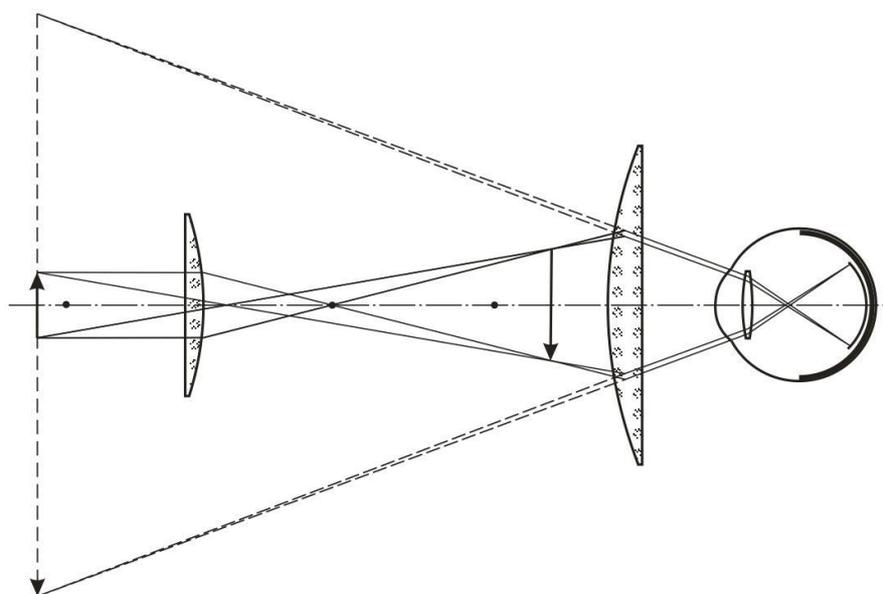


В.А.Зверев, И.А. Карасева, И.Н. Тимощук

**ЭРГОНОМИКА И ОПТОТЕХНИКА
ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ
НАБЛЮДАЕМЫХ ПРЕДМЕТОВ**



**Санкт-Петербург
2019**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.А. Зверев, И.А. Карасева, И.Н. Тимощук
ЭРГОНОМИКА И ОПТОТЕХНИКА
ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ
НАБЛЮДАЕМЫХ ПРЕДМЕТОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.02, 12.04.02
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата, магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2019

Зверев В.А., Карасева И.А., Тимощук И.Н. Эргономика и оптотехника зрительного восприятия наблюдаемых предметов – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 92 с.

Рецензент:

Архипова Людмила Николаевна, д.т.н., врио директора по научной работе и инновациям, гл. оптик, АО "ГОИ им. С.И.Вавилова";

В пособии описаны физиологические особенности и эргономические характеристики зрительного анализатора человека. Рассмотрена оптотехника зрительного восприятия наблюдаемых предметов при использовании различных визуальных оптических приборов. Приведены основные соотношения параметров и характеристик оптических приборов, определяющих качество воспринимаемой зрительной информации. Материал пособия ориентирован на студентов оптических и конструкторских специальностей



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019
© Карасева И.А., Тимощук И.Н., 2019

Оглавление

Введение	4
1. Зрительное восприятие естественным образом наблюдаемых предметов.	5
2. Глубина резко наблюдаемых предметов	7
3. Зрительные пороги	9
4. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при бинокулярном зрении	12
5. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при применении лупы. .	15
6. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при применении микроскопа	19
7. Эффективность использования светового потока в оптической системе микроскопа	25
8. Очки	31
9. Операционные очки	40
10. Зрительное восприятие предметов, наблюдаемых с помощью бинокулярных зрительных труб	43
Приложение. Основы учения о цвете	55
1. Зрительные ощущения	55
2. Основные понятия колориметрии	62
3. Параметры, определяющие цвет	63
4. Основные колориметрические системы	66
4.1. Система параметров L, λ, p	66
4.2. Трёхцветная система колориметрии R, G, B	66
4.3. Цветовой треугольник	68
4.4. Международная колориметрическая система X, Y, Z	73
4.5. Примеры цветовых расчётов	79
4.6. Оценка цветовых различий	84
4.7. Исторический аспект развития науки о цвете	85
Заключение	89
Литература	90

Введение

Глаз человека – удивительный орган, обладающий невероятно сложной структурой и выполняющий сложнейшие функции. Глаз способен обнаруживать различия в яркости светящихся объектов, различать или, как говорят оптики, «разрешать» мелкие детали, воспринимать цвет, форму, размер и характер поверхности предметов, движение, мерцание. А потом ещё и передавать информацию обо всём этом в мозг таким образом, что человек ощущает, а затем и «воспринимает», т.е. чувственно познаёт внешний мир. Свет и цвет являются первичными стимулами для зрительного восприятия окружающих объектов.

Обладание двумя глазами позволяет расширить возможности зрения либо за счёт увеличения поля зрения, либо за счёт получения двух изображений одного и того же объекта с разных точек. Многие животные обладают панорамным зрением вследствие того, что глаза у них расположены по бокам головы. У человека же, как и у других приматов, глаза расположены в одной плоскости и обеспечивают бинокулярное зрение - два плоских изображения наблюдаемого объекта, сформированные двумя глазами, накладываются в мозге, образуя одно трёхмерное изображение объекта.

Однако при всей сложности строения глазного аппарата и удивительных его возможностях эти возможности, увы, не безграничны. Для их расширения человеческий гений в своё время изобрёл линзу, затем очки, потом зрительную трубу, разновидности которой позволяли приближать удалённые предметы и увеличивать мелкие. Разумеется, известны конкретные имена этого «человеческого гения» - по истории оптики, как и по физиологии зрения, написано немало книг. Однако в данном пособии мы попытаемся разобраться с точки зрения оптотехники, как наблюдатель видит окружающие предметы невооружённым глазом, двумя глазами, есть ли отличие в зрительном восприятии естественным образом наблюдаемых предметов от наблюдений при помощи лупы или более сложных оптических систем. Указанные различия и особенности зрительного восприятия предметов окружающего пространства следует правильно учитывать при проектировании оптической техники, работающей с глазом.

Вместе с тем, разумеется, не забудем в пособии упомянуть учёных, работавших в разное время и над разгадками свойств и возможностей зрительного аппарата человека, и над расширением этих возможностей.

Так, например, в 1580 году Джованни Батиста (делла) Порта, итальянский врач, философ и алхимик, прибыл в Мурано, с целью научиться у местных стекольщиков делать линзы и параболические зеркала. Там он близко подружился с Паоло Сарпи (1552–1623), историком и богословом. В юные годы Паоло посвятил себя естественным и математическим наукам и, в частности, оптике, очарованный её естественнонаучным содержанием и

геометрическим подходом. В одном из своих “размышлений”, написанных приблизительно в 1578 году, П. Сарпи, напоминая, что видимые размеры предмета зависят от угла, под которым он виден, добавляет, что на это оказывают влияние также “...очки и другие прозрачные предметы, которые увеличивают или уменьшают предметы, просто увеличивая или уменьшая угол зрения”. «Размышления» Паоло Сарпи о естествознании, взятые из рукописи, которая хранится в Венеции, впервые были опубликованы лишь в 1882 году П. Кассани.

Теорема об угловом увеличении линз впервые была изложена, по всей вероятности, в брошюре Марко Антонио де Доминиса “De iridis visus et lucis” (“О радуге зрения и света”, Венеция, 1611) [1]. Поскольку, кроме упомянутой теоремы, интерес в указанной работе представляет лишь наблюдение того, что радуга образуется благодаря отражению света от задней поверхности капелек дождя, вполне справедливо предположить, что де Доминис узнал теорему об угловом увеличении линз непосредственно от Паоло Сарпи.

Но прежде чем перейти к работе глаза с линзой при построении изображения, рассмотрим, как воспринимает наблюдаемые предметы невооружённый глаз человека.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 12.03.02 Опотехника (Бакалавриат) и 12.04.02 Опотехника (Магистратура), изучающих дисциплины «Проектирование опτικο-электронных приборов и систем», «Основы конструирования опτικο-электронных приборов и систем», «Основы конструирования опτικο-электронных приборов и систем специального назначения», «Оптические офтальмологические приборы и системы», «Эргономика зрительной деятельности». Пособие может быть использовано для подготовки лекционного материала, а также и при самостоятельной работе студентов над лекционным материалом.

1. Зрительное восприятие естественным образом наблюдаемых предметов

Пусть l_A и l_B – высоты двух наблюдаемых предметов, расположенных соответственно на расстояниях L_A и L_B от наблюдателя, как показано на рис.1. Предмет l_A наблюдатель видит под углом ω_A , где $\text{tg}\omega_A = l_A / L_A$, а предмет l_B – под углом ω_B , где $\text{tg}\omega_B = l_B / L_B$. Относительную видимую величину наблюдаемых предметов естественно определить отношением $\eta = \text{tg}\omega_B / \text{tg}\omega_A$. Пусть $L_B > L_A$. Вполне очевидно, что при $l_B \leq l_A$ величина $\eta < 1$, т.е. соотношение величин наблюдаемых предметов l_A и l_B соответствует действительному. Вполне очевидно также, что при $L_B > L_A$ и при $l_B > l_A$ возможны три варианта расположения предметов, при которых величина отношения η принимает значения:

- $\eta > 1$; при этом воспринимаемая величина наблюдаемых предметов соответствует действительной;
- $\eta = 1$; при этом наблюдаемые предметы воспринимаются равной величины;
- $\eta < 1$; в этом случае воспринимаемая величина наблюдаемых предметов не соответствует действительной.

Воспринимаемая величина наблюдаемых предметов зависит и от их расположения в плоскости наблюдения. Так, например, радиус Луны, расположенной на расстоянии $L_{\text{лср}} = 384400$ км от Земли, равен $R_{\text{л}} = 1738$ км [2]. Угловой размер Луны $2\omega_{\text{л}} = 2R_{\text{л}}/L_{\text{лср}} = 2 \cdot 1738/384400 = 0,00904$. Предположим, что Луна восходит из-за дома, расположенного на расстоянии $L = 500$ м от наблюдателя. Луна и дом хорошо видны одновременно и кажутся расположенными в одной плоскости. При этом диаметр видимого диска Луны равен $D_{\text{л}} = 2L\omega_{\text{л}} = 500 \cdot 0,009 = 4,5$ м, т.е. занимает достаточно большую часть от высоты дома. Поэтому в отличие от обычного восприятия Луна видится диском огромного диаметра. Но вот Луна, поднимаясь всё выше, удаляется от направления на дом, её восприятие в одной плоскости с домом утрачивается, и Луна уже не воспринимается одновременно с домом; пропадает и сама возможность их сопоставления. При этом Луна наблюдателю представляется обычной величины.

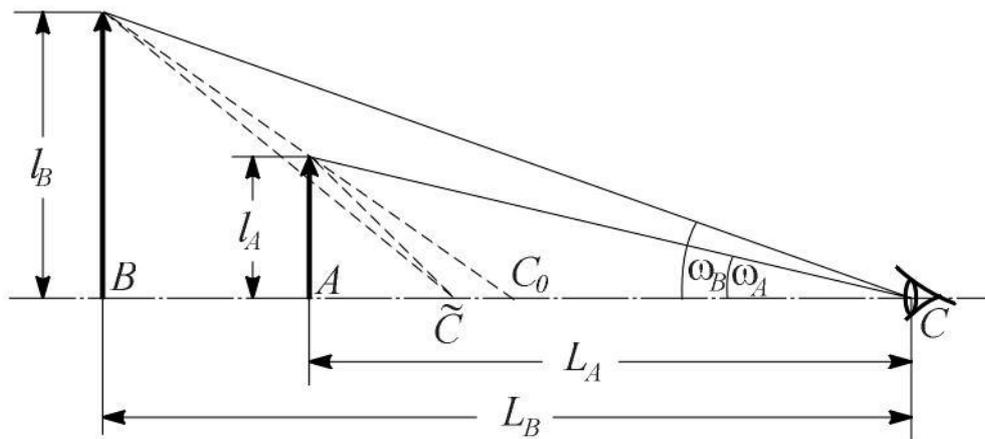


Рис.1. Угловая величина наблюдаемых предметов

Расстояние от Земли до Солнца $L_{\text{с}} = 149,6 \cdot 10^6$ км. При диаметре $D_{\text{с}} = 1391 \cdot 10^3$ км угловая величина Солнца $2\omega_{\text{с}} = D_{\text{с}}/L_{\text{с}} = 1391 \cdot 10^3/149,6 = 0,00930$. Из сопоставления угловых величин Луны и Солнца видим, что они примерно одинаковы. Поэтому земному наблюдателю Луна и Солнце представляются примерно одинаковой величины и расположенными одинаково далеко. Справедливость такого восприятия Луны и Солнца земным наблюдателем (при $\eta \approx 1$) подтверждает явление полного затмения Солнца Луной, когда Луна почти полностью экранирует для земного наблюдателя солнечное излучение. Коэффициент центрального экранирования солнечного диска Луной по

диаметру при полном затмении равен $k_{\ominus} = \text{tg}\omega_{\text{л}}/\text{tg}\omega_{\text{с}} = 0,00904/0,00930 = 0,972$. При этом освещённость на Земле падает в $k = 1/(1 - k_{\ominus}^2) \approx 18$ раз. Если изобразить диск Солнца в виде круга диаметром 100 мм, то при полном затмении светлой останется кольцевая полоска шириной 1,4 мм (рис.2,а). На рис.2,б представлена фотография наблюдаемой картины полного солнечного затмения.

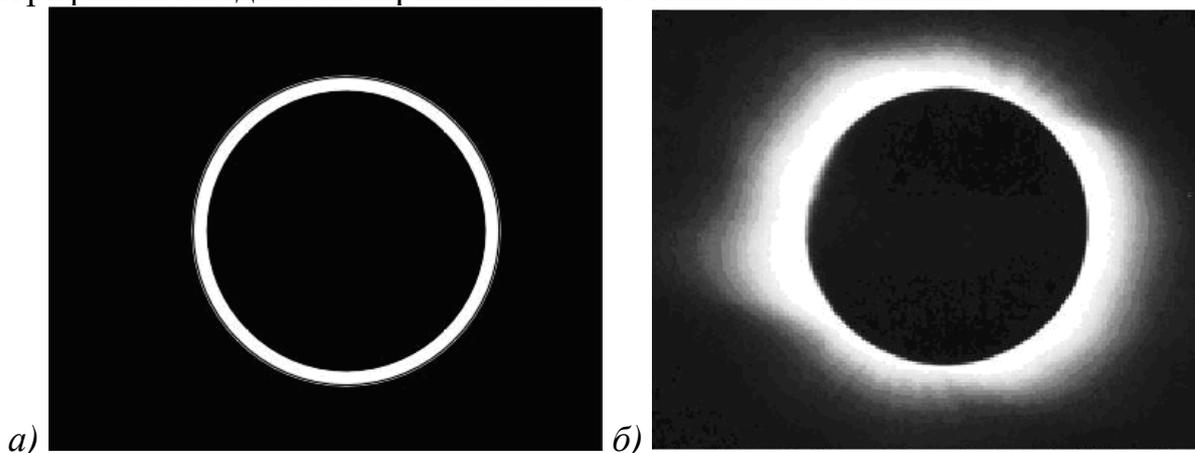


Рис.2. Полное солнечное затмение. Новосибирск. 1.08.2008

2. Глубина резко наблюдаемых предметов

В рассматриваемом случае предполагаем, что изображения наблюдаемых предметов одинаково резкие, т.е. наблюдаемые предметы располагались относительно наблюдателя в пределах глубины резкости. Определим глубину резко изображаемого пространства.

Деформацию (стрелку прогиба) волнового фронта на входном зрачке глаза наблюдателя, излучаемого точечным источником света A , расположенным на расстоянии L_A от наблюдателя, с достаточной точностью можно определить выражением

$$\Delta_A = \frac{d_{\Gamma}^2}{8L_A}, \quad (1)$$

где d_{Γ} – диаметр входного зрачка глаза. При перемещении точки A в точку B , расположенную на расстоянии L_B от наблюдателя, прогиб волнового фронта определяется как

$$\Delta_B = \frac{d_{\Gamma}^2}{8L_B}. \quad (2)$$

При этом изменение прогиба волнового фронта определяется разностью

$$W = \Delta_A - \Delta_B = \frac{d_{\Gamma}^2}{8} \frac{L_B - L_A}{L_A L_B} \quad \text{или} \quad W = \frac{d_{\Gamma}^2}{8} \frac{\Delta L_{AB}}{L_A L_B} = \frac{d_{\Gamma}^2}{8} \frac{\Delta L_{AB}}{L_A^2 + L_A \Delta L_{AB}}.$$

Отсюда находим, что

$$\Delta L_{AB} = \frac{8WL_A^2}{d_\Gamma^2 - 8WL_A}. \quad (3)$$

$$\text{При } W \leq \lambda/4: \Delta L_{AB} = \frac{2\lambda L_A^2}{d_\Gamma^2 - 2\lambda L_A}.$$

Отсюда следует, что чем больше расстояние L_A , тем больше расстояние ΔL_{AB} . Расстояние $\Delta L_{AB} = \infty$ ($L_B = \infty$) при $d_\Gamma^2 = 2\lambda L_A$. При этом

$$L_A^\infty = \frac{d_\Gamma^2}{2\lambda}. \quad (4)$$

При $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$: $L_A^\infty = d_\Gamma^2 \cdot 10^3 \text{ мм} = (d_\Gamma, \text{ мм})^2 \text{ м}$.

Находящиеся в радужной оболочке кольцевые и радиальные мышечные элементы ведают сужением и расширением зрачка глаза. Благодаря им диаметр зрачка глаза при изменении освещённости может изменяться в пределах от 2 мм до 8 мм [3]. На основании обобщения результатов исследования многих авторов Крауфорд предложил математическую зависимость диаметра зрачка от уровня яркости наблюдаемого пространства [4]:

$$d = 5 - 3th(0,4 \lg L), \quad (5)$$

где d – диаметр зрачка глаза, [мм]; L – яркость поля зрения, [кд/м²]; th – гиперболический тангенс: $th(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$. При оптотехнических расчётах, как правило, принимают $d_\Gamma = 2$ мм. Однако легко убедиться, что при этом в соответствии с формулой (5) яркость поля зрения должна быть равной $L = \infty$. Диаметр центрального (светлого) дифракционного пятна рассеяния в изображении точки определяется формулой $\delta = 2,44(\lambda f'_\Gamma) / nd_\Gamma$, где n – показатель преломления среды в пространстве изображения; f'_Γ – заднее фокусное расстояние оптической системы глаза. С уменьшением диаметра зрачка глаза диаметр дифракционного кружка рассеяния в изображении точки увеличивается. Однако при этом сферическая aberrация уменьшается. Поэтому «...наилучшие условия наиболее чёткого непосредственного наблюдения объектов имеют место при диаметре зрачка глаза, равном 2–4 мм» [3].

Яркость ясного неба днём $L = 4 \cdot 10^3$ кд/м² [5]. Подставив значение яркости в формулу (5), получаем $d_\Gamma = 3,1$ мм. Яркость неба, покрытого белыми облаками, равна $12 \cdot 10^3$ кд/м². Тогда в соответствии с формулой (5) находим $d_\Gamma = 2,4$ мм. Освещённость, создаваемая прямым солнечным светом (июль, полдень), равна $E = 1 \cdot 10^5$ лк. Альbedo таких поверхностей, как песок, равно 0,25–0,30, а зелёной лиственной растительности, травы – 0,17. При этом яркость поверхности можно определить, применив формулу

$$L = \frac{a}{\pi} E, \quad (6)$$

где a – альbedo, или коэффициент отражательной способности поверхности; E

– освещённость поверхности. Принимаем $a=0,2$. Тогда при $E=1 \cdot 10^5$ лк яркость $L=6,3662 \cdot 10^3$ кд/м². Подставив это значение яркости в формулу (5), получаем $d_{\Gamma}=2,76$ мм. При выполнении последующих расчётов можно принять $d_{\Gamma}=2,5$ мм. Так, например, при $\lambda=0,5$ мкм: $L^{\infty}_A=d^{\infty}_A \cdot 10^3$ мм = $(d_{\Gamma}, \text{мм})^2$ м=6,25 м. Заметим, что все предметы, расположенные в пределах глубины резкости, при наблюдении воспринимаются расположенными в одной плоскости.

3. Зрительные пороги

Свойства глаза, характеризующие зрительную деятельность человека, принято называть зрительными функциями. Все функции зрения тесно взаимосвязаны и взаимозависимы. Было бы более корректно говорить не о конкретных порогах, а о пороговых условиях. Поэтому, говоря о зрительных порогах, следует указывать их зависимость от других характеристик, условий наблюдения или в некоторых случаях называть порог при таких значениях других параметров, когда они практически уже не влияют на значение порога.

Среди основных назовём следующие пороги [3].

1. Предельный угол (пороговый размер) δ – наименьший угловой размер ещё различимой детали при яркости не менее 100 кд/м² и контрасте, близком к единице. Обратную величину $V=1/\delta$ называют остротой зрения.

2. Пороговый контраст ε – наименьший, ещё различимый контраст большого объекта (не менее 1°) с фоном, яркость которого $L_{\Phi} \geq 100$ кд/м². Обратную величину $1/\varepsilon$ называют контрастной чувствительностью.

3. Пороговая яркость L_n – наименьшая яркость большого светлого пятна (угловой диаметр которого $\delta \geq 50'$), ещё различимого на совершенно тёмном фоне ($L_{\Phi} \leq 10^{-6}$ кд/м²). Обратную величину $1/L_n$ называют абсолютной световой чувствительностью.

4. Видимость точечного источника света определяется освещённостью E , которую источник создаёт на зрачке наблюдателя. Обычно эту освещённость называют блеском источника. Блеск источника, при котором он едва заметен, называют пороговым блеском E_n .

Для пятен небольших угловых размеров соблюдается закон Рикко

$$L\gamma^2 = \text{const.}, \quad (7)$$

где γ не превышает 2–30' в зависимости от яркости фона. Если объект – круг диаметром $2r$ и яркостью L , а его сила света $I = \pi r^2 L$, то освещённость E на зрачке наблюдателя, находящегося на расстоянии R , вычисляется по формуле $E = I / R^2 = \pi r^2 L / R^2$. Но $r/R = \gamma$. При этом $E = \pi L \gamma^2$. Следовательно, в соответствии с законом Рикко пороговая освещённость на зрачке или пороговый блеск E_n для малых объектов – величина постоянная: $E_n = \text{const.}$

Глаз с его замечательной способностью адаптироваться к очень широкому диапазону яркостей – от уровня яркости дневного неба к уровню яркости

ночного – является не только приёмником подавляющего объёма необходимой человеку информации, но и приносит наблюдателю огромное эстетическое наслаждение.

Различимость звёзд во время сумерек – это сочетание контраста звёзд на фоне неба и адаптации глаз. Когда в результате вращения Земли Солнце опускается под горизонт на 18° , яркость неба в зените уменьшается в 400.000 раз и наступает астрономическая ночь, при этом в ясную погоду вдали от света городских огней взору открывается изумительная и таинственная красота ночного звёздного неба.

В ясную, безлунную ночь невооружённым глазом над горизонтом можно видеть около 3000 звёзд. Ещё во втором веке до Р.Х. один из основоположников астрономии древнегреческий учёный Гиппарх разделил все видимые на небе невооружённым глазом звёзды по яркости на шесть групп. Самые яркие звёзды он назвал звёздами 1-й величины, а самые слабые – звёздами 6-й величины. Между ними он расположил звёзды 2-й, 3-й, 4-й и 5-й величины. При переходе от одной величины к следующей глаз ощущает одинаковый перепад освещённости (блеска).

В 1846 году немецкий анатом и физиолог Эрнест Генрих Вебер (1795–1878) установил, что чувствительность глаза к изменению освещённости пропорциональна относительному изменению освещённости, т.е. $\Delta m = c \Delta E / E$. Немецкий физик, психолог, философ-идеалист и писатель-сатирик (псевдоним – доктор Мизес) Густав Теодор Фехнер (1801–1887) в 1860 году сделал допущение, что едва заметные изменения в ощущении глазом света можно считать дифференциалами [6]. Это позволило ему выразить основной психофизический закон в виде дифференциального уравнения:

$$dm = c dE / E. \quad (8)$$

Интегрирование этого уравнения привело к установлению зависимости интенсивности раздражения глаза светом от освещённости в виде

$$m = c \ln E + k, \quad (9)$$

где c и k – некоторые постоянные. Эту зависимость принято называть основным психофизическим законом Вебера-Фехнера.

Обозначим $\ln E = x$. Тогда, учитывая, что $E = e^x$, получаем $\lg E = x \lg e = \ln E \cdot \lg e$. Применяя полученное соотношение, выражение (9) удобно переписать в виде:

$$m = c \frac{\lg E}{\lg e} + k = \tilde{c} \lg E + k. \text{ Отсюда следует, что } m_1 - m_2 = \tilde{c} \lg \frac{E_1}{E_2}. \text{ Звёздный}$$

каталог Гиппарха – древнейший из дошедших до нас. Сопоставляя оценку звёздных величин Гиппархом с современными объективными измерениями освещённости от этих же звёзд, установлено, что когда одна звезда имеет звёздную величину на единицу больше, чем другая, то освещённость от первой в 2,5 раза меньше, чем от второй [6]. Таким образом, при $m_1 - m_2 = 1$:

$E_1/E_2=1/2,5=0,4$. Отсюда следует, что $\tilde{c} = -\frac{1}{0,398} = -2,512$. В 1850 году по

предложению Погсона отношение блеска звёзд при разности в пять звёздных величин было принято равным 100. Это означает, что при $m_1 - m_2 = 5$ отношение блеска звёзд $E_1/E_2=0,01$. При этом $\tilde{c} = -2,5$. Тогда $m_1 - m_2 = -2,5 \lg \frac{E_1}{E_2}$. Отсюда следует, что

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}. \quad (10)$$

Последнее выражение, определяющее зависимость между блеском двух звёзд E_1 и E_2 и их видимыми звёздными величинами m_1 и m_2 , называют формулой Погсона. Если теперь приписать какой-либо звезде фиксированную звёздную величину, т.е. выбрать нуль-пункт, то этим соотношением будут определены видимые звёздные величины m всех звёзд. Для расчёта световых и энергетических характеристик приёмников различной спектральной чувствительности необходимо иметь эталонную звезду нулевой звёздной величины. Нуль-пункт для системы звёздных величин был условно определён по группе выбранных звёзд в области Полярной звезды, называемых Северным Полярным рядом. В видимой области спектра за эталонную звезду нулевой звёздной величины принимается та, которая создаёт на границе атмосферы освещённость, равную $E_0 = 2,78 \cdot 10^{-6} \text{ лк} = 2,78 \cdot 10^{-10} \frac{\text{лм}}{\text{см}^2}$.

Наиболее близка к нулевой звёздная величина таких хорошо известных звёзд, как Вега (или α Лиры) и Капелла (или α Возничего). Интегральную освещённость, создаваемую звездой звёздной величины m , можно рассчитать, используя формулу Погсона [6]:

$$E[\text{лк}] = E_0 \cdot 2,512^{-m} = 2,78 \cdot 10^{-6} \cdot 2,512^{-m}. \quad (11)$$

Вся история астрономии связана с созданием новых инструментов, позволяющих повысить эффективность наблюдений.

5. Способность зрения ощущать разницу в расстояниях до двух объектов определяется разностью параллактических углов $\Delta\alpha$. Наименьшая разность параллактических углов $\Delta_n\alpha$, ещё воспринимаемая зрением, называется порогом глубинного зрения. Обратную величину $1/\Delta_n\alpha$ называют остротой стереоскопического зрения.

Наименьшая, ещё различимая разница в цвете двух объектов (или двух частей одного объекта), называется цветовым порогом. Поскольку цвет – величина трёхмерная, векторная, цветовой порог – тоже вектор.

4. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при бинокулярном зрении

Рассмотрим характер видения предметов при бинокулярном зрении. Весьма важными движениями глаз являются сведение (конвергенция) и разведение (дивергенция) зрительных осей. Конвергенция требуется при переводе взгляда с далёкого объекта на расположенный ближе, дивергенция – наоборот, с близкого объекта на более далёкий. За наименьшую удалённость объекта, при которой уже не приходится конвергировать и зрительные оси глаз считаются параллельными, принимается расстояние, равное 6 м.

Аккомодация – способность глаза перефокусировать изображение в зависимости от расстояния до изображаемого предмета так, чтобы на сетчатке получалось его чёткое изображение в результате произвольного изменения рефракции глаза. В процессе аккомодации осуществляются изменение кривизны преломляющих поверхностей хрусталика и перемещение его слоёв под воздействием аккомодационной (цилиарной) мышцы. При наибольшем напряжении аккомодации A_P глаз фиксирует на сетчатке некоторую точку P , которая лежит от него на расстоянии a_P и называется ближней точкой ясного видения. Расстояние до наиболее удалённой точки, наблюдаемой без напряжения аккомодации, обозначим a_R . Тогда пределы, в которых глаз способен изменять фокусировку изображения, характеризуются величиной A_{PR} , определяющей объём аккомодации:

$$A_{PR} = 1/a_R - 1/a_P = A_R - A_P . \quad (12)$$

Аккомодация и конвергенция вызываются одной причиной – приближением или удалением наблюдаемого объекта, вследствие чего они взаимосвязаны. Эта зависимость определяет соответствие состояний аккомодации и конвергенции. Недостаточность аккомодации или конвергенции, нарушение связи между ними приводят к зрительному дискомфорту, астенопическим явлениям – быстрому утомлению при чтении, затруднению при слежении за движущимися объектами и т.д.

Когда человек смотрит на звёздное небо, оси его глаз параллельны, и изображение любой звезды в обоих глазах попадает на точки, лежащие на одинаковых меридианах и на равном расстоянии от зрительных осей глаз. Такие точки называются идентичными или корреспондирующими. Неидентичные точки называются диспаратными. Если человек переведёт взгляд на близкий предмет A , как показано на рис. 3, то вследствие конвергенции оси глаз сойдутся на этой точке A под углом α , а её изображение в обоих глазах попадёт в центры сетчаток A' . Изображения же другой, более далёкой точки A_1 , в левом и правом глазу попадут уже на диспаратные точки A'_1 . И так будет с любой точкой A_n . Степень диспаратности каждой точки A_n ощущается как различие в расстояниях до неё относительно точки фиксации A .

Нормальное бинокулярное зрение характеризуется следующими особенностями: во-первых, слиянием (фузией) двух монокулярных изображений, видимых отдельно правым и левым глазом при рассматривании предметов одновременно двумя глазами, в одно объёмное изображение, и, во-вторых, стереовосприятием, включающим как ощущение объёмности предметов, так и бинокулярное восприятие удалённости других видимых объектов относительно бификсированного объекта.

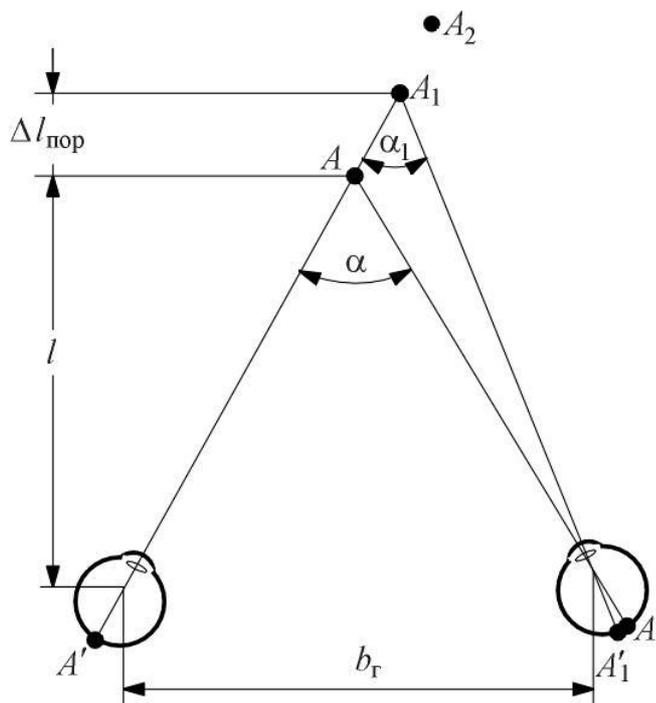


Рис.3. Схема конвергенции и стереоэффекта

Для нормального бинокулярного стереоскопического зрения необходимы следующие условия:

- нормальное функционирование глазодвигательной системы глаз;
- достаточная острота зрения и не очень большая разница в остроте правого и левого глаза;

– прочная связь между двигательной и сенсорной частями бинокулярного аппарата (конвергенция, дивергенция, фузия); скрытое косоглазие, или гетерофория, не создаёт косметического дефекта, но может препятствовать возникновению нормального стереоскопического эффекта; лица с гетерофорией более 3° не могут работать с бинокулярными приборами;

– малое различие в масштабах изображений в левом и правом глазе. Неравенство размеров или различный масштаб изображений, получаемых на сетчатке правого и левого глаза при рассматривании двумя глазами одного и того же предмета, называется анизейконией. Если анизейкония не превышает 2,0–2,5%, то её можно корригировать обычными сферическими линзами; в

противном случае нужны специальные очки.

Стереоскопическое наблюдение с помощью бинокулярных приборов может быть нарушено, если оптические оси оптических систем применяемого прибора будут не параллельны друг другу. Отклонение от параллельности должно лежать в следующих пределах [3]:

по вертикали – 0,25 призмной диоптрии (пр. дптр.), или 8,5';

по горизонтали – на дивергенцию (расхождение зрительных осей) – 0,5 пр. дптр., или 17';

по горизонтали – на конвергенцию (схождение зрительных осей) – 1,0 пр. дптр., или 34'.

Заметим, что призмная диоптрия – единица измерения призмного отклонения светового луча, равная $100 \operatorname{tg} \psi$, где ψ – угол отклонения в градусах.

Итак, бинокулярное зрение обеспечивает стереоскопическое восприятие пространства. Стереоскопическое зрение позволяет обнаруживать различие двух объектов по глубине. Поэтому эта способность получила название пространственного или глубинного зрения. При малой величине угла α (см. рис. 3) имеем:

$$\alpha = b/l, \quad (13)$$

где b – расстояние между зрачками глаз наблюдателя, м; l – расстояние от глаз до ближайшего из рассматриваемых объектов, м.

Порог глубинного зрения определяется формулой, полученной путём дифференцирования выражения (13) по α и последующей замены дифференциалов конечными разностями:

$$\Delta\alpha = -\frac{b\Delta l}{l^2} 206\,265'', \quad (14)$$

где $\Delta\alpha$ – разность параллактических углов для двух разноудалённых объектов (как показано на рис. 3), в угл.сек.; Δl – разность расстояний от глаз до двух объектов, ещё позволяющая определить, что эти расстояния различны, м. Порог глубинного зрения зависит от разных факторов: от яркости фона (наибольшая острота зрения наблюдается при яркости фона около 300 кд/м²), контраста объектов (с увеличением контраста порог глубинного зрения уменьшается), продолжительности наблюдения.

Порог восприятия глубины при оптимальных условиях наблюдения колеблется в пределах от 10–12 до 5'' (у отдельных наблюдателей порог достигает 2–5''). Полагая в формуле (13) угол α равным порогу глубинного зрения $\Delta\alpha=10''$, при $b=64$ мм находим, что максимальное расстояние, на котором глаз ещё воспринимает глубину пространства, равно $l=1,32$ км. Это расстояние называется радиусом стереоскопического зрения. Все предметы, находящиеся на этом или на большем расстоянии от наблюдателя, неотличимы для него от бесконечно удалённых предметов.

5. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при применении лупы

Линза, формирующая увеличенное изображение наблюдаемого предмета, была первым инструментом, расширяющим зрительные возможности глаза. Увеличительные стёкла стали объектом научного изучения ещё в эпоху раннего средневековья. Первое достоверное описание способности линз создавать увеличенное изображение предмета содержится в трудах монаха францисканского ордена Роджера Бекона (1214–1294), выпускника Оксфордского университета, одного из выдающихся учёных и мыслителей XIII века.

Одна из главных плоскостей плосковыпуклой линзы представляет собой касательную плоскость в осевой точке выпуклой поверхности, а другая параллельна плоской поверхности и расположена на расстоянии, равном d/n от неё, где d – толщина линзы. Если линзу выпуклой поверхностью положить на наблюдаемый предмет, то обнаружим, что поперечное увеличение изображения, образованного центральной зоной линзы, равно единице.

Если наблюдаемый предмет совместить с плоской поверхностью линзы, то при $d=r$, где r – радиус кривизны выпуклой поверхности, поперечное увеличение изображения, образованного линзой, равно $V=n$.

Угловая величина наблюдаемого невооружённым глазом предмета высотой l , расположенного на расстоянии L от наблюдателя, определяется отношением

$$\operatorname{tg} \omega = l/L. \quad (15)$$

В пространство между наблюдаемым предметом и глазом наблюдателя поместим тонкий оптический компонент ϕ , как показано на рис. 4.

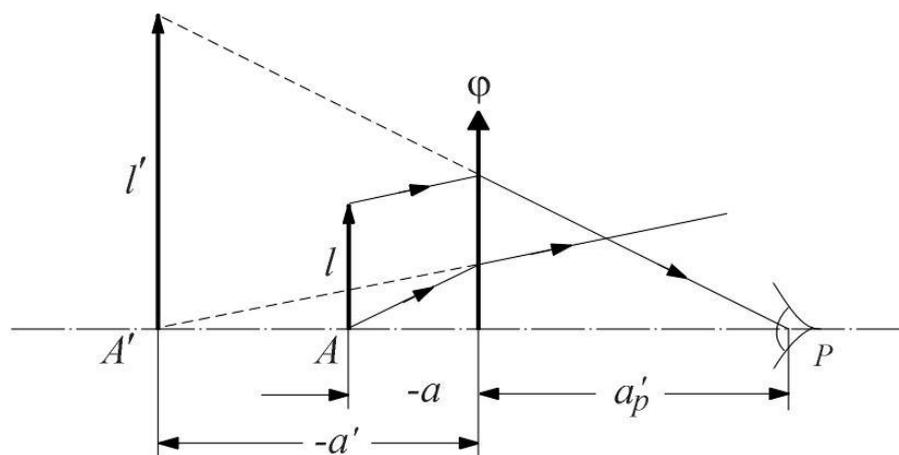


Рис.4. Применение тонкого компонента в качестве лупы

На этом рисунке a' – расстояние от тонкого компонента до изображения предмета; $a'p$ – расстояние от компонента ϕ до зрачка глаза наблюдателя. Поперечное увеличение изображения, образованного тонким компонентом,

$V=l'/l$. При этом угловая величина изображения наблюдаемого предмета определится выражением

$$\operatorname{tg}\omega' = \frac{l'}{a'_p - a'} = \frac{Vl}{a'_p - a'}. \quad (16)$$

Видимое (угловое) увеличение изображения наблюдаемого предмета естественно определить отношением:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\omega'}{\operatorname{tg}\omega} = \frac{VL}{a'_p - a'}. \quad (17)$$

Применив формулу отрезков: $1/a' - 1/a = \varphi$ находим, что $V = 1 - a'\varphi$ при $V = a'/a$. При этом выражение (17) можно представить в виде:

$$\Gamma = \frac{1 - a'\varphi}{a'_p - a'} L. \quad (18)$$

Пусть $a'_p - a' = L$. Отсюда следует, что $a' = a'_p - L$. Выполнив соответствующую замену в выражении (18), получаем

$$\Gamma = 1 + \frac{L - a'_p}{f'}. \quad (19)$$

Это выражение при $L = \text{const}$ определяет зависимость видимого увеличения изображения наблюдаемого предмета от положения глаза наблюдателя относительно оптического компонента. Так, например, при $a'_p = L$: $\Gamma = 1^\times$; $a' = 0$, а при $a'_p = 0$: $a' = -L$;

$$\Gamma = 1 + L/f'. \quad (20)$$

Следовательно, при $f' = L$: $\Gamma = 2^\times$, а при $f' = \infty$ (например, оконное стекло): $\Gamma = 1^\times$. В рассматриваемом случае оптический компонент принято называть лупой. Лупа [фр. *loupe*] – собирающая линза в оправе или система из нескольких линз, увеличивающая размеры рассматриваемых мелких предметов в 2–50 раз [7]. При продольном перемещении лупы в направлении от наблюдаемого предмета

при $0 \geq a \geq \frac{Lf'}{f' - L}$, т.е. при $0 \geq a' \geq -L$, видимое увеличение изображения

рассматриваемого предмета изменяется в пределах: $1 \leq \Gamma \leq 1 + L/f'$.

Переместим лупу в положение, при котором наблюдаемый предмет окажется в её передней фокальной плоскости; при этом $a = -f'$. В этом случае в соответствии с формулой отрезков отрезок $a' = \infty$. В этом случае формула (18) принимает вид:

$$\Gamma = \varphi L. \quad (21)$$

При таком расположении относительно плоскости предмета лупу называют окуляром. Окуляр [лат. *ocularis* глазной] – обращённая к глазу часть оптической системы видоискателя, дальномера, бинокля, телескопа, микроскопа и т.д., предназначенная для рассматривания с некоторым

увеличением оптического изображения, образованного объективом прибора; состоит из двух и более линз [7]. Видимое увеличение изображения, определяемое формулой (21), принято называть окулярным увеличением изображения.

Из формул (20) и (21) следует, что, чем меньше фокусное расстояние лупы, тем больше видимое увеличение изображения наблюдаемого предмета. Около 1660 года итальянец делла Торре изготавливал шарообразные лупы (застывшие капли стекла), диаметр которых доходил до 0,17 мм, дававшие 1500-кратное увеличение [5]. При малых фокусных расстояниях лупу принято называть простым микроскопом. Наиболее знаменитой личностью в истории микроскопии является Антони ван Левенгук (1632–1723 гг.), живший в голландском городе Дельфте, строивший и применявший для исследования простые микроскопы с увеличением до трёхсот крат. Левенгук впервые наблюдал и описал мир микроскопических организмов, в том числе и одноклеточных (бактерий). Для наблюдения движения кровяных телец в капиллярных сосудах хвоста молодого угря он даже построил специальный микроскоп. В 1698 г. Левенгука посетил русский царь Пётр I, находившийся в то время в Голландии. Несомненно, что сам Пётр и его соратники закупили и привезли из своих зарубежных поездок ряд простых и сложных микроскопов для организованной в Санкт-Петербурге Кунсткамеры. После создания Академии наук микроскопы перешли в её ведение. Здесь они были под рукой у молодых русских учёных, возглавляемых М.В. Ломоносовым. Они могли поэтому не только по достоинству оценить значение этого оптического инструмента для развития биологии, медицины и других естественных наук, но и принять активное участие в его усовершенствовании.

Конструкция микроскопа Левенгука очень проста. Как показано на рис.5, в отверстии между двумя металлическими пластинками 1 закреплена короткофокусная линза 2. К пластинкам 1 при помощи винта 3 и пружинящего угольника 4 прикреплено устройство держателя рассматриваемого предмета. Это устройство состоит из тройной гайки 7, в которую ввёрнуты три винта. При этом винт 8 является несущим, винт 6, упирающийся в пластинку 1, служит для фокусировки (за счёт изгиба пружинящего угольника 4), а винт 5, снабжённый остриём для закрепления предмета, применяется главным образом для вращения предмета.

Практически одновременно с изобретением зрительной трубы был изобретён и сложный микроскоп. В 1610 году известный итальянский учёный Галилео Галилей (1565–1642 гг.) построил сложный микроскоп, аналогично изобретённой им зрительной трубе состоящий из собирающего объектива и рассеивающего окуляра. Г. Галилей писал: “Если приближаться на расстояния совсем малые, в четыре шага, в два, в один, в полшага, то изображение мутнеет и темнеет, и для отчётливого и ясного наблюдения телескоп надо удлинять.

Этому удлинению соответствует большее увеличение. При этом увеличение зависит только от удлинения трубы, а не от приближения предмета”. Факт изобретения микроскопа Галилеем подтверждает его биограф Д. Вивiani: “Изобретение телескопа привело великого мужа к изобретению микроскопа. В 1612 году он послал один свой микроскоп польскому королю Казимиру”. Термин “микроскоп” впервые был применён в 1625 году членом римской Академии Г. Фабером именно к построенному Г. Галилеем прибору.

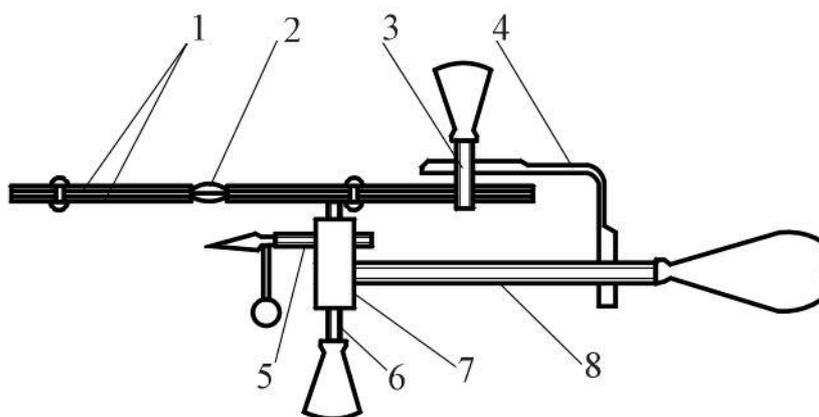


Рис.5. Микроскоп Левенгука

В своей “Диоптрике” Христиан Гюйгенс писал: “В 1621 году Дребель, голландец, живший в Лондоне, был известен как обладатель таких сложных микроскопов и считался всеми их изобретателем”. Известно, что микроскопы, изготовленные Корнелием Дребелем из Алькмара в Голландии, показывали предмет в перевёрнутом виде. Отсюда следует, что микроскопы Дребеля состояли из двух положительных (выпуклых) линз, дающих перевёрнутое изображение наблюдаемого предмета. Сложный микроскоп, состоящий из двояковыпуклого объектива и двояко- или плосковыпуклого окуляра, явился прототипом современных сложных микроскопов.

В 1747 году действительный член Петербургской академии наук Леонард Эйлер (1707-1783) предложил идею создания ахроматического объектива микроскопа. Фундаментальная работа Л. Эйлера в области геометрической оптики нашла отражение в его трёхтомной “Диоптрике”, вышедшей в 1769–1771 годах. О вопросах, рассмотренных в “Диоптрике”, даёт достаточно конкретное представление опубликованная в 1774 году Н.Фуссом – учеником Л. Эйлера работа: “Подробное наставление по приведению телескопов самых разнообразных видов к наивысшей возможной степени совершенства, извлечённое из диоптрической теории Г.Эйлера старшего и доступно изложенное для всех мастеров этого дела. С описанием микроскопа, который можно считать наиболее совершенным в своём роде и который может давать любые желательные увеличения”. В 1784 году была опубликована работа действительного члена Петербургской академии наук Франца Ульриха Теодора

Эпинуса (1724-1802): “Ахроматический микроскоп новой конструкции, пригодный для рассматривания объектов в свете, отражённом их поверхностью”. В этом же году микроскоп Ф. Эпинуса был изготовлен. Воспитатель императора Александра I Ф.Ц. Лагарк видел этот инструмент и в письме к Ж.М. Фавру от 8 августа 1785 года об Эпинусе и его инструменте писал: “Он только что усовершенствовал микроскоп до такой степени, что больше сделать невозможно. Каждый предмет виден с необыкновенной ясностью и сохраняет свою природную окраску. Это ещё не единственное преимущество. Микроскоп приделан к подзорной трубе в три фута длиною, им можно управлять с необыкновенной лёгкостью, и, укорачивая или удлиняя трубу, можно видеть весь предмет или только его часть, достигая произвольного увеличения, если желают с большим или меньшим вниманием рассмотреть какую-либо часть его. Наконец, так как объектив находится на расстоянии 10 дюймов от предмета, а наблюдатель на три фута позади, то вы понимаете, сударь, что можно наблюдать за всеми движениями насекомых, не пугая их. Это изобретение представляет великую возможность для естественной истории и наделает много шума, когда с ним более познакомятся”. Это весьма лаконичное, но предельно чёткое описание микроскопа Ф. Эпинуса даёт ясное представление о принципиальной схеме, положенной в основу его построения. Важно ещё раз обратить внимание на следующие слова Ф.Ц. Лагарка: “...укорачивая или удлиняя трубу, можно видеть..., достигая произвольного увеличения...”. Отсюда следует, что в укомплектованном шестью сменными объективами ахроматическом микроскопе Ф. Эпинуса предусмотрена возможность плавного изменения увеличения за счёт изменения расстояния между предметом и изображением (длины тубуса). Итак, благодаря трудам Л. Эйлера, Н. Фусса, Ф.У.Т. Эпинуса и других именно в России была разработана и осуществлена первая в мире конструкция ахроматического микроскопа переменного увеличения. Идея изменения увеличения микроскопа путём изменения длины его тубуса не получила продолжения в последующих схемах. Тем не менее, сам факт её осуществления имеет огромное значение для понимания развития прикладной оптики.

6. Зрительное восприятие наблюдаемых предметов при применении микроскопа

Обычно принимается, что две точки видны отдельно, если максимум дифракционной картины в изображении одной совпадает с минимумом дифракционной картины другой, и наоборот. Разрешающая способность определяется тогда расстоянием между двумя светящимися точками, равным радиусу дифракционного кружка (радиусу кольца первого минимума), определяемому формулой

$$r = \frac{1,22\lambda}{2n \sin \sigma}, \quad (22)$$

где λ – длина волны света; $n \sin \sigma = A$ – передняя числовая апертура оптической системы объектива. Для оптической системы микроскопа эту формулу можно представить в виде:

$$r = \frac{1,22\lambda}{d'} f'_m, \quad (23)$$

где d' – диаметр выходного зрачка микроскопа; f'_m – его фокусное расстояние.

Чтобы определить разрешающую способность микроскопа при визуальном наблюдении, нужно, очевидно, знать свойства глаза, влияние на разрешающую способность величины диаметра его входного зрачка. Для этого А. Арнюльф ввёл понятие “специфического предела разрешения”, определяемого коэффициентом ψ . В случае визуального наблюдения разрешающую способность определим формулой, подобной формуле (23), в виде:

$$r = \frac{\psi \lambda}{d'} f'_m, \quad (24)$$

где d' – диаметр выходного зрачка микроскопа при визуальном наблюдении; $f'_m = \frac{d'}{2A}$; $A = n \sin \sigma$. При этом должно соблюдаться условие: $d' > 0$; при $d' \geq 2$ мм: $d' = d_{\text{гл}}$, $d_{\text{гл}}$ – диаметр зрачка глаза. Для обеспечения этого условия микроскоп следует оснастить, например, окулярами соответствующего фокусного расстояния.

Видимое (угловое) увеличение наблюдаемого изображения определим формулой

$$\Gamma = \frac{L}{f'_m} = \frac{2AL}{d'}. \quad (25)$$

Из вида формул (24) и (25) видим, что чем меньше диаметр выходного зрачка микроскопа d' , тем ниже разрешающая способность микроскопа и тем больше видимое увеличение изображения и наоборот. Отсюда следует, что выбор величины d' не очевиден.

Запишем формулу (24) в виде:

$$2Ar = \psi \lambda. \quad (26)$$

В качестве тест-объекта для определения разрешающей способности микроскопа при визуальном наблюдении применим миру Фуко. При этом разрешающую способность будем считать равной предельно разрешаемому линейному элементу миры. Тогда при $A = \text{const.}$ при выбранном значении диаметра выходного зрачка d' определяем визуально разрешаемый минимальный элемент миры Фуко r_m . При этом выражение (26) принимает вид: $2Ar_m = \psi \lambda$. Отсюда находим, что

$$\psi = 2A \frac{r_m}{\lambda}. \quad (27)$$

Исследования, выполненные А.Арнюльфом в Оптическом институте в Париже, показали, что визуальная разрешающая способность при различных диаметрах выходного зрачка микроскопа (при $d' \geq 2$ мм: $d' = d_{\text{гл}}$) различна. Разрешающую способность А.Арнюльф определял при наблюдении миры Фуко, контраст которой определялся отношением $\gamma = \frac{B_1 - B_2}{B_1}$, где B_1 – яркость

светлых штрихов, а B_2 – тёмных. В результате исследований А.Арнюльф показал, что визуальная разрешающая способность безабберационного микроскопа для тест-объекта Фуко с контрастом, равным единице, для ряда значений диаметра выходного зрачка определяется соотношениями [8, 9]:

$$\text{при } d'=0,7\text{мм: } r_m = \frac{1,03\lambda}{2n \sin \sigma}, \text{ при } d'=2\text{мм: } r_m = \frac{2,5\lambda}{2n \sin \sigma},$$

$$\text{при } d'=3\text{мм: } r_m = \frac{3,45\lambda}{2n \sin \sigma}, \text{ при } d'=3\text{мм: } r_m = \frac{5\lambda}{2n \sin \sigma}.$$

На рис. 6 приведены кривые $\psi = \psi(d')$, полученные А.Арнюльфом, характеризующие визуальную разрешающую способность микроскопа при трёх значениях контраста миры Фуко. По оси ординат отложены значения величины ψ , а по оси абсцисс – значения диаметра выходного зрачка d' . Кривую $\psi = \psi(d')$ при $\gamma=1$ можно аппроксимировать выражением вида [10, 11]:

$$\psi = 1,03 + 1,4 \frac{(d' - 0,7)^2}{d'}. \quad (28)$$

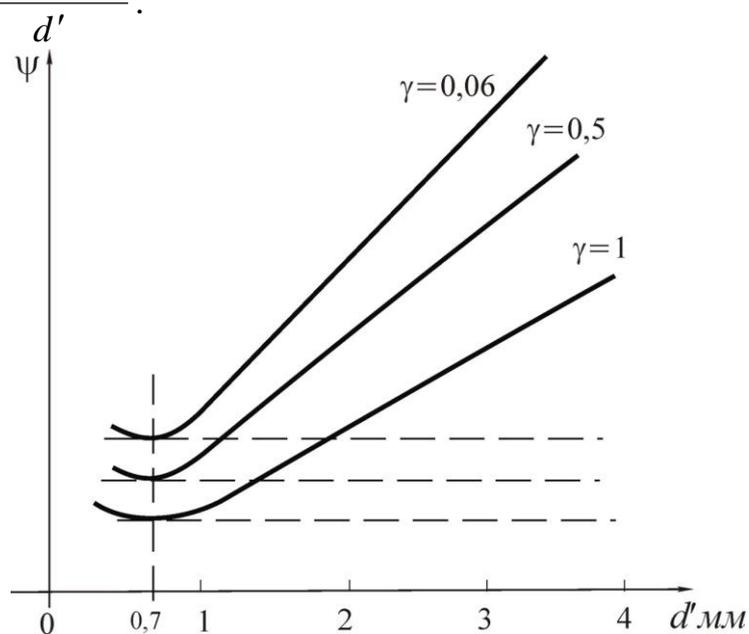


Рис. 6 Кривая зависимости $\psi = \psi(d')$

Дифференцируя это выражение, получаем:

$$\frac{d\psi}{dd'} = (d' - 0,7)(1,8d' + 0,7). \text{ Из условия } \frac{d\psi}{dd'} = 0 \text{ находим, что } d'_{extr} = 0,7 \text{ мм.}$$

При этом $\psi = 1,03$.

Падение разрешающей способности глаза при $d' < 0,7$ мм определяется, в частности, так называемыми энтоптическими [*энто...*(от греческого *entós* – внутри) – часть сложных слов, означающая "внутренний"] явлениями, которые сильно ухудшают видение и действительно наблюдаются при малых величинах выходных зрачков (при больших увеличениях изображения предмета) оптических приборов.

Итак, вполне естественное стремление иметь видимое увеличение изображения сколь угодно большим ограничивается визуальной разрешающей способностью, определяемой размером выходного зрачка микроскопа. Принято считать [12], что диаметр выходного зрачка d' не должен быть меньше 0,5 мм, а, с другой стороны, нет необходимости в его величине, превышающей 1 мм. Применяв формулу (28), находим, что при $d' = 0,5$ мм: $\psi = 1,142$, при $d' = 0,7$ мм: $\psi = 1,030$, а при $d' = 1,0$ мм: $\psi = 1,156$. При этом из формулы (25) следует, что при $L = 250$ мм предельные значения полезного видимого (углового) увеличения изображения, образованного оптической системой микроскопа, определяются диапазоном $500A \leq \Gamma_m \leq 1000A$, где $A = n \sin \sigma$.

Заметим, что кривые, представленные на рис.6, получены в результате измерений, выполненных при яркости поверхности предмета, равной 0,148 стб. Напомним, что яркость белой поверхности, освещённой прямым солнечным светом, равна около 3–3,5 стб.

Элементарный световой поток, излучаемый светящимся элементом dS поверхности предмета в пределах телесного угла $d\Omega$, определяется следующим вполне очевидным выражением:

$$d^2\Phi_\sigma = L_\sigma \cos \sigma \cdot dS \cdot d\Omega, \quad (29)$$

где L_σ – яркость светящегося элемента поверхности в направлении, образующем угол σ с нормалью к элементарной площадке dS , совпадающей с оптической осью некоторой безаберрационной оптической системы. Сечение элементарного телесного угла $d\Omega$, имеющего вершину в осевой точке предмета, сферой радиуса R , концентричной осевой точке предмета и касательной к контуру входного зрачка, образует элементарную площадку $d\Sigma$. Учитывая определение телесного угла, выражение (29) можно переписать в виде:

$d^2\Phi_\sigma = L_\sigma \cos \sigma \cdot dS \frac{d\Sigma}{R^2}$. Отсюда следует, что освещенность на сфере в пределах площадки $d\Sigma$ равна:

$$E_\sigma = \frac{d^2\Phi_\sigma}{d\Sigma} = L_\sigma \cos \sigma \frac{dS}{R^2}. \quad (30)$$

Световой поток, определяемый выражением (29), в пространстве изображений становится равным:

$$d^2\Phi'_{\sigma'} = \tau_{\sigma} d^2\Phi_{\sigma} = \tau_{\sigma} E_{\sigma} d\Sigma = E'_{\sigma'} \cdot d\Sigma', \quad (31)$$

где τ_{σ} – коэффициент пропускания оптической системы в пределах элементарной световой трубки в направлении, образующем угол σ с оптической осью в пространстве предметов; $d\Sigma'$ – элементарная площадка на сфере радиуса R' , концентричной осевой точке изображения и касательной к контуру выходного зрачка, через которую проходит световой поток $d^2\Phi'$; $E'_{\sigma'}$ – освещенность площадки $d\Sigma'$.

Из выражения (31) с учетом выражения (30) получаем:

$$E'_{\sigma'} = \tau_{\sigma} E_{\sigma} \frac{d\Sigma}{d\Sigma'} = \tau_{\sigma} L_{\sigma} \cos\sigma \frac{dS}{R^2} \frac{d\Sigma}{d\Sigma'}. \quad (32)$$

В соответствии с инвариантом Штраубеля для световой трубки имеем:

$$n^2 \cos\sigma \cdot dS \cdot d\Omega = n'^2 \cos\sigma' \cdot dS' \cdot d\Omega'.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{d\Omega}{d\Omega'} = \frac{d\Sigma}{d\Sigma'} \frac{R'^2}{R^2} = \frac{n'^2 \cos\sigma' \cdot dS'}{n^2 \cos\sigma \cdot dS}.$$

Подставив это соотношение в выражение (32), получаем:

$$E'_{\sigma'} = \tau_{\sigma} \left(\frac{n'}{n}\right)^2 L_{\sigma} \cos\sigma' \frac{dS'}{R'^2}. \quad (33)$$

$$\text{При } \sigma'=0: E'_0 = \tau_0 \left(\frac{n'}{n}\right)^2 L_0 \frac{dS'}{R'^2}. \quad (34)$$

Соотношение (34) позволяет выражение (33) представить в виде [13]:

$$E'_{\sigma'} = \tau'_{\sigma'} \cdot E'_0, \quad (35)$$

где $\tau'_{\sigma'}$ – коэффициент, определяющий относительное распределение освещенности на выходной сфере, который формально можно назвать коэффициентом относительного пропускания оптической системы; при этом

$$\tau'_{\sigma'} = \frac{\tau_{\sigma} L_{\sigma}}{\tau_0 L_0} \cos\sigma'. \quad (36)$$

Таким образом, распределение освещенности на выходной сфере определяется косинусом апертурного угла в пространстве изображений, отношением коэффициента пропускания оптической системы и яркости источника излучения в пределах апертурного угла к коэффициенту пропускания и яркости источника излучения в направлении оптической оси в пространстве предметов. Практически можно принять, что $\tau_{\sigma} = \tau_0$ и $L_{\sigma} = L_0$. Тогда $\tau'_{\sigma'} = \cos\sigma'$.

Для коллектора осветительной системы микроскопа, как правило,

$\sin \sigma' < 0,1$. При этом $\cos \sigma' > 0,995$. Следовательно, в этом случае можно принять, что $E'_{\sigma'} = E'_0$.

Итак, световой поток, заполняющий полевую диафрагму, равен:

$$d\Phi_s = \pi L_0 \tau_s n_s^2 \sin^2 \sigma_s dS_s, \quad (37)$$

где L_0 – яркость источника излучения, приведенная (редуцированная) к воздуху, dS_s – площадь источника излучения, $n_s \sin \sigma_s$ – передняя числовая апертура коллектора, τ_s – коэффициент пропускания оптической системы коллектора.

При круглой форме полевой диафрагмы световой поток, падающий на наблюдаемый участок поверхности предмета, равен:

$$d\Phi_p = \pi^2 L_0 \tau_{oc} n_p^2 \sin^2 \sigma_p y_p^2, \quad (38)$$

где τ_{oc} – коэффициент пропускания оптической системы осветительного устройства микроскопа, $n_p \sin \sigma_p$ – передняя числовая апертура микрообъектива, y_p – радиус круга наблюдаемой поверхности предмета.

Световой поток, выходящий из микрообъектива и формирующий образованное им изображение в плоскости предмета окуляра, равен:

$$d\Phi'_p = \tau_{oc} \tau_p \pi^2 L_0 n_p'^2 \sin^2 \sigma'_p y_p'^2, \quad (39)$$

где τ_p – коэффициент пропускания оптической системы микрообъектива, $n'_p \sin \sigma'_p$ – задняя числовая апертура микрообъектива, y'_p – радиус изображения наблюдаемой поверхности предмета.

При $\tau_{oc} = \tau_p = 1$ соотношения (38) и (39) определяют взаимосвязь геометрических параметров микрообъектива, поскольку в соответствии с законом сохранения энергии (или в соответствии со свойством световой трубки) имеем $d\Phi_p = d\Phi'_p$, а, следовательно,

$$y_p n_p \sin \sigma_p = y'_p n'_p \sin \sigma'_p. \quad (40)$$

Это соотношение справедливо для всех оптически сопряженных плоскостей оптической системы и определяет инвариант Лагранжа-Гельмгольца в виде [5]:

$$J = n y \sin \sigma.$$

При этом выражения (38) и (39) при $\tau_{oc} = \tau_p = 1$ можно записать в виде:

$$d\Phi_p = d\Phi'_p = L_0 \pi^2 J^2. \quad (41)$$

В выражении (40) отрезок $y'_p = y_p \cdot V_{об}$, где $V_{об}$ – поперечное увеличение изображения, образованного микрообъективом. При этом из соотношения (40) для каждого микрообъектива имеем

$$V_{об} J = V_{об} y_p n_p \sin \sigma_p = y'_p n'_p \sin \sigma'_p. \quad (42)$$

Для конкретного комплекта микрообъективов величина окулярного поля $2y_{ок} = 2y'_p = const$. Вполне очевидно, что при $J = const$ для этого комплекта

объективов имели бы набор точек $V_{об}$, $n_p \sin \sigma_p$, определяющих их параметры и лежащих на прямой:

$$JV_{об} = y'_p n_p \sin \sigma_p. \quad (43)$$

В том случае, когда зависимость $V_{об} = V_{об}(n_p \sin \sigma_p)$ имеет нелинейный характер, инвариант $J \neq const$, а, следовательно, в соответствии с формулой (41) объективы конкретного комплекта для формирования изображения используют различную величину светового потока. Величина $J = y_p A$ для планпохроматических объективов проходящего света при $2y_{ок} = 25$ мм принимает значения от $J = 0,203$ (ОПА-3, ОПА-40) до $J = 0,375$ (ОПА-1); для планхроматических объективов проходящего света при $2y_{ок} = 25$ мм – от $J = 0,177$ (ОПХ-60П) до $J = 0,250$ (ОПХ-2,5П, ОПХ-10П, ОПХ-25П); для новых ахроматических объективов проходящего света при $2y_{ок} = 18$ мм – от $J = 0,112$ (ОХ-32) до $J = 0,270$ (ОХ-26) [14].

7. Эффективность использования светового потока в оптической системе микроскопа

Световой поток, формируемый осветительным устройством, должен заполнять телесный угол, определяемый передней апертурой объектива, в пределах наблюдаемой поверхности предмета. Таким образом, оптические параметры осветительного устройства должны быть таковы, чтобы формируемый им световой поток был равен

$$d\Phi_s = d\Phi_{p \max} = \pi L_0 n_p^2 \sin^2 \sigma_{p \max} dS_{p \max},$$

где $\pi \sin^2 \sigma_{p \max}$ – телесный угол, соответствующий максимальной величине апертурного угла $\sigma_{p \max}$ объективов комплекта; $dS_{p \max}$ – наибольшая площадь наблюдаемой поверхности. При этом

$$J_{\max} = y_{p \max} \cdot n_p \sin \sigma_{p \max}. \quad (44)$$

Предположим, что удалось создать универсальное осветительное устройство, удовлетворяющее условию (44). Тогда каждый объектив комплекта будет использовать лишь часть светового потока, равную [15]

$$\eta = \left(\frac{J_i}{J_{\max}} \right)^2, \quad (45)$$

где $J_i = y_{pi} n_{pi} \sin \sigma_{pi}$. Для соответствующих комплектов планпохроматических, планхроматических и ахроматических объективов значения величины η приведены в табл. 1.

Из анализа величин, приведенных в табл. 1, следует, что при применении каждого из объективов используется весьма малая часть светового потока,

формируемого осветительным устройством. Однако создать универсальное осветительное устройство приемлемых сложности и габаритов, удовлетворяющее условию (44), практически невозможно. Поэтому в осветительных устройствах микроскопов применяют конденсоры со съемными фронтальными или дополнительно вводимыми линзами.

Проблему повышения эффективности использования светового потока можно принципиально решить, если в осветительной системе микроскопа применить систему переменного увеличения.

Заметим, что при освещении падающим светом (при наблюдении в отраженном свете) оптическая схема осветительного устройства, по сути дела, повторяет оптическую схему наблюдательного канала микроскопа, а, следовательно, эффективность использования светового потока в этом случае определяется лишь различием значений инварианта $J_p = y_p n_p \sin \sigma_p$ в применяемом комплекте объективов микроскопа.

Таблица 1. Значения величины η (в %) при универсальном осветительном устройстве

Шифр объектива	$J_{ма}$ x	Поперечное увеличение изображения, образованного объективом								
		2,5	4	6,3	10	16	25	40	60	100
ОПА-1	1,5625				5,8					
ОПА-2						4,0				
ОПА-6							2,6			
ОПА-3								1,7		
ОПА-4									1,3	
ОПА-5										1,0
ОПХ-2,5П	4,25	0,3								
ОПХ-10П					0,3					
ОПХ-25П							0,3			
ОПХ-40П								0,2		
ОПХ-60П									0,2	
ОХ-26	2,8125		0,9							
ОХ-27				0,7						
ОХ-28					0,6					
ОХ-29						0,6				
ОХ-30								0,3		
ОХ-31									0,2	
ОХ-32										0,2

При нормальном состоянии зрения оба глаза фиксируются на наблюдаемом предмете. При бинокулярном наблюдении с помощью отдельных микроскопов

их оптические оси должны пересекаться в осевой точке предмета. При этом угол φ между осями должен быть равен углу конвергенции при аккомодации на расстояние наиболее удобного наблюдения L . Кроме того, так как зрачок глаза располагается в выходном зрачке микроскопа, то перевёрнутое изображение каждого глаза проектируется соответствующей окулярной системой в соответствующий входной зрачок. Глаза представлены схематически и обозначены по Рору, т.е. с отметкой носовой стороны. Вполне очевидно, что полученные проекции будут обращены и повёрнуты, как показано на рис. 7, при этом изображение наблюдаемого пространства будет псевдоскопическим [8].

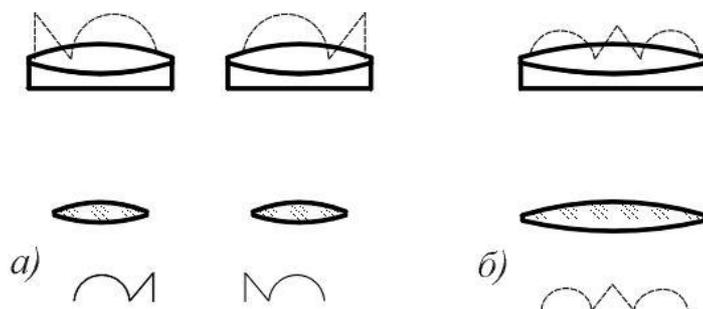


Рис.7. Изображение обоих глаз во входных зрачках:
а) в двухтрубной системе, б) в однотрубной системе.

Следовательно, в этом случае оптическая система микроскопов должна включать оборачивающую систему. Этим условиям соответствует оптическая схема микроскопа Грену, представленная на рис. 8.

В отличие от микроскопа Грену, широкое применение получил стереоскопический микроскоп с одним объективом. Принципиальная оптическая схема стереоскопического микроскопа типа МБС-3 представлена на рис. 9 тремя составными частями: объективом I , двумя вращающимися трубками Галилея II и двумя визуальными системами III . Визуальная система состоит из объектива, формирующего изображение в передней фокальной плоскости окуляра, призмной оборачивающей системы и окуляра.

При неизменном размере полевой диафрагмы угловое поле зрения со стороны окуляра при изменении увеличения путём поворота трубки Галилея на 180° остаётся без изменения. Вполне очевидно, что положение входного зрачка трубки Галилея при её повороте не изменится при соблюдении условия

$$a_p = a_{p1} = -a'_{p2} \quad (46)$$

В рассматриваемом случае, используя формулу отрезков, имеем $a'_{p1} = \frac{a_{p1}}{1 + a_{p1}\varphi_1}$. Отрезок $a_{p2} = a'_{p1} - d$. Тогда $a'_{p2} = \frac{a_{p2}}{1 + a_{p2}\varphi_2}$.

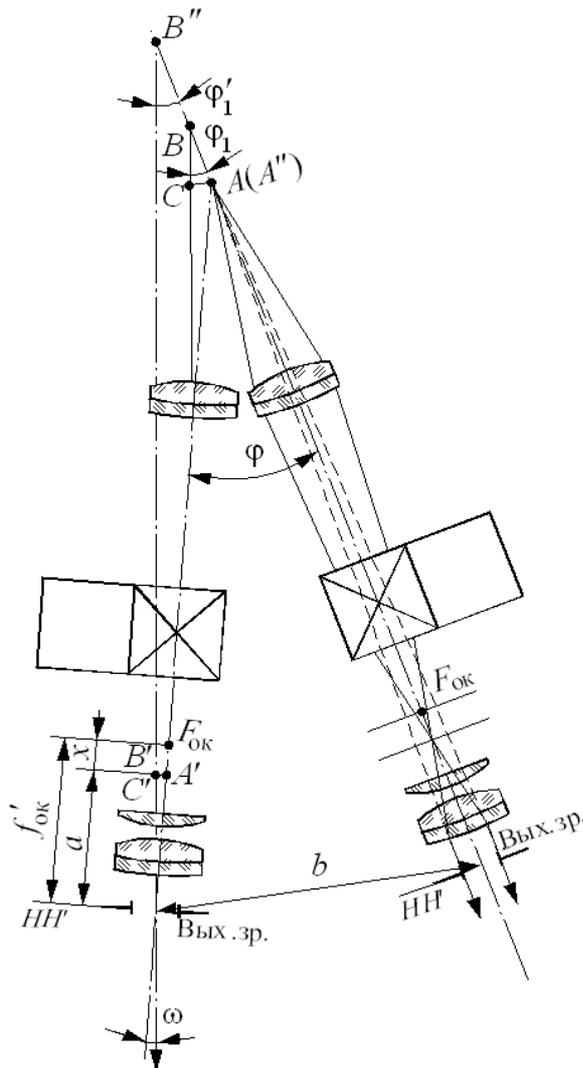


Рис.8. Принципиальная оптическая схема микроскопа Грену

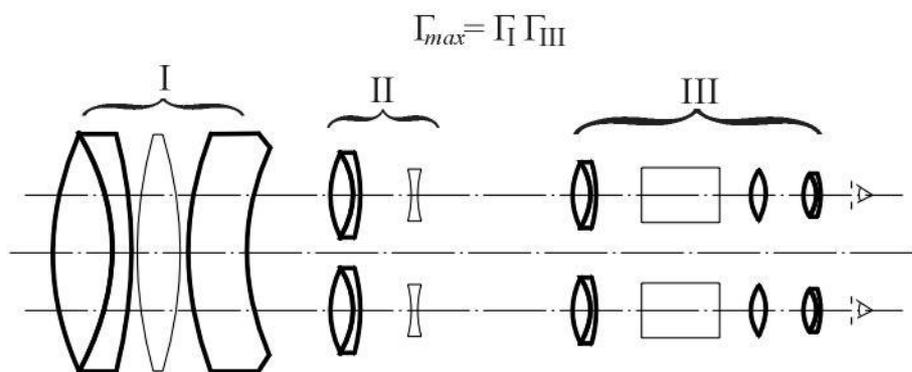


Рис.9. Принципиальная оптическая схема стереоскопического микроскопа типа МБС-3

Оптическая сила трубки Галилея равна нулю, т.е. $\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d = 0$. При

этом $d = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{\Phi_1 \Phi_2}$. Подставив полученные соотношения в выражение (46) и

преобразовав, получаем

$$a_{p1} = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma^2 + 1} f_1' \quad (47)$$

$$\text{или } a_{p1} = -a_{p2}' = \frac{\Gamma d}{\Gamma^2 + 1} \quad (48)$$

Точка пересечения главного луча с оптической осью определит положение апертурной диафрагмы.

Оптическая схема микроскопа МБС-3 представлена на рис. 10 [16].

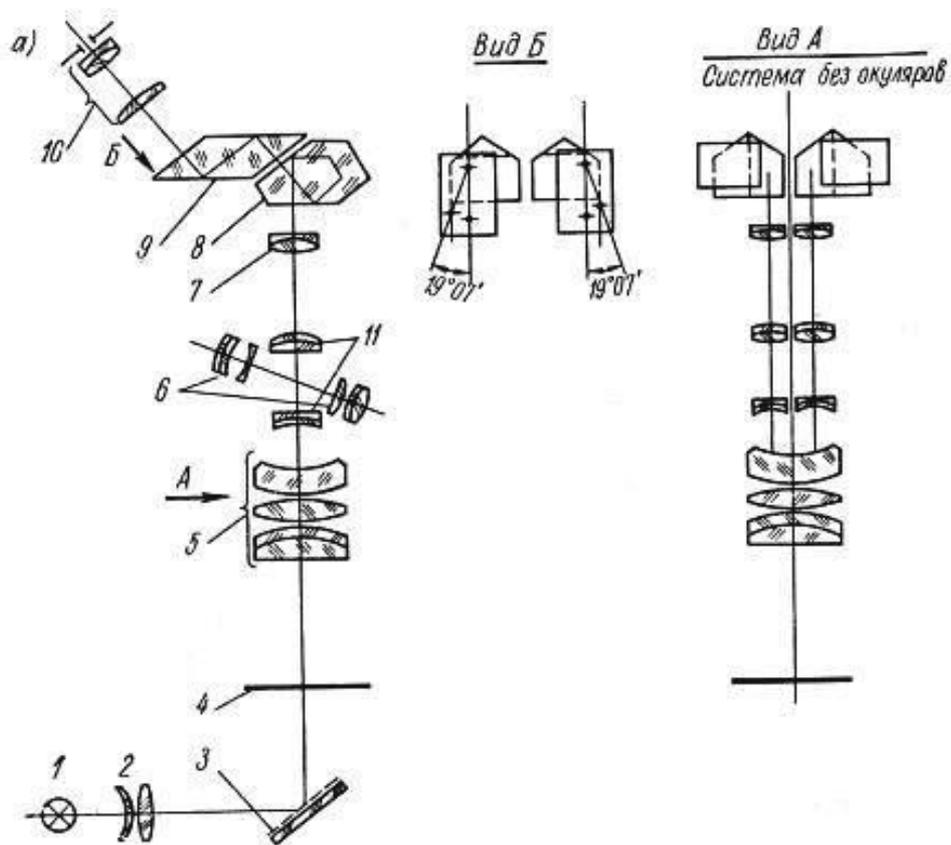


Рис. 10. Оптическая схема микроскопа МБС-3

При работе в проходящем свете коллектор 2 и отражатель 3 освещают при помощи лампы накаливания 1 объект 4, лежащий на стеклянной шайбе предметного столика. Применение в объективе 5 микроскопа толстого менискового компенсатора кривизны поверхности изображения позволило получить рабочее расстояние объектива около 109 мм при фокусном расстоянии, равном 100 мм. За основным несъёмным объективом 5 расположены две одинаковые оптические системы, каждая из которых содержит пару вращающихся телескопических систем (трубок Галилея) 6 и 11,

формирующих изображение при угловом увеличении $2,5\times$, $1/2,5\times$, $1,6\times$ и $1/1,6\times$, тубусную ахроматическую линзу 7 с фокусным расстоянием 160 мм, призму Шмидта 8 с крышей, отклоняющую оптическую ось от вертикали на угол, равный 45° , и призму-ромб 9, раздвигая которую одновременно с такой же призмой-ромб в параллельной ветви (в другом тубусе), можно установить окуляры 10 на расстоянии от 56 до 72 мм друг от друга (в соответствии с размером глазного базиса наблюдателя), не нарушая параллельности оптических осей в бинокулярном тубусе.

Объективом 5, галилеевыми системами 6 и 11 и тубусными ахроматическими линзами 7 исследуемый предмет, расположенный в фокальной плоскости объектива 5, изображается в плоскости полевой диафрагмы обоих окуляров 10. Угловое (видимое) увеличение изображения, образованного микроскопом, определяется формулой

$$\Gamma_m = \frac{\Gamma_{гс} \Gamma_{ок}}{f'_{об}} f'_{тл},$$

где $f'_{об}$ и $f'_{тл}$ – фокусное расстояние соответственно объектива микроскопа и тубусной линзы; $\Gamma_{гс}$ и $\Gamma_{ок}$ – угловое (видимое) увеличение соответственно галилеевой системы и окуляра.

При минимальном увеличении $\Gamma_m = 4\times$ линейное поле зрения микроскопа равно 44 мм; при максимальном увеличении $\Gamma_m = 100\times$ поле зрения 1,8 мм.

Габаритные ограничения не позволяют построить стереоскопические микроскопы, обладающие большой величиной полезного увеличения. Монокулярный микроскоп позволяет производить наблюдение препарата только одним глазом, что существенно нарушает естественные условия зрения. Поэтому получили широкое применение бинокулярные насадки, принципиальная схема которых представлена на рис. 11.

Вполне очевидно, при применении этой насадки стереоскопический эффект наблюдения отсутствует. В этой схеме путь, проходимый светом в стекле, для каждой ветви одинаков. Иногда такие системы выпускают с наклонными окулярами, что делает удобным наблюдение в том случае, когда ось объектива вертикальна. Фирма Бек изготовила бинокулярную насадку такого типа со сходящимися тубусами [8]. По мнению многих наблюдателей, работа с микроскопом при наличии конвергенции является более удобной, когда голова наблюдателя направлена книзу.

При визуальном наблюдении возможны два варианта построения оптической схемы микроскопа переменного увеличения. Включив в схему микроскопа окуляр переменного фокусного расстояния, получаем возможность наблюдения предмета при разном значении поперечного увеличения. При другом варианте построения оптической схемы микроскопа систему переменного увеличения можно включить в пространство между объективом

микроскопа и образованным им изображением. При этом соблюдается инвариант Лагранжа–Гельмгольца: $nl \sin \sigma = n'l' \sin \sigma'$. Величина образованного изображения в рассматриваемом случае $2l' = D'_p$, где D'_p – диаметр полевой диафрагмы.

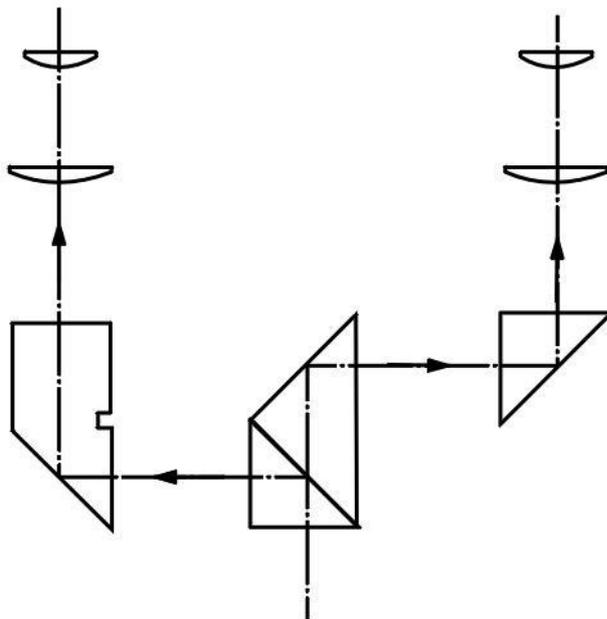


Рис.11. Бинокулярная насадка

Пусть при наименьшем значении абсолютной величины поперечного увеличения изображение наблюдаемого предмета полностью заполняет полевую диафрагму. Тогда при наибольшем значении увеличения и при неизменной входной числовой апертуре микрообъектива в соответствии с инвариантом Лагранжа–Гельмгольца будет видна лишь центральная зона наблюдаемого предмета.

Применение системы переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа может повысить эффективность использования светового потока в десятки раз [17, 18]. Оптические системы переменного увеличения находят применение при разработке принципиальных схем экранных и других насадок микроскопа [19].

8. Очки

Оптика конца XIII века может гордиться важнейшим открытием в истории оплотехники, а именно изобретением очков. О роли и значении очков хорошо сказано в романе Умберто Эко “Имя розы” (Перев. с итал. Е.Костюкович, ж-л “Иностранная литература”, 1988г., № 8): “...Это была рогатка, приспособленная сидеть на носу у человека... – в точности как сидит всадник на коне и птица на жёрдочке. На концах рогатки, так, чтобы находиться прямо перед глазами, держались два овальных металлических окошка, куда были вставлены стёкла толщиной каждое с донце стакана. ...Он объяснил,

что каждый из людей, пройдя до половины жизнь земную, даже тот, кто был знаменит отменною зоркостью ока, ощущает, что зрение его оступело, и зрачки разучились прилаживаться к рассматриваемому предмету, отчего многие умнейшие мужи, проводив пятидесятую весну, считай, что умерли для чтения и письма. Суровая казнь мудрецам, которые, не будь того, долгие бы ещё годы являли миру цвет своей учёности. И потому надо возблагодарить Господа за то, что открыт и сделан чудеснейший снаряд. Тем самым, ... оправдывается утверждение ..., что одна из задач науки – продление человеческого века”.

Увеличительные стёкла стали объектом научного рассмотрения ещё в эпоху раннего средневековья. Соображения Альгазена об увеличении предметов посредством линз, опыты Бэкона над изменением зрительных углов с помощью вогнутых и выпуклых сферических стёкол, казалось бы, должны были вскоре привести на мысль о возможности исправлять такими стёклами погрешности глазного хрусталика. Однако такая логика рассуждений не вполне или даже совершенно не логична. Дело в том, что увеличительные стёкла служат для увеличения угловой величины изображения наблюдаемых предметов и находят применение в очках мастеров часовых дел, в медицинской практике при выполнении тонких хирургических операций и т.п. Вполне очевидно, что в быту пользоваться подобными очками неудобно. Очень важно, чтобы очки не нарушали естественного восприятия окружающего мира, иными словами, – не очень сильно нарушали привычную угловую величину наблюдаемых предметов. Таким образом, оптическая сила (диоптрийность) очковых линз должна быть малой, но достаточной для компенсации утраченной или излишней оптической силы хрусталика глаза. Этим и объясняется, на наш взгляд, тот факт, что от понимания увеличительного действия линз до изобретения очков прошло не одно столетие.

Наивно думать, что сегодня очков не было, а завтра они появились. Вполне естественно предположить, что процесс преобразования увеличительного стекла в коррекционную очковую линзу носил экспериментальный характер и осуществлялся на протяжении длительного времени многими специалистами разных поколений. При этом вопрос о том, кто изобрёл очки, приобретает чисто риторический характер. И, тем не менее, хроника, хранящаяся в библиотеке монахов-проповедников в Пизе, повествует, что очки начал впервые делать некто, не желавший открыть своей тайны, но что монах Александр де-Спина, услышав об этом изобретении, стал изготавливать очки сам и охотно обучал желающих этому искусству. Вполне возможно, что этим таинственным «некто» действительно был Сальвино Армати, которого на основании надписи на могильном камне во Флоренции в церкви Санта Мария Маджоре, где он назван *inventore degli occhiali*, обычно считают изобретателем очков. На камне указано, что Сальвино умер в 1317 году. Согласно же словарю

академии Делла Круска очки были изобретены в 1285 году. Венецианский государственный совет уже в 1300 году издал указ, запрещающий изготовление очков из плохого стекла. Сам факт издания такого указа говорит о том, что в конце XIII и в начале XIV веков очки получили широкое применение. Однако первые очки позволяли исправить лишь дальнозоркость зрения, поскольку для их изготовления применялись длиннофокусных выпуклые (положительные) линзы. Время появления очков с вогнутыми (отрицательными) линзами для коррекции близорукости зрения точно не установлено. Они появились значительно позже, и впервые их действие описал бежавший от турок в Мессину греческий математик и оптик Франциск Мавролик (1494–1575).

Орган зрения, иначе называемый зрительным анализатором, состоит из трёх систем: периферической, проводниковой и центральной. Периферическую систему образуют два глазных яблока, представляющие собой совокупность оптической и световоспринимающей систем. Оптическая система каждого глаза состоит из оптики, формирующей изображение предметов внешнего мира на сетчатке, а также мышечных систем, одна из которых управляет движением глаз, другая, расположенная внутри глазного яблока, обеспечивает фокусировку изображения на сетчатке и регулирует его освещённость, изменяя размер зрачка, что, кроме того, изменяет глубину резкости. Схема горизонтального разреза правого глазного яблока представлена на рис. 12.

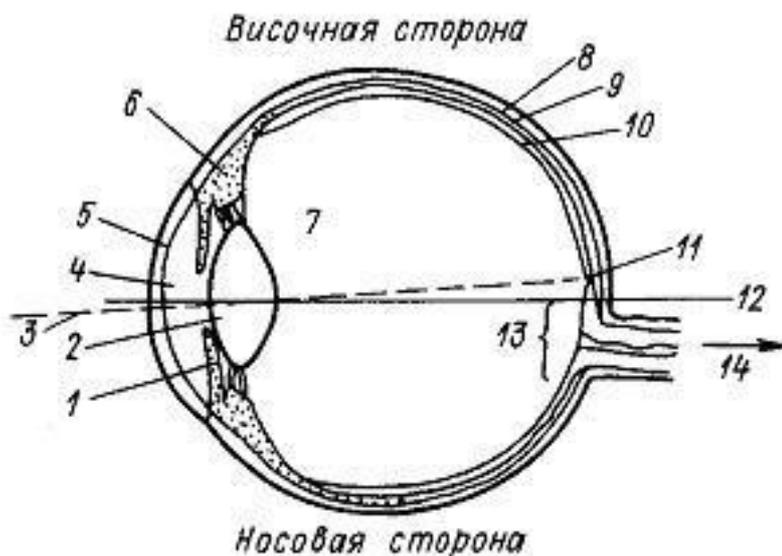


Рис. 12. Горизонтальный разрез правого глазного яблока:

1-радужка; 2-хрусталик; 3-зрительная ось фиксации; 4-водянистая влага; 5-роговица; 6-цилиарная мышца; 7-стекловидное тело; 8-склера; 9-сосудистая оболочка; 10-сетчатка; 11-фовеола (центральная ямка); 12-оптическая ось; 13-слепое пятно; 14-зрительный нерв (к мозгу)

Световоспринимающей системой глаза является его сетчатая оболочка, содержащая светочувствительные клетки — зрительные рецепторы.

Проводниковой системой служат зрительные нервы, которые соединяют отдельными волокнами зрительные рецепторы с клетками затылочной части коры головного мозга, где расположено центральное звено зрительного анализатора, воспринимающее и анализирующее то, что видит глаз.

Строение сетчатки чрезвычайно сложно. Обычно в ней насчитывают 10 слоёв. Светочувствительным слоем служит второй, где находятся палочки и колбочки. Общее число палочек и колбочек в сетчатке одного глаза достигает примерно 140 млн., из них около 7 млн. колбочек.

Распределение палочек и колбочек по сетчатке неравномерно. В том месте сетчатки, через которое проходит зрительная ось глаза, расположены одни колбочки. Этот участок сетчатки, несколько углублённый, диаметром примерно 0,4 мм, что соответствует углу $1,2^\circ$, называется центральной ямкой – *fovea centralis* – лат. (сокращённо – фовеола). В центральной ямке находятся только колбочки, число которых достигает 4–5 тысяч. Фовеола располагается в середине горизонтально расположенного овального участка сетчатки размером от 1,4 до 2 мм, известного под названием “жёлтого пятна” или *macula* – лат. “пятно”. В этом пятне содержится придающий ему соответствующую окраску пигмент, а помимо колбочек встречаются уже и палочки, однако число колбочек здесь значительно превышает число палочек.

Жёлтое пятно (по новой классификации – “пятно сетчатки”) и особенно его углубление – фовеа, являются областью наиболее ясного видения. Эта область обеспечивает высокую остроту зрения: здесь от каждой колбочки к зрительному нерву отходит отдельное волокно; в периферической же части сетчатки одно зрительное волокно соединяется с рядом элементов (колбочек и палочек).

Палочки и колбочки различаются по своим функциям: палочки отличаются большей светочувствительностью, но не различают цветов; колбочки различают цвета, но менее чувствительны к свету. Цветные объекты при слабом освещении, когда весь зрительный процесс осуществляется палочками, отличаются только яркостью; цвет же объектов в этих условиях не ощущается. Участие палочек и колбочек в зрительном восприятии наблюдаемых предметов при переходе от дневного к сумеречному и ночному освещению происходит постепенно, как это показано в табл.2.

Таблица.2. Процент участия колбочек и палочек при переходе от дневного зрения к сумеречному и ночному

Элементы сетчатки	Освещённость, лк							
	30	25	15	5	1	0,30	0,01	<0,01
Палочки	0	18	27	38	60	82	92	100
Колбочки	100	82	73	62	40	18	8	0

В последнем, десятом слое сетчатки, прилегающем к сосудистой оболочке,

в виде отдельных зёрен находится чёрный пигмент. Существование пигмента имеет большое значение для приспособления глаза к работе при различных уровнях освещённости, а главное – для уменьшения рассеяния света внутри глаза.

Оптическая система глаза – система иммерсионная: переднее фокусное расстояние f отличается от заднего f' не только по знаку, но и по абсолютной величине в соответствии с формулой: $f'/f=n'/n$; $n=1$, $n'=1,336$. Оптическая система глаза состоит из нескольких преломляющих поверхностей, форма каждой из которых отличается от сферической, а центры кривизны не лежат на одной прямой. Для практических расчётов вполне пригодно приближённое описание, в котором форма поверхностей принята сферической и выбрана некоторая линия, относительно которой центры поверхностей расположены достаточно близко; эту линию можно считать оптической осью глаза. Линия, проведённая от фиксируемой глазом точки в центр фовеолы, называется зрительной осью. С оптической осью глаза она составляет угол, примерно равный 5° (угол “гамма”).

Упрощенная модель оптической системы глаза, представляющая собой центрированную оптическую систему и соответствующая средним, найденным опытным путём, значениям, называется схематическим глазом. В [3, табл.1.1] приведены параметры схематического глаза по Гульстранду. В целях дальнейшего упрощения расчётов была предложена ещё более простая модель глаза, называемая приведённым или редуцированным глазом. Известны несколько схем редуцированного глаза. В табл. 3 приведены параметры редуцированного глаза по Вербицкому, так как они лучше всего соответствуют параметрам схематического глаза по Гульстранду.

Таблица 3. Параметры редуцированного глаза (по Вербицкому)

Параметр глаза	Значения при покое аккомодации	
	Значение	Значение
Оптическая сила (рефракция), дптр.	58,82	58,64**
Длина глаза, мм	23,4	24**
Радиус кривизны роговицы, мм	6,8	7,7**
Показатель преломления стекловидного тела	1,40	1,336**
Радиус кривизны поверхности сетчатки, мм	-10,2	-10,5**
Местоположение* главных точек, мм	0	1,348**
Местоположение* узловых точек, мм	6,8	7,078**
Переднее фокусное расстояние, мм	-17,0	-17,055**
Заднее фокусное расстояние, мм	23,8	22,785**
* Относительно вершины роговицы.		
** Параметры схематического глаза по Гульстранду.		

Оптическая система редуцированного глаза содержит только одну преломляющую поверхность – роговицу. Весь глаз наполнен однородной

средой, показатель преломления которой равен n_r . При этом узловые точки совпадают с центром кривизны роговицы, главная точка совпадает с вершиной роговицы. В случае аккомодации параметры редуцированного глаза по Вербицкому должны изменяться. На каждую диоптрию аккомодации показатель преломления следует увеличивать на 0,004, а радиус кривизны роговицы уменьшать на 0,04 мм по сравнению со значениями, приведёнными в таблице, справедливыми для покоя аккомодации.

А.В. Луизов предложил более простой способ учёта аккомодации: при увеличении аккомодации на одну диоптрию следует уменьшить радиус роговицы на 0,1мм, а показатель преломления сохранить неизменным и равным $n_r=1,4$ [20].

Диаметр зрачка глаза зависит от освещённости на зрачке (для точечных источников), от состояния аккомодации и конвергенции: усиление аккомодации и конвергенции влечёт за собой сужение зрачков, а их ослабление – расширение зрачков. Изменение диаметра зрачка возможно также при изменении только аккомодации. Это изменение особенно заметно при малых яркостях фона. Например, по данным Курве, при яркости фона 0,2 кд/м² увеличение аккомодации от 0 до 7 дптр вызывает почти двукратное уменьшение диаметра зрачка.

Таблица 4. Изменение диаметра зрачка при изменении аккомодации

Аккомодация, дптр.	0	1	2	3	5	7
Диаметр зрачка глаза, мм	5,1	4,3	3,8	3,7	3,0	2,7

При увеличении яркости фона до 63 кд/м² эта зависимость становится значительно меньше: без напряжения аккомодации диаметр зрачка глаза равен 2,7 мм, при аккомодации в 7 дптр. – 2,1 мм, т.е. уменьшается в 1,3 раза.

Изображению, образованному оптической системой глаза, присущи aberrации. Влияние сферической aberrации на качество изображения сравнительно мало при малых диаметрах зрачка (2–4 мм). При диаметре зрачка глаза, равном 4 мм, сферическая aberrация равна 1 дптр. [21].

В отличие от обычной оптической системы, сферическая aberrация изображения, образованного оптической системой глаза, компенсируется, во-первых, благодаря тому, что периферические зоны оптической системы глаза имеют более слабую рефракцию (меньшую оптическую силу) в связи с меньшим показателем преломления периферических зон хрусталика по сравнению с его ядром, во-вторых, благодаря некоторому увеличению радиуса кривизны периферической части роговицы. Величина сферической aberrации зависит также от аккомодации и, как правило, увеличивается с ростом аккомодационного напряжения.

Величина хроматической aberrации для крайних длин волн спектра

видимого излучения в среднем составляет 1,3 дптр. Наблюдение при освещении монохроматическим светом, исправление хроматической аберрации не привели к заметному повышению остроты зрения.

Если изображение удалённого предмета при покое аккомодации фокусируется на сетчатке, глаз называют эметропическим. Если при покое аккомодации изображение удалённого предмета фокусируется не на сетчатке, глаз называют аметропическим, а такое свойство глаза – аметропией.

Если глаз без напряжения аккомодации изображает точку R , лежащую от него на расстоянии a_R , то эту точку называют дальнейшей точкой ясного видения. Пусть a_0 – расстояние до дальнейшей точки эметропического глаза. Аметропией A_R называют величину, определяемую формулой

$$A_R = 1/a_R - 1/a_0 \quad (49)$$

Но для эметропического глаза $a_0 = \infty$. Тогда

$$A_R = 1/a_R, \quad (50)$$

т.е. аметропия – величина, обратная расстоянию до дальнейшей точки, выраженному в метрах.

На рис.13 схематически изображены три разновидности глаз. Оптическая сила всех трёх разновидностей одинакова и аметропия зависит только от длины глаза. Схема эметропического глаза представлена на рис.13,а. Лучи параллельного пучка от удалённого предмета ($a=-\infty$) фокусируются на его сетчатке.

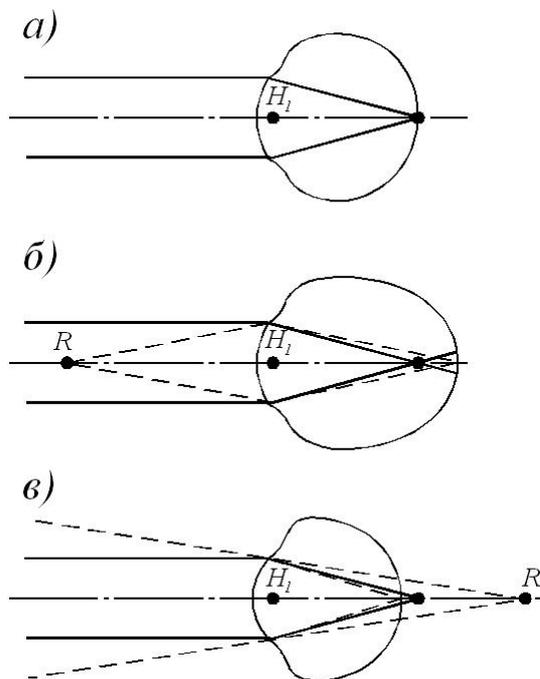


Рис.13. Эметропический глаз (а) и две разновидности аметропического глаза: близорукий (б) и дальнорукый (в)

На рис. 13,б представлена схема слишком длинного, а поэтому

аметропического, глаза. Лучи от удалённого предмета фокусируются перед сетчаткой, образуя на сетчатке размытое пятно. Такой глаз называется миопическим или близоруким, а соответствующий недостаток зрения – близорукостью. На сетчатке близорукого глаза резко фокусируется только изображение предмета, осевая точка которого расположена в точке R . Расстояние a_R от передней главной точки глаза до дальнейшей точки R определяет степень близорукости: чем меньше a_R (по абсолютной величине), тем сильнее, как следует из формулы (45), близорукость. Поскольку точка R расположена перед глазом, a_R – величина отрицательная, т.е. при миопии аметропия отрицательная.

На рис. 13,в представлена схема слишком короткого глаза, фокус которого лежит за его пределами. Такой глаз называется гиперметропическим или дальновзорким. Его дальнейшая точка R , т.е. точка, изображение которой получается на сетчатке без напряжения аккомодации, находится справа от глаза, т.е. в случае дальновзоркости точка R – мнимая точка. Аметропия гиперметропического глаза ($A_R=1/a_R$) – величина положительная. При небольшой гиперметропии аметропия может быть скомпенсирована аккомодацией.

При наибольшем напряжении аккомодации A_P глаз фокусирует на сетчатке некоторую точку P , которая лежит от него на расстоянии a_P и называется ближней точкой ясного видения. Пределы, в которых глаз способен изменять фокусировку, характеризуются величиной A_{PR} – объёмом аккомодации:

$$A_{PR} = 1/a_R - 1/a_P = A_R - A_P . \quad (51)$$

Оптической системе глаза нередко присущ астигматизм. Астигматический глаз характеризуется различной величиной рефракции в разных сечениях (меридианах). Встречается ещё одно оптическое несовершенство глаз – анизейкония – неравенство размеров изображения, получаемых на сетчатке правого и левого глаза при рассматривании одного и того же предмета двумя глазами. Причиной анизейконии является анизометропия, т.е. неравенство рефракций в обоих глазах. Анизейкония измеряется в процентах. Пороговым значением считается степень анизейконии, равная 1,5%. Если степень анизейконии превышает 2,0–2,5%, необходима её коррекция.

Некоторые специалисты приходят к мысли о том, что при покое аккомодации глаз устанавливается не на бесконечность, а на более близкое расстояние, на некоторую точку R_{II} , лежащую на расстоянии a_{II} [22]. От этого нейтрального положения глаз может аккомодировать как на более близкое расстояние до a_P , так и в противоположную сторону (аккомодация вдаль) до дальнейшей точки a_R . Исходя из этого, следовало бы считать, что аметропия равна не $1/a_R$, а другому значению, которое следует вычислять по формуле (44), положив в ней $a_3=a_{II}$: $A_R = 1/a_R - 1/a_{II}$. Если считать, что для эметропа $a_{II} \approx -1$ м, то получаем $A_R = 1/a_R + 1$ дптр. Профессор Вениамин Васильевич Волков

и его сотрудники разработали методы измерения R_{Π} и аппаратуру для таких измерений. Среди офтальмологов появляются сторонники нового подхода к вопросу о точке покоя аккомодации и соответствующего изменения понятия аметропии.

Итак, близорукий глаз в состоянии покоя аккомодации видит резко те предметы, которые находятся на расстоянии ближайшей точки, а те предметы, которые находятся ближе её, – только при условии напряжения аккомодации. Дальнозоркий же глаз никаких предметов без коррекции зрения видеть резко не может.

Коррекция зрения, т.е. исправление аметропии глаза, осуществляется с помощью очковых линз. Очковая линза при покое аккомодации должна обеспечить на сетчатке глаза резкое изображение удалённых предметов. Следовательно, для коррекции аметропии задний фокус очковой линзы должен совпадать с дальнейшей точкой аметропического глаза. Из условия удобства применения линза располагается на некотором расстоянии от роговицы глаза. Поэтому оптическая сила φ линзы отличается от A_R и определяется формулой

$$\varphi = A_R / (1 + \delta A_R), \quad (52)$$

где A_R – аметропия глаза, дптр.; δ – расстояние от задней главной плоскости линзы до передней главной плоскости глаза, м. Если абсолютная величина аметропии невелика, то $|a_R| \gg \delta$, при этом $\varphi \approx A_R$.

Таким образом, для коррекции близорукости должны применяться отрицательные линзы, а для коррекции дальнозоркости – положительные. Все очковые линзы рассчитываются на стандартное расстояние от глаза, равное 12 мм.

Пусть угловая величина наблюдаемого аметропом удалённого предмета равна ω . Применив очки, наблюдатель увидит резкое изображение в плоскости расположения дальнейшей точки. С приемлемой точностью будем считать, что изображение, образованное очковыми линзами, расположено в задней фокальной плоскости линз. Линейный размер изображения предмета равен: $l' = -f'\omega$. В результате применения очков угловая величина наблюдаемого

аметропом предмета равна $\omega' = \frac{l'}{q - f'} = \frac{f'\omega}{f' - q}$, где q – расстояние от задней

главной плоскости очковой линзы до передней узловой точки глаза. Отсюда находим, что угловое увеличение изображения наблюдаемого предмета равно

$$\Gamma = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{f'}{f' - q} = \frac{1}{1 - q\varphi} \quad (53)$$

Для редуцированного глаза по Вербицкому величина $q = 12 + 6,8 = 18,8$.

Из формулы (48) следует, что близорукий человек (при $\varphi < 0$) наблюдает предметы с увеличением $\Gamma < 1$, т.е. с уменьшением, а дальнозоркий (при $\varphi > 0$) – с увеличением $\Gamma > 1$.

Использование простых линз в качестве луп известно с давних времён. Грекам хорошо были знакомы увеличительные свойства линз, преломляющих поверхностей, которые они могли наблюдать на шариках из стекла или горного хрусталя. Совершенство выполнения некоторых ручных работ того времени можно объяснить, если предположить, что при этом применялись лупы.

Для выполнения ручных работ было бы хорошо совместить увеличительные свойства лупы с удобством размещения очков. Эти условия удалось осуществить при разработке стереоскопических очков, предназначенных для выполнения хирургических операций.

9. Операционные очки

Оптическая система операционных очков должна удовлетворять очевидным функциональным требованиям: наблюдаемый предмет и его увеличенное изображение должны быть расположены в одной плоскости; выходные зрачки оптической системы очков должны быть совмещены со зрачками глаз пользователя; оптические оси обеих визуальных систем (левой и правой) должны пересекаться в общей точке в плоскости предмета. Принципиальная схема одной из одинаковых ветвей оптической системы стереоскопических операционных очков представлена на рис. 14.

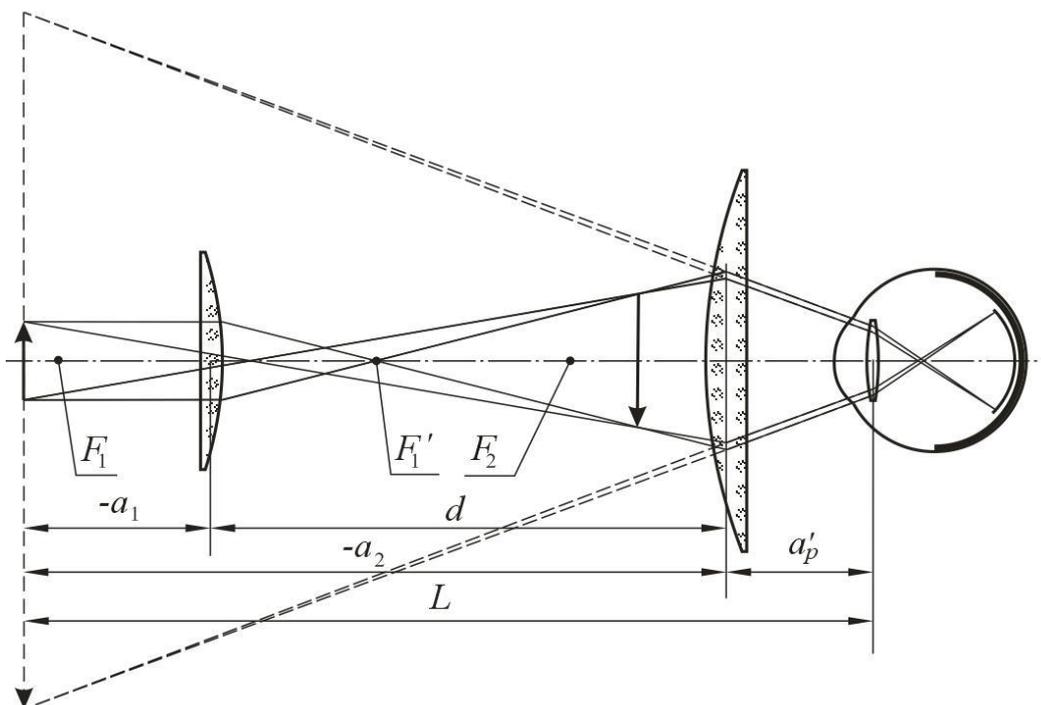


Рис.14. Принципиальная схема одной из ветвей оптической системы стереоскопических операционных очков

Исходными данными для определения параметров оптической системы очков принимаем следующие:

V – поперечное увеличение изображения наблюдаемого предмета;

L – расстояние от наблюдаемого предмета до выходного зрачка оптической системы каждой визуальной системы;

d – расстояние между тонкими компонентами (тонкими линзами) оптической системы каждой визуальной системы;

a'_p – расстояние от глазного компонента очков до выходного зрачка (до зрачка глаза).

Из условия решаемой задачи и из рис.14 имеем: $L = a'_p - a_1 + d = a'_p - a'_2$, при этом

$$a'_2 = a_1 - d, \quad (54)$$

$$a_2 = a'_1 - d \quad (55)$$

Применив формулу отрезков в виде $\frac{1}{a'_i} - \frac{1}{a_i} = \varphi_i$, в соответствии с рис.14

имеем

$$a'_1 = \frac{a_1}{1 + a_1\varphi_1}, \quad (56)$$

$$a'_2 = \frac{a_2}{1 + a_2\varphi_2}. \quad (57)$$

Поперечное увеличение изображения, образованного тонким компонентом (тонкой линзой в воздухе), определяется отношением $V_i = \frac{a'_i}{a_i}$. При этом

поперечное увеличение изображения, образованного визуальной системой очков, равно

$$V = V_1 V_2 = \frac{1}{1 + a_1\varphi_1} \frac{1}{1 + a_2\varphi_2}. \quad (58)$$

Учитывая выражение (57), получаем $a'_2 = Va_2(1 + a_1\varphi_1)$. Применив выражения (54), (55) и (56), полученное выражение можно представить в виде:

$$a_1 - d = V(1 + a_1\varphi_1) \left(\frac{a_1}{1 + a_1\varphi_1} - d \right).$$

В результате последующих преобразований получаем

$$\varphi_1 = \frac{d - a_1}{da_1} \frac{1 - V}{V}, \quad (59)$$

где $a_1 = a'_p + d - L$.

Решая выражение (58) относительно φ_2 , получаем $\varphi_2 = \frac{1}{a_2} \left(\frac{1}{V} \frac{1}{1 + a_1\varphi_1} - 1 \right)$.

Применив выражения (55), (56) и (59), полученное выражение можно преобразовать к виду:

$$\varphi_2 = \frac{a_1}{d} \frac{1-V}{a_1-d}. \quad (60)$$

Пусть, например, требуется определить параметры (оптические силы) тонких компонентов операционных очков, формирующих изображения, увеличение которых $V = 2,5^\times$ при расстоянии $L = 350$ мм. Пусть расстояние $a'_p = 25$ мм. Из выражений (59) и (60) следует, что чем меньше расстояние d , тем больше абсолютная величина оптических сил тонких компонентов, а, следовательно, тем больше величина остаточных аберраций. С другой стороны, чем меньше расстояние d , тем компактнее конструкция очков и тем комфортнее условия их применения. Пусть $d = 25$ мм. Тогда $a_1 = 25 + 25 - 350 = -300$ мм. Подставив соответствующие величины в выражения (59) и (60), получаем $\varphi_1 = 0,0260$ мм⁻¹; $\varphi_2 = -0,0554$ мм⁻¹.

Вывод формул, определяющих параметры (оптические силы) тонких компонентов операционных очков, заметно проще, если принципиальную схему визуальной системы очков определить с помощью углов, образованных осевым виртуальным лучом с оптической осью, в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= V \\ \alpha_2 &= \alpha \quad d_1 = d \\ \alpha_3 &= 1 \end{aligned}$$

При этом высота точки пересечения луча с первым компонентом $h_1 = \alpha_1 \alpha_1 = \alpha_1 \cdot V$. Применив формулу $\alpha_{i+1} - \alpha_i = h_i \varphi_i$, получаем

$$\varphi_1 = \frac{\alpha - V}{a_1 V}. \quad (61)$$

Высота точки пересечения луча со вторым компонентом $h_2 = h_1 - \alpha d = a_1 V - \alpha d$. Отсюда следует, что $\alpha = \frac{a_1 V - h_2}{d}$. С другой стороны,

$h_2 = a'_2 \alpha_3 = a_1 - d$. При этом

$$\alpha = 1 - \frac{1-V}{d} a_1. \quad (62)$$

Подставив выражение (62) в выражение (61), получаем

$$\varphi_1 = \frac{d - a_1}{d a_1} \frac{1-V}{V}. \quad (63)$$

Для второго компонента имеем $1 - \alpha = h_2 \varphi_2$. При этом

$$\varphi_2 = \frac{1 - \alpha}{h_2} = \frac{1 - \alpha}{a_1 - d}. \text{ Применив выражение (62), получаем}$$

$$\varphi_2 = \frac{a_1}{d} \frac{1-V}{a_1-d}. \quad (64)$$

10. Зрительное восприятие предметов, наблюдаемых с помощью бинокулярных зрительных труб

Предположим, что наблюдаемый предмет расположен на бесконечно большом расстоянии от некоторой оптической системы (объектива) $f_{об}$. При этом угловая величина изображаемого пространства предметов определяется выражением:

$$tg\omega_{об} = -l'/f'_{об}, \quad (65)$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние оптической системы (объектива); l' – величина изображения, ограниченного полевой диафрагмой. Если образованное объективом изображение рассматривается с помощью окуляра, то угловая величина изображения со стороны наблюдателя определится отношением

$$tg\omega'_{ок} = l'/f'_{ок} \quad (66)$$

Такое сочетание объектива и окуляра образует афокальную оптическую систему, называемую телескопом или зрительной трубой в зависимости от характера применения.

Видимое увеличение изображения наблюдаемого предмета, образованного рассматриваемой афокальной системой, определяется отношением

$$\Gamma = tg\omega'_{ок}/tg\omega_{об} = -f'_{об}/f''_{ок} \quad (67)$$

При наблюдении с помощью бинокля при $\Gamma > 1^{\times}$ (при отсутствии оборачивания изображения) наблюдаемые предметы воспринимаются естественной (привычной) величины, но на заметно более близком расстоянии. При наблюдении с помощью зрительной трубы одним (левым или правым) глазом при прикрытом веком другим наблюдается тот же эффект. Однако если наблюдать двумя глазами: одним – с помощью зрительной трубы, а другим – непосредственно, то на фоне наблюдаемого невооружённым глазом предмета естественной величины в той же плоскости другим глазом с помощью зрительной трубы наблюдается изображение величиной в Γ раз больше предмета. Этот эффект объясняется тем, что оба глаза одновременно могут аккомодировать только на один предмет. Прикрыли веком невооружённый глаз, – и снова наблюдаем ожидаемый эффект: предметы снова воспринимаются естественной (привычной) величины, но на близком расстоянии. Рассмотрим смысловую сторону этого явления.

Предположим, что плоскость предмета расположена на конечном расстоянии от объектива афокальной системы. При этом будем считать, что входной зрачок системы расположен в переднем фокусе объектива системы, а расстояние от переднего фокуса объектива до наблюдаемого предмета высотой l равно $-z_{об}$, как показано на рис. 15.

Угловое поле изображаемого пространства в соответствии с рисунком определяется выражением:

$$tg\omega_{об} = -l/z_{об}, \quad (68)$$

а угловое поле в пространстве изображений – выражением:

$$\operatorname{tg} \omega'_{\text{ок}} = l'_{\text{ок}} / z'_{\text{ок}}. \quad (69)$$

Подставив эти соотношения в формулу (67), получаем

$$\Gamma = -\frac{l'_{\text{ок}} z_{\text{об}}}{l z'_{\text{ок}}}. \quad (70)$$

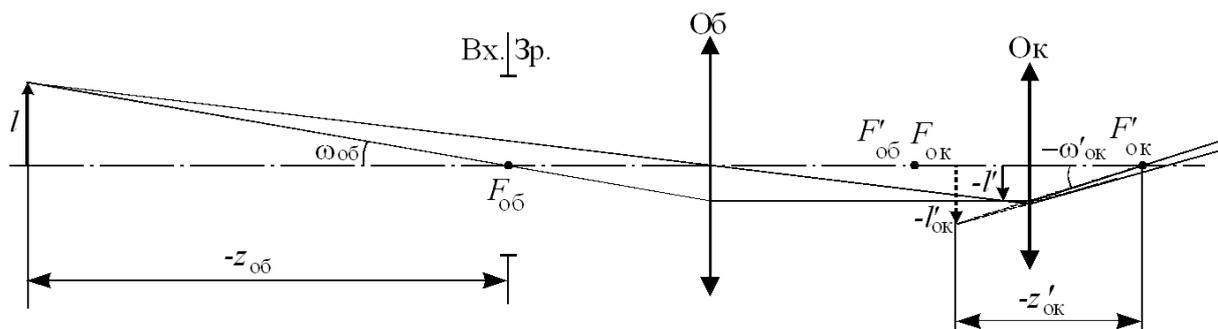


Рис.15. Ход лучей в афокальной системе при расположении предмета на конечном расстоянии

Отсюда находим, что при $l'_{\text{ок}}=l$:

$$z'_{\text{ок}} = -z_{\text{об}} / \Gamma. \quad (71)$$

Учитывая принцип таутохронизма, волновой фронт во входном зрачке системы будем считать плоским, если его прогиб не превышает, например, величины $\lambda/4$. В этом случае для определения величины прогиба можно

применить формулу: $W = \frac{D_{\text{вх.зр.}}^2}{8L}$, где L – расстояние от наблюдаемой точки до

входного зрачка. При $W \leq \lambda/4$ получаем $L = \frac{D_{\text{вх.зр.}}^2}{2\lambda}$. При $\lambda = 0,5$ мкм глубина

резко изображаемого пространства предметов начинается с расстояния, равного

$$L^\infty = -z_{\text{об}} = \left[\frac{(D_{\text{вх.зр.}}, \text{мм})^2}{2 \cdot 0,5 \text{мкм}} \right] \text{м}. \quad (72)$$

При $d_{\text{вых.зр.}} \geq d_{\text{гл}}$ диаметр действующего входного зрачка равен $D_{\text{вх.зр.}} = |\Gamma| d_{\text{гл}}$. При достаточном освещении диаметр зрачка глаза можно принять равным 2,5 мм. Пусть, например, $\Gamma=10^\times$. Тогда $D_{\text{вх.зр.}}=10 \cdot 2,5=25$ мм. При этом $L^\infty \geq 25^2=625$ м. При наблюдении предметов, расположенных ближе этого расстояния, необходима перефокусировка изображения путём продольного перемещения окуляра. В соответствии с формулой Ньютона: $z \cdot z' = -f'^2$. Тогда величина перемещения окуляра определится формулой:

$$z_{\text{ок}} = -f'^2 / z'_{\text{ок}}, \quad (73)$$

где $z'_{\text{ок}} = z_{\text{ок}} / \Gamma$. Перемещение окуляра принято оценивать в диоптрийной мере.

При этом формулу (73) можно представить в виде:

$$z_{\text{ок}} = -f'^2 D / 1000, \quad (74)$$

где $D=1/(z'_{\text{ок}}, \text{мм})$. Так, например, при $f'_{\text{ок}}=25$ мм величина $z_{\text{ок}}$ при $D=-1$ дптр равна $z_{\text{ок}}=625/1000=0,625$ мм.

При наблюдении в бинокль мало удалённых объектов, в частности пролетающих над берегом Финского залива чаек вблизи от наблюдателя, было замечено, что при непосредственном наблюдении чайки кажутся крупнее, чем при наблюдении в бинокль. Видимое увеличение применяемого бинокля было равно $\Gamma=20\times$, при этом приборная база B бинокля превышала глазную базу b примерно вдвое. Убедиться в существовании замеченного явления можно было лишь путём исключения собственно увеличивающего действия оптического прибора. Для этого из двух ромбических призм было собрано устройство, подобное известному телестереоскопу Гельмгольца [23, 8], как показано на рис.16 (на рисунке призмы заменены эквивалентной системой плоских зеркал), при этом приборная база B превышала глазную базу b также примерно вдвое.

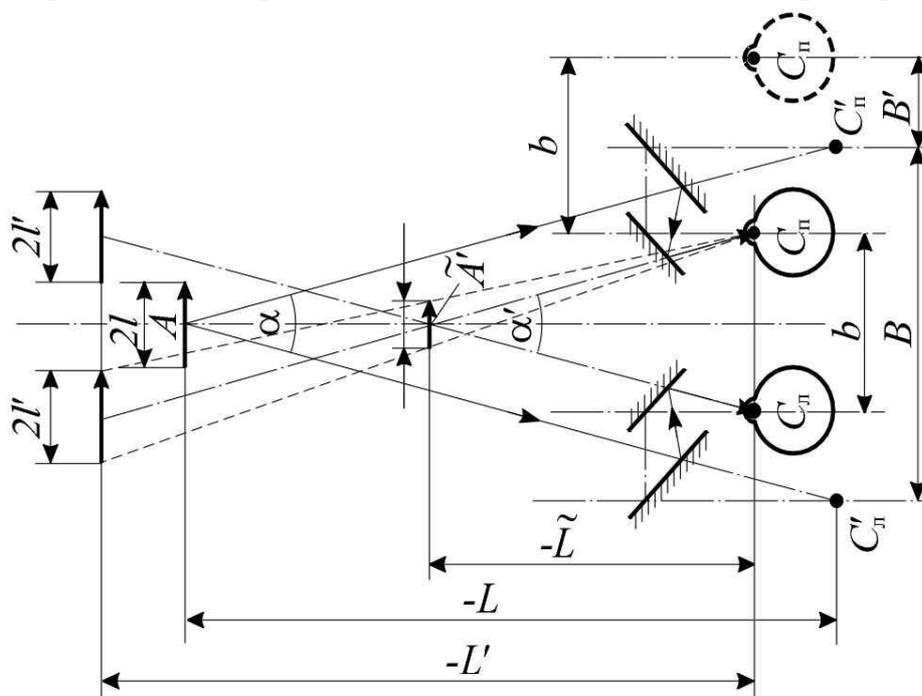


Рис.16. Схема телестереоскопа Гельмгольца при $\Gamma=1\times$

При наблюдении в собранное устройство величина пальцев вытянутой руки казалась существенно меньше действительной. При наблюдении одним глазом эффект уменьшения пропадал. При поперечном смещении головы наблюдателя вправо на расстояние, равное b , как показано на рисунке, приборная база B' становится примерно вдвое меньше глазной. При этом близкие предметы кажутся чуть больше действительной величины. На величину удалённых предметов применение устройства не влияет в обоих случаях. Рассмотрим результаты предпринятой попытки объяснить наблюдаемые явления.

Величина изображения на сетчатке глаза предмета l , расположенного на расстоянии L от наблюдателя, равна

$$l'_\Gamma = \frac{p'}{L} l, \quad (75)$$

где p' – приведённое (редуцированное) к воздуху расстояние от задней главной плоскости оптической системы глаза до сетчатки. Пренебрегая возможным смещением задней главной плоскости оптической системы глаза при перефокусировке изображения путём изменения оптической силы хрусталика, будем считать $p' = \text{const}$. При наблюдении расположенного в той же плоскости увеличенного в Γ раз предмета $\tilde{l} = \Gamma l$ величина его изображения на сетчатке глаза равна

$$\tilde{l}'_\Gamma = \frac{p'}{L} \Gamma l. \quad (76)$$

Во всех случаях визуального наблюдения увеличивающее действие применяемых оптических средств естественно и удобно оценивать отношением соответствующих величин изображений на сетчатке глаза. В рассматриваемом случае видимое увеличение воспринимаемого изображения равно

$$\Gamma = \frac{\tilde{l}'_\Gamma}{l'_\Gamma}. \quad (77)$$

Тогда выражение (69) можно представить в виде:

$$\tilde{l}'_\Gamma = p' \left(\frac{L}{\Gamma} \right)^{-1} l.$$

Отсюда следует, что по величине изображения на сетчатке глаза увеличение объекта наблюдения эквивалентно его приближению к наблюдателю в том же масштабе. При этом важно отметить, что различие в положении объектов наблюдения определяет различие в положении точек аккомодации глаз наблюдателя.

К простейшим средствам визуального наблюдения удалённых предметов относится зрительная труба. Не нарушая общности анализа, для определённости и сравнительной простоты получения необходимых соотношений рассмотрим применение зрительной трубы, состоящей из телескопической системы Кеплера и зеркально-призмной оборачивающей системы, поперечное увеличение которой $V_{\text{зпс}} = -1^\times$. Входной зрачок трубы будем считать расположенным в передней фокальной плоскости объектива, при этом выходной зрачок трубы, расположенный в задней фокальной плоскости окуляра, полагаем совмещённым со зрачком глаза наблюдателя.

Положение изображений, образованных оптическими компонентами зрительной трубы, удобно определить с помощью известной формулы Ньютона: $zz' = ff'$ (в рассматриваемом случае полагаем $ff' = -f'^2$), а поперечное

увеличение образованных изображений – формулой $V = -\frac{z'}{f'} = \frac{f'}{z}$.

Положив расстояние от входного зрачка зрительной трубы (от переднего фокуса объектива) до предмета равным $z_{об}$, находим, что $z'_{об} = -\frac{f'^2_{об}}{z_{об}}$. Для окуляра телескопической системы $z_{ок} = z'_{об}$. Тогда расстояние от зрачка глаза наблюдателя до изображения, образованного окуляром (и всей системой в целом), равно

$$z'_{ок} = -\frac{f'^2_{ок}}{z_{ок}} = \frac{f'^2_{ок}}{f'^2_{об}} z_{об}. \quad (78)$$

При этом увеличение изображения, образованного зрительной трубой, определяется очевидным выражением:

$$V_{зт} = V_{об} V_{зпс} V_{ок} = \frac{f'_{об}}{z_{об}} \frac{z'_{ок}}{f'_{ок}}. \quad (79)$$

Учитывая соотношение (78), получаем

$$V_{зт} = \frac{f'_{ок}}{f'_{об}}. \quad (80)$$

Величина изображения на сетчатке глаза в рассматриваемом случае равна

$$\tilde{l}'_{\Gamma} = \frac{p'}{z'_{ок}} l' = \frac{p'}{z'_{ок}} V_{зт} l. \text{ Подставим в это выражение выражения (78) и (80).}$$

$$\text{Тогда } \tilde{l}'_{\Gamma} = \frac{p'}{z_{об}} \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} l. \quad (81)$$

Соотношения (75) и (81) позволяют формально определить видимое увеличение изображения, образованного зрительной трубой, отношением

$$\Gamma = \frac{\tilde{l}'_{\Gamma}}{l'_{\Gamma}} = \frac{L}{z_{об}} \frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \text{ Положив } z_{об} \approx L, \text{ получаем}$$

$$\Gamma = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{1}{V_{зт}}. \quad (82)$$

Используя формулы (75) и (71), получаем

$$l' = V_{зт} l = \frac{l}{\Gamma}, \quad (83)$$

$$z'_{ок} = \frac{z_{об}}{\Gamma^2} \approx \frac{L}{\Gamma^2}. \quad (84)$$

Из полученных соотношений следует, что, используя зрительную трубу, наблюдатель принципиально видит уменьшенное в Γ раз изображение предмета на уменьшенном в Γ^2 расстоянии до него. Однако можно считать известным тот

факт, что наблюдатель воспринимает изображение практически натуральной величины, что соответствует условию $\tilde{V}_{\text{зт}} = 1^\times$, на уменьшенном в соответствии с видимым увеличением зрительной трубы расстоянии. Положив в формуле (71) расстояние $z_{\text{ок}} = z'_{\text{об}} + \Delta$, где Δ – фокусирующее смещение окуляра, получаем

$$z'_{\text{1ок}} = -\frac{f'_{\text{ок}}}{z'_{\text{об}} + \Delta} = \frac{f'_{\text{ок}}{}^2 z'_{\text{об}}}{f'_{\text{об}}{}^2 - z'_{\text{об}}\Delta}. \quad (85)$$

Подставив формулу (85) в выражение (79), имеем

$$V_{\text{зт}} = V_{\text{об}}V_{\text{зпс}}V_{\text{ок}} = \frac{f'_{\text{об}}f'_{\text{ок}}}{f'_{\text{об}}{}^2 - z'_{\text{об}}\Delta}. \quad (86)$$

Отсюда находим

$$\Delta = f'_{\text{об}}{}^2 \frac{V_{\text{зт}}\Gamma - 1}{V_{\text{зт}}\Gamma z'_{\text{об}}}. \quad (87)$$

При $\tilde{l}' = l$: $V_{\text{зт}} = 1^\times$. При этом

$$\Delta_1 = f'_{\text{об}}{}^2 \frac{\Gamma - 1}{\Gamma z'_{\text{об}}}. \quad (88)$$

Подставив это выражение в формулу (85), получаем

$$z'_{\text{1ок}} = \frac{z'_{\text{об}}}{\Gamma}. \quad (89)$$

Можно предположить, что в отсутствие подвижки окуляра в “стремлении” видеть изображение натуральной величины точка аккомодации глаза наблюдателя располагается в плоскости центральной проекции изображения $l' = \frac{l}{\Gamma}$ на расстоянии $\tilde{z}'_A = z'_{\text{1ок}}$, определяемом формулой (89), или на дальней границе глубины резко изображаемого пространства, если эта глубина меньше отрезка $z'_{\text{ок}} - z'_{\text{1ок}}$, как показано на рис. 17а.

При этом отношение величины центральной проекции изображения к предмету $\tilde{V}_{\text{зт}} \leq 1^\times$ при $\tilde{z}'_\alpha \leq \frac{z'_{\text{об}}}{\Gamma}$. В том случае, когда величина $\tilde{V}_{\text{зт}}$ заметно меньше единицы, возникает ощущение того, что видимое увеличение зрительной трубы не соответствует номинальному (меньше его). При этом появляется потребность в подвижке окуляра даже при достаточной резкости изображения.

Представляет интерес рассмотреть вариант наблюдения с помощью зрительной трубы при $z'_{\text{ок}2} = z'_{\text{об}}$, поскольку в этом случае появляется возможность сопоставительной оценки величины предмета и изображения

одновременно. Положив в формуле (86) $z'_{ок2} = z_{об}$, получаем $V_{23T} = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \Gamma$.

При этом из формулы (87) находим, что

$$\Delta_2 = f'_{об} \frac{\Gamma^2 - 1}{z_{об} \Gamma^2}. \quad (90)$$

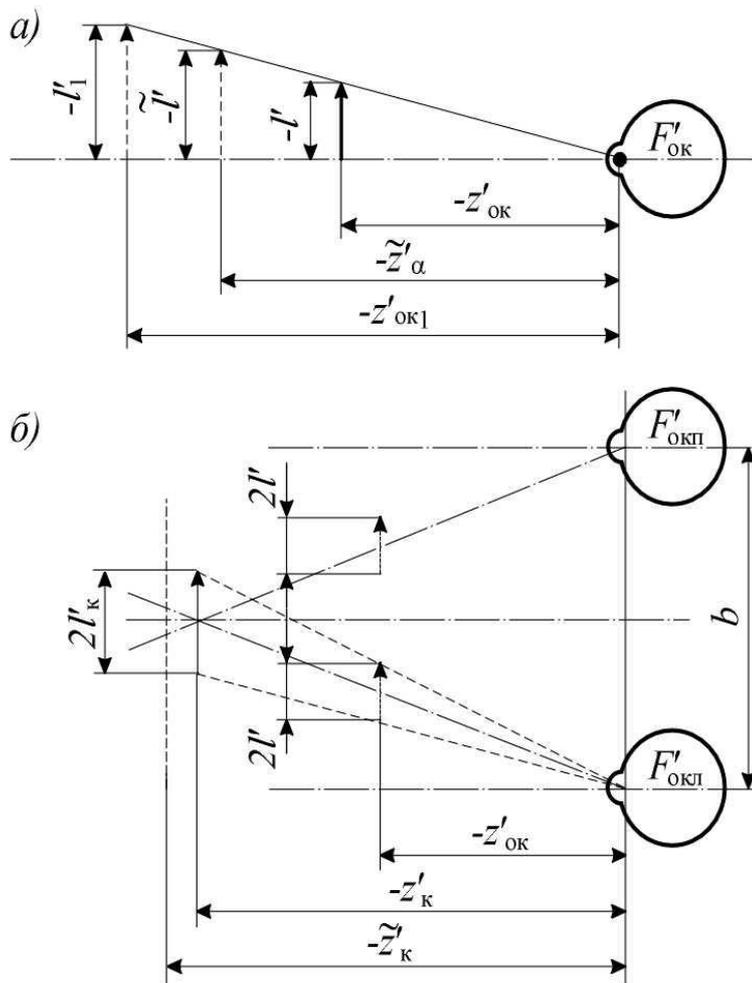


Рис.17. Схема наблюдения: а – при монокулярном восприятии изображения, б – при стереоскопическом восприятии изображения

Переместив окуляр по направлению к наблюдателю на величину Δ_2 , получаем $z'_{ок2} = z_{об} \approx L$; При этом одним глазом наблюдаем предмет непосредственно, а другим – в зрительную трубу. Сопоставление величин предмета и изображения не оставляет сомнений в объективности принятой оценки увеличительного действия зрительной трубы. Однако при наблюдении только в зрительную трубу пропадает ощущение её увеличительного действия, и наблюдатель снова видит изображение практически натуральной величины на уменьшенном в соответствии с видимым увеличением трубы расстоянии. И в

этой ситуации можно предположить, что в стремлении видеть изображение натуральной величины точка аккомодации глаз наблюдателя располагается на расстоянии $z'_{1ок}$ или на ближней границе глубины резко изображаемого пространства, если эта глубина меньше отрезка $z'_{2ок} - z'_{1ок}$. При этом отношение величин центральной проекции изображения и предмета $\tilde{V}_{зг} \geq 1^*$ при $\tilde{z}'_{\alpha} \geq \frac{z_{об}}{\Gamma}$.

Известно [24], что взаимосвязь волновой W и продольной Δ' расфокусировок определяется выражением

$$W = -\frac{1}{2} \Delta' n' \sigma'^2, \quad (91)$$

где σ' – апертурный угол в пространстве изображений, n' – показатель преломления среды в том же пространстве. При малой величине угла σ' поперечная расфокусировка изображения равна $\delta' = \Delta' \sigma'$. При этом выражение (91) можно представить в виде:

$$W = -\frac{1}{2} \delta' n' \sigma', \quad (92)$$

где $n' \sigma' = \frac{d_2}{2p'}$; d_2 – диаметр зрачка глаза. В соответствии с критерием Рэля допустимая величина волновой расфокусировки, определяемая формулой (92), должна удовлетворять условию $\frac{1}{2} \delta' n' \sigma' \leq \frac{\lambda}{4}$, что соответствует и критерию Марешаля [25], согласно которому падение относительной освещённости в центре изображения точки при расфокусировке не должно превышать 20 % [26]. При этом

$$\delta' \leq \frac{\lambda}{2n' \sigma'} = \frac{\lambda}{d_2} p'. \quad (93)$$

Пусть расстояние аккомодации оптической системы глаза равно – L_0 , как показано на рис. 18. На этом рисунке дальняя граница глубины резкости определяется отрезком – $L_д$, а ближняя граница – отрезком – $L_б$, при этом $\delta'_д$, $\delta'_б$ – соответствующие им поперечные расфокусировки на сетчатке глаза. В соответствии с рисунком справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\delta'_д}{p'} = \frac{\delta_д}{L_д}, \quad \frac{\delta_д}{L_д - L_0} = -\frac{d_г}{2L_0}; \quad \frac{\delta'_б}{p'} = \frac{\delta_б}{L_б}, \quad \frac{\delta_б}{L_б - L_0} = -\frac{d_г}{2L_0}.$$

Естественно предположить, что в этих выражениях $\delta'_д = -\delta'_б = \delta'$.

Исключив из них соответственно, $\delta_д$ и $\delta_б$, получаем

$$L_б = \frac{L_0}{1 - 2 \frac{L_0}{p'} \frac{\delta'}{d_г}}, \quad (94)$$

$$L_{\text{д}} = \frac{L_0}{1 + 2 \frac{L_0}{p'} \frac{\delta'}{d_{\text{г}}}}. \quad (95)$$

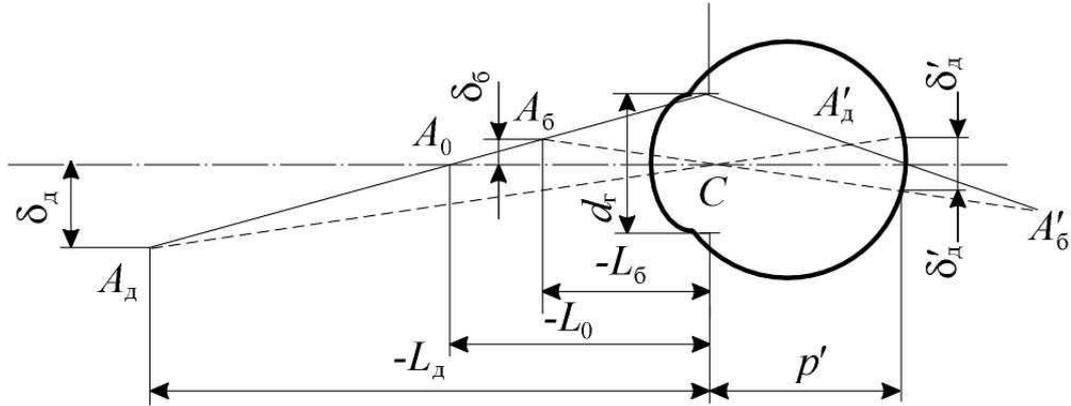


Рис.18. Определение границ глубины резко изображаемого пространства

Заметим, кстати, что при $\frac{\delta'}{p'} = -\frac{d_{\text{г}}}{2L_0}$ величина $L_{\text{д}} = \infty$. Из условия (93)

следует, что $\frac{\delta'}{p'} = \frac{\lambda}{d_{\text{г}}}$. Исключив при этом из системы уравнений (94) и (95)

величину L_0 , получаем

$$L_{\text{б}} = -\frac{1}{4\lambda} \frac{d_{\text{г}}^2}{1 - \frac{1}{4\lambda L_{\text{д}}} d_{\text{г}}^2}. \quad (96)$$

При $L_{\text{д}} = \infty$: $L_{\text{б}}^{\infty} = -\frac{d_{\text{г}}^2}{4\lambda}$. Пусть $\lambda = 0,5 \mu\text{м}$. Тогда при $d_{\text{г}}$, измеряемом в мм,

имеем

$$L_{\text{б}}^{\infty} = -0,5 d_{\text{г}}^2. \quad (97)$$

Расстояние $L = L_{\text{д}} - L_{\text{б}}$ называется полной глубиной резко изображаемого пространства предметов [5]. Применяв выражение (96), получаем

$$L = \frac{L_{\text{б}}}{1 + \frac{d_{\text{г}}^2}{4\lambda L_{\text{б}}}} = \frac{L_{\text{д}}}{1 - \frac{d_{\text{г}}^2}{4\lambda L_{\text{д}}}}. \quad (98)$$

Угловое поле изображаемого зрительной трубой пространства предметов (2ω) и в пространстве изображений ($2\omega'$) определяются очевидными

соотношениями: $\operatorname{tg}\omega = -\frac{l}{z_{об}}$; $\operatorname{tg}\omega' = -\frac{l'}{z'_{ок}} = -\frac{lV_{зт}}{z'_{ок}}$. Применив формулы (85) и

(86), получаем

$$\operatorname{tg}\omega' = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \operatorname{tg}\omega = \Gamma \operatorname{tg}\omega. \quad (99)$$

И, наконец, анализ условий наблюдения с помощью зрительной трубы позволяет сделать вывод о том, что при $|z'_{лок}| \leq |L_{обв}|$, где $L_{обв}$ – дальность (расстояние) ближнего видения, увеличительное действие зрительной трубы переходит в увеличительное действие микроскопа.

Сочетание двух зрительных труб произвольной конструкции, оптические оси которых в пространстве предметов и изображений параллельны друг другу, образует оптический прибор для стереоскопического наблюдения. Из приборов этого назначения наиболее массовым применением пользуется бинокль. Для удобства последующего анализа состав зрительных труб стереоскопического прибора будем считать прежним.

Основными характеристиками стереоскопического прибора являются его видимое увеличение, расстояние между входными зрачками зрительных труб, называемое базой прибора, и расстояние между выходными зрачками труб (окулярная база), примерно равное глазной базе наблюдателя. Пусть B – база прибора. Так как расстояние от входных зрачков прибора до предмета значительно больше базы прибора, параллактический угол α будем считать равным

$$\alpha = -\frac{B}{z_{об}}. \quad (100)$$

Параллактический угол в пространстве изображений, равный углу конвергенции глаз наблюдателя, определим в соответствии с формулой (99):

$$\alpha' = \Gamma \alpha. \quad (101)$$

Напомним, что “...представление о стереоскопическом образе полностью лишено физического содержания и является чисто проективным, геометрическим понятием” [5]. При этом расстояние до центральных проекций изображений, формирующих стереоскопический образ, как показано на рис.

17б, равно $z'_к = -\frac{b}{\alpha'}$, где b – глазная база наблюдателя. Подставив в это соотношение выражения (93) и (94), получаем

$$z'_к = \frac{b}{B} \frac{z_{об}}{\Gamma}. \quad (102)$$

Итак, наблюдаемая картина требует аккомодации глаз на расстояние $z'_{ок}$, а конвергенции – на расстояние $z'_к$. Известно, что между конвергенцией визирных осей глаз и аккомодацией глаз существует физиологическая

взаимосвязь: при рассматривании нормальными глазами близкого предмета конвергенция осуществляется как раз на такую величину, какая необходима для приведения изображения наблюдаемого предмета на центральную ямку каждого глаза [8]. При этом важно отметить, что эта взаимосвязь не имеет абсолютного характера, и конвергенция визирных осей может меняться независимо от аккомодации глаз при изменении, например, взаимного положения картин в стереоскопе [8]. Поэтому в реальных условиях применения оптического прибора следует удерживать расхождение конвергенции и аккомодации в “зоне комфорта”, равной ± 1 дптр. [5].

Итак, если в применяемом приборе аккомодация должна соответствовать “бесконечности”, то нормальным положением визирных осей будет параллельное. При этом допустимая величина возможной дивергенции не должна превышать $(7 \div 8)'$, а конвергенция – $(20 \div 25)'$ [8]. В соответствии с рис. 17_б величина центральных проекций изображений, формирующих стереоскопический образ, равна $l'_k = \frac{z'_k}{z'_{ок}} l'$. Выполнив подстановку в соответствии с формулами (83), (84) и (102), получаем

$$l'_k = \frac{b}{B} l'. \quad (103)$$

Отсюда следует, что величина проекций не зависит от увеличения зрительных труб и определяется только отношением баз. Для театрального бинокля, как правило, $B \approx b$. При этом из выражений (102) и (103) следует:

$$z'_k = \frac{z_{об}}{\Gamma} = z'_{1ок}; l'_k = l'.$$

Таким образом, применение театрального бинокля позволяет наблюдателю видеть стереоскопическое изображение натуральной величины на уменьшенном в Γ раз расстоянии. В этой связи важно отметить, что “...ощущение относительного расстояния в стереоскопии не зависит от абсолютного состояния конвергенции или дивергенции визирных осей. ...Единственным реальным признаком для оценки кажущегося абсолютного расстояния до объектов в стереоскопическом поле является их угловой размер...” [8].

Обратимся вновь к рис. 16, где показан телестереоскоп Гельмгольца, видимое увеличение которого $\Gamma = 1^*$. Положив при этом $L = z_{об}$, $L' = z'_{ок}$, $\tilde{L}' = z'_k$ и подставив их в формулы (83), (84), (89), (102) и (103), получаем $l' = l$, $z'_{1ок} = L' = L$, $\tilde{L}' = \frac{b}{B} L$, а $l'_k = \frac{b}{B} l$. Те же соотношения легко получить непосредственно из рисунка.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Поскольку угловой размер изображения равен угловому размеру

предмета, стереоскопический образ воспринимается расположенным на том же расстоянии, на котором расположен предмет.

2. При $B > b$ благодаря возможности уменьшения параллактического угла $\alpha' = \alpha$ на величину допустимой дивергенции визирных осей величина видимого изображения $\tilde{l}'_k > l'_k$. При этом $\tilde{l}'_k > \frac{\tilde{z}'_k}{z'_k} l'_k$. Но величина этого допуска мала, а, следовательно, и мала разность величин \tilde{l}'_k и l'_k . Таким образом, при $B > b$ наблюдатель видит уменьшенное по сравнению с предметом изображение.

3. При $B < b$ благодаря возможности увеличения параллактического угла на величину допустимого увеличения конвергенции визирных осей $\tilde{l}'_k < l'_k$. При этом $\tilde{l}'_k > \frac{\tilde{z}'_k}{z'_k} l'_k$, как показано на рис. 16_б. Таким образом, при $B < b$ может наблюдаться заметное увеличение изображения по сравнению с предметом.

4. Поскольку допустимое увеличение параллактического угла (конвергенции визирных осей), по крайней мере, в три раза превышает его уменьшение (дивергенции визирных осей), постольку видимый эффект уменьшения изображения при $B > b$ превышает эффект увеличения изображения при $B < b$.

5. В том случае, когда параллактический угол приближается к допустимой величине его изменения, эффект уменьшения изображения (при $B > b$) и эффект увеличения изображения (при $B < b$) естественным образом пропадают.

Эти выводы вполне справедливы и в общем случае применения прибора при $\Gamma \neq 1^\times$. Однако при этом угловой размер изображения в Γ раз превышает размер предмета, а, следовательно, видимое расстояние до стереоскопического образа в Γ раз меньше расстояния до наблюдаемого предмета. Важно обратить внимание и на то, что при потребности наблюдать в бинокль (или в стереотрубу) сравнительно близко расположенные предметы возможное увеличение видимого изображения при $B < b$ более благоприятно для восприятия в отличие от возможного уменьшения при $B > b$. Кроме того, при $B < b$ возможность естественного восприятия изображения наступает на гораздо меньших расстояниях, занимая практически всё наблюдаемое пространство.

Приложение. Основы учения о цвете

1. Зрительные ощущения

Зрительные ощущения являются результатом воздействия на орган зрения излучения длин волн в диапазоне $\lambda=0,38\div 0,78$ мкм. Как показали исследования, незначительной величины зрительное ощущение возникает даже в полной темноте. Г.Гельмгольц в своё время назвал этот феномен собственным светом сетчатки глаза [27]. Объясняя это явление, академик П.П.Лазарев выдвинул предположение о наличии в светочувствительных клетках некоего вещества, молекулы которого в результате теплового соударения распадаются на ионы [28]. Профессором С.О. Майзелем, в свою очередь, было высказано предположение о том, что из капилляров эпителиального слоя в светочувствительные клетки проникают отрицательные ионы некоего вещества (ионы второго рода). В результате соединения этих отрицательных ионов с положительными ионами продуктов распада фотореагента образуются молекулы (молекулы второго рода) [29].

Концентрация отрицательных ионов в первых синапсах¹ волокон зрительного нерва создаёт разность потенциалов между сетчатой оболочкой глаза и корой головного мозга. В результате этой разности потенциалов в волокнах зрительного нерва возникают импульсы электрического тока [30]. Академиком С.И. Вавиловым было обнаружено, что возникновению одного импульса тока в волокне зрительного нерва, вызывающего ощущение кратковременной вспышки света, соответствует концентрация в первом синапсе этого волокна нескольких ионов. Согласно результатам исследований, это пороговое число отрицательных ионов, равное пороговому числу эффективно поглощённых фотонов, можно принять равным 5–7.

Исследования Е.Д. Эдриана, Г.Х. Хартлайна и Р. Граната показали, что импульсы тока действия возникают периодически в течение всего времени поглощения излучения молекулами фотореагента. Частота импульсов в каждом волокне зрительного нерва зависит, согласно С.О. Майзелю, от числа отрицательных ионов, поступающих в единицу времени к первому синапсу этого волокна. Следовательно, частота импульсов тока действия определяется освещённостью сетчатой оболочки глаза и концентрацией молекул фотореагента. Таким образом, уровень зрительного ощущения, зависящий от частоты импульса тока действия, определяется яркостью поверхности рассматриваемого предмета и концентрацией молекул фотореагента в сетчатой оболочке. Из анализа осциллограммы токов действия следует, что начальному моменту действия излучения соответствует некоторый латентный период, за

¹ Синапс (от греч. *synapsis* – соединение) – область контакта (связи) нервных клеток (нейронов) друг с другом и с клетками исполнительных органов.

которым следуют быстрое увеличение частоты импульсов и последующий спад до установившегося её значения. Латентным периодом в физиологии принято называть промежуток между началом возбуждения и началом возникновения ощущения [30].

Процесс стабилизации зрительного ощущения, определяемый установлением статистически постоянного ритма импульсов тока действия, принято называть адаптацией на заданную яркость поля зрения. Процессы возникновения, развития и затухания зрительного ощущения определяются характеристиками излучения, а также и состоянием органа зрения: чувствительностью его периферии (сетчатой оболочки), проводящих путей (волокон зрительного нерва) и центров коры головного мозга. Как показывают исследования, наиболее существенным для течения процесса возникновения и стабилизации зрительного ощущения является его начальная фаза – обратимая фотодиссоциация молекул фотореагента. Из этого следует, что для установления зависимости уровня зрительного ощущения от параметров излучения, действующего на глаз наблюдателя, необходимо в первую очередь знать закономерности изменения концентрации молекул фотореагентов, а также скорости их фотодиссоциации и восстановления.

Среднее число фотонов однородного излучения, упавших в течение одной секунды на единицу площади сетчатой оболочки глаза, определяется как

$$\bar{n} = \frac{E_\lambda}{680 \cdot V_\lambda \cdot h \cdot \nu},$$

где E_λ – освещённость сетчатки однородным излучением длиной волны λ ; V_λ – функция относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения; h – постоянная Планка; $\nu = \frac{c}{\lambda}$, c – скорость света в вакууме. Подставив $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $c = 2,998 \cdot 10^8$ м·с⁻¹ =

$2,998 \cdot 10^{14}$ мкм·с⁻¹, получаем $\bar{n} = 7,4 \cdot 10^{15} \frac{E_\lambda}{V_\lambda} \lambda$. Но $E_\lambda = \tau_\lambda \frac{S_{зр}}{f'_{гл}{}^2} L_\lambda$, где $S_{зр}$ –

площадь входного зрачка глаза; $f'_{гл}$ – фокусное расстояние оптической системы глаза, приведённое к воздуху (при $\bar{n} = 1,336$: $f'_{гл} = 17$ мм); τ_λ – коэффициент пропускания глазных сред. Тогда $\bar{n} = \frac{7,4 \cdot 10^{15}}{f'_{гл}{}^2} \tau_\lambda \frac{\lambda}{V_\lambda} S_{зр} L_\lambda$.

Пусть диаметр площадки светочувствительного элемента равен d . Тогда

число поглощённых фотонов N_α равно $N_\alpha = \frac{\pi}{4} \alpha_\lambda d^2 \bar{n}$, где α_λ – коэффициент поглощения излучения. При этом число молекул фотореагента, диссоциирующих (вступивших в реакцию) в каждом светочувствительном элементе в одну секунду, равно

$$N'_\sigma = \eta_{k\lambda} N_\alpha = \frac{\pi}{4} \alpha_\lambda \eta_{k\lambda} d^2 \bar{n} = 5,8 \cdot 10^{15} \alpha_\lambda \eta_{k\lambda} \tau_\lambda \frac{d^2}{f'_{\text{гл}}{}^2} \frac{\lambda}{V_\lambda} S_{\text{зр}} L_\lambda,$$

где $\eta_{k\lambda}$ – квантовый выход фотореакции. Приняв $d=1,5$ мкм, при $f'_{\text{гл}}=17$ мм получаем $N'_\sigma = 4,5 \cdot 10^7 \alpha_\lambda \eta_{k\lambda} \tau_\lambda \frac{\lambda}{V_\lambda} S_{\text{зр}} L_\lambda$.

Вследствие того, что излучения постоянной яркости L при любом спектральном составе вызывают одинаковое число диссоциаций в единицу времени, можно сделать вывод о постоянстве произведения $\alpha_\lambda \eta_{k\lambda} \tau_\lambda \frac{\lambda}{V_\lambda}$ для любого монохроматического и сложного излучения. Пользуясь этим соображением, определим приведённое произведение для $\lambda=0,55$ мкм. Исследования показали, что концентрация молекул фотореагента невелика даже в условиях темновой адаптации глаза, вследствие чего всего лишь 10–20% общего числа фотонов, упавших на сетчатку, поглощаются молекулами фотореагента. Малая концентрация эффективно поглощающего вещества позволяет написать приближённое выражение, определяющее коэффициент поглощения: $\alpha = 1 - e^{-mct} \approx mct$, где m – молекулярный показатель поглощения излучения; c – концентрация молекул фотореагента в светочувствительных клетках; t – толщина поглощающего слоя, численно равная длине палочек или колбочек.

Пользуясь приведённым уравнением и принимая концентрацию молекул фотореагента в условиях темновой адаптации, равной $c_0=7 \cdot 10^3$, получаем $mt = \frac{0,1}{c_0} \approx 1,42 \cdot 10^{-5}$. Следовательно, количество молекул, диссоциирующих за одну секунду внутри каждого светочувствительного элемента, равно $N'_\sigma = 640 \eta_{k\lambda} \tau_\lambda \frac{\lambda}{V_\lambda} c S_{\text{зр}} L_\lambda$. Принимая для излучения длиной волны $\lambda=0,55$ мкм

коэффициент пропускания глазных сред $\tau_\lambda=0,565$ и квантовый выход фотодиссоциации равным единице, т.е. считая, что каждая молекула фотореагента, поглотившая фотон этой длины волны, диссоциирует, получаем окончательное уравнение

$$N'_\sigma = 200 c S_{\text{зр}} L_\lambda, \quad (104)$$

где при $\lambda=0,55$ мкм величина $V_\lambda=0,995$.

Это уравнение применимо к молекулам йодопсина, реагирующим на излучение любого спектрального состава, так как спектральная чувствительность колбочек определяется стандартизированной кривой спектральной эффективности излучения. Для учёта числа молекул родопсина, диссоциировавших при поглощении ими фотонов видимого излучения,

необходимо в уравнение (104) внести поправочный коэффициент, определяемый отношением относительных значений спектральной эффективности излучения для ночного V'_λ и дневного V_λ зрения:

$$N'_\sigma = 200bcS_{zp}L_\lambda, \quad (105)$$

где $b = \frac{\sum l_{e\lambda} V'_\lambda \Delta\lambda}{\sum l_{e\lambda} V_\lambda \Delta\lambda}$ – поправочный коэффициент; $l_{e\lambda} = \frac{dL_{e\lambda}}{d\lambda}$ – спектральная

плотность энергетической яркости [30].

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. Цветощущающий аппарат человека способен воспринимать несколько тысяч различных цветовых оттенков. Способность органа зрения человека дифференцировать цвета разноспектральных излучений (различать разноцветные излучения) обусловлена наличием в сетчатой оболочке глаза рецепторов (колбочек), отличающихся друг от друга различным составом светочувствительного вещества с различной чувствительностью к монохроматическим излучениям различных длин волн. Согласно результатам большинства экспериментальных исследований цветового зрения, количество разновидностей таких рецепторов с различным составом светочувствительного вещества равно трём.

Впервые мысль о трёхкомпонентности цветового зрения была высказана в 1756 году М.В. Ломоносовым, который сформулировал положение о наличии на “дне ока” трёх разновидностей частиц материи, взаимодействующих с тремя разновидностями частиц эфира, «зыблющееся» (колебательное) движение которых является причиной света. *«Я заметил и через многие годы многими прежде догадками, а после доказательными опытами с довольно вероятностью утвердился, – пишет М.В. Ломоносов, – что три рода эфирных частиц имеют совмещение с тремя родами действующих первоначальных частиц, чувствительные тела составляющих. Наконец, нахожу, что от первого рода эфира происходит цвет красный, от второго – жёлтый, от третьего – голубой. Протчие цвета рождаются от смешения первых».*

Гипотеза о трёх рецепторах органа зрения человека была впоследствии высказана в 1802 году английским учёным Т. Юнгом. Окончательная формулировка основных положений о трёхкомпонентности цветового зрения принадлежит Г. Гельмгольцу. Гипотеза Ломоносова-Юнга-Гельмгольца о трёхкомпонентности цветового зрения, подтверждённая в последующем многими экспериментами, принята в настоящее время как классическая теория цветового зрения. В соответствии с трёхкомпонентной теорией цветового зрения колбочки световоспринимающего аппарата глаза бывают трёх видов:

- красноощущающие (*r*-рецепторы);
- зеленоощущающие (*g*-рецепторы);

– синеощущающие (*b*-рецепторы).

Ощущение цвета² можно условно делить на две составляющие: количественную – светлоту и качественную – ощущение цветности. 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. Для комплексной качественной и количественной оценки 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 и цветностью.

На основании трёхкомпонентности цветового зрения можно вывести основные соотношения, определяющие цветовое ощущение при освещении глаза излучением с заданным спектральным составом [30]. Предположим, что на орган зрения действует однородное излучение с некоторой яркостью L_λ , обеспечивающей преимущественно работу колбочкового световоспринимающего аппарата. Пусть в этом случае по истечении адаптационного периода в каждом из трёх приёмников установится следующая концентрация фотореагентов: c_r – красноощущающего, c_g – зелёноощущающего и c_b – синеощущающего. Согласно уравнению (105) можно определить числа диссоциировавших молекул в единицу времени *r*-реактанта, *g*-реактанта и *b*-реактанта:

$$\left. \begin{aligned} N_r &= 200c_r k_\lambda S_{зп} L_\lambda \\ N_g &= 200c_g z_\lambda S_{зп} L_\lambda \\ N_b &= 200c_b c_\lambda S_{зп} L_\lambda \end{aligned} \right\}, \quad (106)$$

где $r_\lambda = \frac{\bar{r}_\lambda}{V_\lambda}$; $g_\lambda = \frac{\bar{g}_\lambda}{V_\lambda}$; $b_\lambda = \frac{\bar{b}_\lambda}{V_\lambda}$; \bar{r}_λ , \bar{g}_λ , и \bar{c}_λ – относительные спектральные чувствительности трёх цветоощущающих приёмников.

Произведения $r_\lambda L_\lambda = \frac{\bar{r}_\lambda}{V_\lambda} L_\lambda$, $g_\lambda L_\lambda = \frac{\bar{g}_\lambda}{V_\lambda} L_\lambda$ и $b_\lambda L_\lambda = \frac{\bar{b}_\lambda}{V_\lambda} L_\lambda$ можно

рассматривать как компоненты яркости заданного излучения:

$$L_r + L_g + L_b = L_\lambda, \quad (107)$$

где $L_r = r_\lambda L_\lambda$, $L_g = g_\lambda L_\lambda$ и $L_b = b_\lambda L_\lambda$. Следовательно,

² Комплекс зрительного ощущения, определяемый общим уровнем возбуждения органа зрения, соотношением уровней возбуждения трёх его *rgb*-рецепторов, принято называть ощущением цвета.

$$\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda) = V(\lambda) \quad (108)$$

Для сложного излучения, действующего на глаз человека, коэффициенты r , g и b определяются отношением интегральных выражений r -, g - и b -компонентов яркости к её фотометрическому значению:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\int \varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda}{\int \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \\ g &= \frac{\int \varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda}{\int \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \\ b &= \frac{\int \varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda}{\int \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \right\}, \quad (109)$$

где $\varphi(\lambda)$ – спектральная плотность потока излучения. Приведённые уравнения позволяют определить r -, g - и b -компоненты яркости как некоторые фиктивные яркости таких излучений, которые обладают потенциальной возможностью произвести диссоциацию молекул r -, g - и b -реагентов. Полученные равенства (106), (107) и (109) позволяют представить выражения, определяющие числа молекул r -, g - и b -реагентов, вступивших в реакцию:

$$\left. \begin{aligned} N_r &= 200 c_r S_{\text{зр}} L_r \\ N_g &= 200 c_g S_{\text{зр}} L_g \\ N_b &= 200 c_b S_{\text{зр}} L_b \end{aligned} \right\}, \quad (110)$$

где $L_r = rL$; $L_g = gL$; $L_b = bL$.

Из полученных равенств следует, что частота импульсов тока в r -, g - и b -волокнах зрительного нерва при постоянной площади входного зрачка, а, следовательно, при заданном уровне яркости светящейся поверхности и её углового размера, определится произведением концентрации соответствующего реагента и компонента яркости. Мерой дифференциации органом зрения цвета излучения может служить соотношение частот импульсов в r -, g - и b -волокнах зрительного нерва или чисел диссоциировавших молекул r -, g - и b -реагентов [30]. Легко видеть, что эти соотношения можно определить любыми двумя коэффициентами из трёх:

$$\left. \begin{aligned} n_r &= \frac{N_r}{\sum N} \\ n_g &= \frac{N_g}{\sum N} \\ n_b &= \frac{N_b}{\sum N} \end{aligned} \right\}, \quad (111)$$

где $\sum N = N_r + N_g + N_b$.

Необходимость и достаточность двух коэффициентов из трёх определяется тем, что сумма всех трёх коэффициентов реакции глаза на любое излучение равна единице:

$$n_r + n_g + n_b = 1. \quad (112)$$

Любая пара коэффициентов (n_r и n_g , n_r и n_b или n_g и n_b) характеризует зрительную оценку спектрального состава излучения, а, следовательно, определяет качественную сторону зрительного ощущения – ощущение цветности излучения. Основываясь на этих свойствах коэффициентов n_r , n_g и n_b , их следует называть коэффициентами цветоощущения.

Из уравнений (106) и (110) следует, что ощущение цветности определяется не только спектральным составом излучения, но также и состоянием органа зрения и, в частности, соотношением концентрации r -, g - и b -реагентов [30]. Поэтому принято вводить объективную величину, характеризующую излучение любого спектрального состава и называемую цветностью излучения, которая определяет качественную реакцию глаза (ощущение цветности) в режиме установившейся цветовой адаптации на оцениваемое излучение. Как следует из выражений (110), в режиме установившейся адаптации цветоощущение можно определить соотношением компонентов яркости:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{L_r}{L} \\ g &= \frac{L_g}{L} \\ b &= \frac{L_b}{L} \end{aligned} \right\}. \quad (113)$$

Так же, как и для коэффициентов цветоощущения, из трёх коэффициентов (r , g и b), определяющих цветность, любая пара определяет третий, так как

$$r + g + b = 1. \quad (114)$$

Эти коэффициенты принято называть координатами цветности или трёхцветными коэффициентами.

Кроме двух координат цветности, характеризующих качественную сторону зрительного ощущения, для более полной его характеристики необходимо знать яркость оцениваемого излучения, определяющую в условиях стационарного зрительного процесса уровень ощущения. Такую трёхмерную величину, предназначенную для качественной и количественной оценок излучения по зрительному ощущению, принято называть цветом. [30].

2. Основные понятия колориметрии

Оптическая наука зародилась в глубокой древности. Вполне естественными воспринимаются попытки понять процесс зрительного восприятия видимых предметов, осмыслить понятия света и цвета. Так, например, свет, по мнению Аристотеля (384–322 гг. до Р.Х.), есть подвижное состояние прозрачной среды (эту среду в XIX веке назовут эфиром). Он считал, что свет есть возбуждение среды, находящейся между объектом и глазом. Ему же принадлежит утверждение: «Свет есть качество прозрачного, а цвет – его граница». Удивительные догадки, которые выглядят вполне современно! Таким образом, понятие света и цвета интересует людей с древних времён.

В языке всех народов есть специальные термины для обозначения важнейших цветов: белый, чёрный, серый, красный, жёлтый, зелёный, синий, фиолетовый. Цвет стал диагностическим признаком не только в повседневной жизни, но и в различных отраслях естествознания, не только в оптике, но и в химии, медицине, минералогии, во многих других науках. Роль цвета в живописи, архитектуре, театре, кино и телевидении переоценить невозможно. Вместе с тем, одна только качественная оценка цветов не удовлетворяет потребностям развивающихся науки и техники, нужна строгая количественная характеристика, необходимо однозначно обозначить любой цвет, измерять и воспроизводить его. Именно тогда возникла колориметрия.

Цвет светового потока связан с его длиной волны, однако нельзя сказать, что эта связь однозначна. Когда длина волны постепенно меняется от 380 до 450 нм, глаз не ощущает изменений цвета. Во всём этом диапазоне световой поток кажется нам фиолетовым. Дальнейшее же увеличение λ вызывает быстрый переход цвета от фиолетового к синему и затем к голубому. В зелёной области длина волны изменяется уже несколько медленнее. Но наиболее быстро изменение цвета наблюдается в жёлтой области: для $\lambda = 570$ нм цвет ещё зеленоватый, а для $\lambda = 590$ нм – уже оранжевый. Далее, от $\lambda = 620$ нм, весь участок спектра вплоть до инфракрасной границы кажется нам красным. Уже отсюда следует, что точная характеристика цвета связана с длиной волны весьма неоднозначно. Но если для монохроматического света какая-то зависимость всё же существует, то для света, состоящего из излучения разных длин волн, зависимость вообще отсутствует.

Итак, действие лучистого потока, падающего на входной зрачок глаза,

выражается в возникновении светового ощущения. Различные световые ощущения отличаются как в количественном (яркостном), так и в качественном (по цветности) отношениях, в зависимости от физических характеристик излучения, т.е. от величины лучистого потока и его спектрального состава. Тем не менее, эти физические характеристики излучения в непосредственном виде неудобны для оценки вызываемого им светового ощущения. Это объясняется тем, что одинаковые по величине лучистые потоки могут вызвать, в зависимости от их спектрального состава, различные по интенсивности световые ощущения, и, наоборот, одинаковые по интенсивности световые ощущения могут быть вызваны различными по величине и спектральному составу излучениями; заданный спектральный состав излучения определяет то или иное ощущение цвета. Таким образом, излучения, различные по спектральному составу, могут обладать одним и тем же цветом, т.е. каждому данному цвету может соответствовать бесчисленное множество кривых спектрального распределения лучистого потока. Поэтому возникла необходимость в специальной системе величин для оценки излучения по интенсивности и цветности вызываемого им светового ощущения. Построение такой системы величин является основной задачей колориметрии.

Для количественной характеристики светового действия излучения колориметрия пользуется фотометрической величиной *яркости*. Качественная же особенность излучения, оцениваемая по вызываемому им цветовому ощущению, называется *цветностью* излучения. Совместная количественная и качественная характеристика излучения по его действию на глаз человека называется *цветом*. Другими словами, под словом «цвет» в колориметрии понимают величину, функционально зависящую от яркости и цветности излучения. Цвет – это свойство видимого излучения, определяемое по вызываемому им у среднего человеческого глаза ощущению. Вопросы, связанные с построением системы оценки цвета, расчётом цвета и его измерением, составляют содержание колориметрии.

3. Параметры, определяющие цвет

В основе построения колориметрической системы лежит установленное опытным путём положение, что для определения любого цвета необходимо и достаточно величины трёх параметров. Это следует из того факта, что любой цвет может быть получен в результате смеси в определённом соотношении трёх взаимно-независимых цветов, т.е. таких цветов, ни один из которых не может быть получен в результате смешения двух остальных.

Обратимся к схеме трёхцветного колориметра, представленного на рис.П1 в виде гипсовой призмы.

Левая грань призмы освещается исследуемым излучением P , а правая – тремя излучениями P_1 , P_2 и P_3 известных и взаимно-независимых цветов (см. рис.П1_а). Обе грани (оба поля) колориметра одновременно рассматриваются

глазом. Изменяя величины потоков P_1 , P_2 и P_3 , можно добиться полного выравнивания яркости и цветности обоих полей колориметра. В этом случае свет C излучения P будем считать равным сумме цветов C_1 , C_2 и C_3 излучений P_1 , P_2 и P_3 , что можно записать в виде равенства

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (115)$$

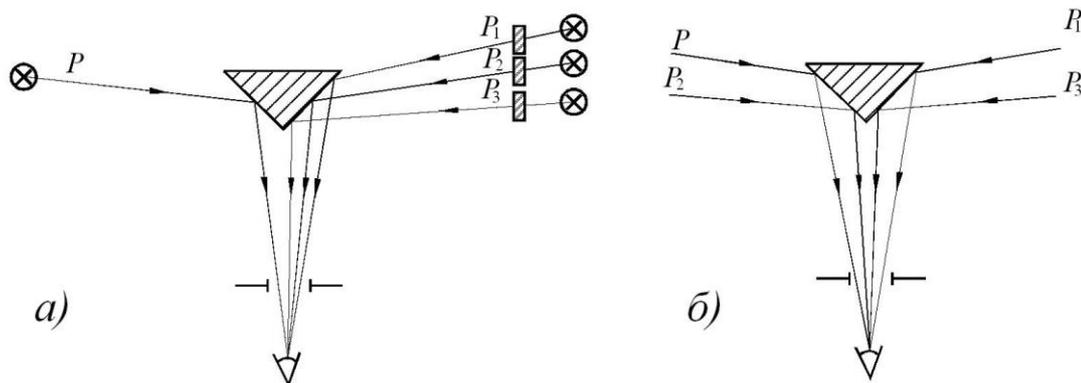


Рис.П1. Схема трёхцветного колориметра: а) все цветовые составляющие положительны; б) один из цветовых составляющих отрицателен

Величины лучистых потоков P_1 , P_2 и P_3 , цвет смеси которых равен исследуемому цвету, могут служить параметрами последнего. Эти потоки могут также рассматриваться как цветовые составляющие исследуемого цвета. Однако бывают случаи, когда никакая смесь потоков сравнения на одном поле колориметра не уравнивается по цвету с исследуемым потоком на другом поле сравнения. В этих случаях можно достичь равенства полей колориметра, если какой-либо один из потоков сравнения, например, P_2 , прибавить к исследуемому потоку P , как показано на рис.П1б. В этом случае имеем

$$C + C_2 = C_1 + C_3 \quad (116)$$

или

$$C = C_1 - C_2 + C_3 \quad (117)$$

Таким образом, понятию смешения цветов придаётся алгебраический характер. В таком алгебраическом смысле равенство цветов излучения P и смеси излучений P_1 , P_2 и P_3 может быть всегда достигнуто.

Равенство цветов, достигнутое при достаточно больших яркостях полей колориметра ($L \geq 25$ асб)³, окажется нарушенным при уменьшении величин яркостей в одинаковое число раз. Нарушение равенства цветов будет наблюдаться и в том случае, когда изображение полей колориметра на сетчатке глаза наблюдателя переместится из её центра к периферии. Следовательно, условия, при которых производится уравнивание цветов различных излучений,

³ Апостильб (асб) - единица яркости в системе СГС. Была предложена французским физиком Андре Блонделем. С 1978 года официально является устаревшей и сейчас не используется.

должны быть достаточно точно оговорены. Этими условиями являются:

– свето- и цветочувствительность глаза наблюдателя не должны заметно отличаться от чувствительности «стандартного глаза–наблюдателя для колориметрии», принятой международным соглашением на основе испытания большого числа наблюдателей с вполне нормальным цветовым зрением (даётся в виде соответствующих таблиц);

– яркость полей колориметра должна быть не ниже 25асб, чтобы зрение было чисто колбочковым;

– поля сравнения колориметра должны иметь угловой размер $1,5 \div 2^\circ$, чтобы зрение было фовеальным, т.е., опять-таки, чисто колбочковым, определяющим цветовые свойства глаза.

Другой способ определения цвета основывается на том положении, установленном опытным путём, что любой цвет может быть уравнен смесью белого света и какого-либо определённого монохроматического излучения. Однако белый свет, наблюдаемый в одних условиях, другому белому свету, наблюдаемому в других условиях, разный. Международным соглашением установлены четыре вида белого света.

За основной белый свет принимается свет E равноинтенсивного излучения, т.е. излучения, спектральная интенсивность которого постоянна в пределах видимого участка спектра. В качестве белого света, соответствующего условиям вечернего освещения, принято излучение с цветовой температурой 2854°K . Напомним, что цветовую температуру принимают равной температуре абсолютно чёрного тела, имеющего в рассматриваемом интервале длин волн то же относительное распределение интенсивности, что и данный источник. Стандартный источник «вечернего» белого света обозначается буквой A .

Условия дневного освещения воспроизводятся источником белого света B с цветовой температурой 4800°K и источником белого света C с цветовой температурой около 6500°K . Белый свет C весьма близок по спектральному составу к равноинтенсивному белому свету E . В последующем изложении под белым светом будем понимать белый свет E .

Белый свет может быть получен путём смешения в определённых соотношениях любых пар монохроматических излучений, связанных соотношением $(\lambda_2 - 565,52) \cdot (497,78 - \lambda_1) = 223,02$, где λ_1 и λ_2 выражены в нм. Такие пары излучений называются дополнительными. Дополнительной парой излучений, например, является пара: $\lambda_2 = 600$ нм и $\lambda_1 = 491$ нм. Излучения средней части спектра от 570 нм до 494 нм дополнительных монохроматических излучений не имеют. Отсюда следует, что смешение белого света с монохроматическим может быть сведено к смешению трёх взаимно-независимых монохроматических излучений: двух дополнительных, образующих при смешении белый свет, и добавляемого к белому монохроматического излучения. Таким образом, и в колориметрической

системе, основанной на смешении белого света с монохроматическим, число параметров, определяющих цвет, также равно трём. Важно заметить, что основное положение колориметрии о необходимости и достаточности трёх параметров для определения цвета находится в полном соответствии с современной теорией трёхкомпонентности цветового зрения.

4. Основные колориметрические системы

Рассмотрим три основные колориметрические системы.

4.1. Система параметров L, λ, p

Эта система параметров основана на получении любого цвета путём смешения белого света с монохроматическим излучением. Первый параметр L определяет яркость цвета. Вторым параметром λ , называемый цветовым тоном, определяет длину волны того монохроматического излучения, смесь которого с белым даёт требуемый цвет. Третий параметр: чистота цвета p – определяет долю монохроматического излучения в общей смеси его с белым светом. Чистотой цвета называется отношение яркости L_λ монохроматической составляющей к полной яркости L её смеси с белым светом:

$$p = \frac{L_\lambda}{L} = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_{бел}}, \quad (118)$$

где L_w – яркость белой составляющей смеси.

Параметры λ и p совместно определяют цветность цвета. Для монохроматических цветов $L_w = 0$, а $p = 1$. Для белого света $L_\lambda = 0$, а $p = 0$. Для всех остальных промежуточных цветов чистота цвета $0 < p < 1$. Чем меньше p , тем менее насыщенным является цвет. Так, например, излучение ртутной лампы низкого давления имеет цветовой тон $\lambda = 489 \text{ нм}$ и чистоту цвета $p = 0.28$, т.е. слабо насыщенный (белесоватый) голубовато-зелёный цвет. Такой цвет может быть получен путём смешения монохроматического излучения $\lambda = 489 \text{ нм}$ и белого света E при соотношении их яркостей 28:72.

Система параметров L, λ, p является весьма наглядной. Она позволяет получить непосредственное представление о цвете того или иного излучения. Вместе с тем эта система не пригодна для цветовых расчётов, т.е. для расчёта цвета излучения или смеси излучений заданных спектральных составов.

4.2. Трёхцветная система колориметрии R, G, B

Система параметров R, G, B основана на возможности получения любого цвета путём смешения каких-либо трёх взаимно-независимых цветов, принимаемых в качестве основных.

Международная комиссия по освещению (МКО) в 1931 году выбрала в качестве основных цветов монохроматические излучения R (красный цвет), G (зелёный цвет) и B (синий цвет) следующих длин волн:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_R &= 700 \text{ нм} \\ -\lambda_G &= 546,1 \text{ нм} \\ -\lambda_B &= 435,8 \text{ нм} \end{aligned} \right\}.$$

В результате экспериментальных исследований установлено, что для получения белого света необходима смесь излучений основных цветов, удовлетворяющих соотношению: $L_R:L_G:L_B=1:4,5907:0,0601$. Соответственно соотношение смешиваемых лучистых потоков должно быть равно

$$P_R:P_G:P_B = \frac{L_R}{K_R} : \frac{L_G}{K_G} : \frac{L_B}{K_B} = \frac{1}{0,00410} : \frac{4,5907}{0,98433} : \frac{0,0601}{0,01777} = 243,9 : 4,663 : 3,384.$$

Здесь K_λ – коэффициент относительной видности, $K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{\lambda_0}}$, $\lambda_0 = 555 \text{ нм}$; V_λ

– коэффициент видности: $V_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dP_\lambda}$, где $d\Phi_\lambda$ – световой поток (лм), вызывающий зрительное ощущение в глазу; dP_λ – монохроматический лучистый поток (вт), воздействующий на сетчатку глаза.

Приведённые величины лучистых потоков приняты в качестве единиц лучистых потоков основных цветов, обозначаемых буквами R , G , B . Таким образом, единица красного лучистого потока $R = 243,9$ вт, единица зелёного лучистого потока $G = 4,663$ вт, единица синего лучистого потока $B = 3,384$ вт. Величины R , G и B называют также единичными цветами.

Любой цвет C может быть представлен в виде:

$$C = r'R + g'G + b'B \quad (119)$$

Числа r' , g' и b' называются коэффициентами цвета, а величины $r'R$, $g'G$ и $b'B$ называются цветовыми составляющими цвета C . Очевидно, что для белого света E коэффициенты цвета равны между собой, т.е. $r'=g'=b'$.

Коэффициенты цвета характеризуют цвет полностью как по яркости, так и по цветности. Чаще, однако, требуется определять только цветность излучения. В этих случаях удобно пользоваться относительными коэффициентами цветности r , g и b :

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{r'}{r' + g' + b'} = \frac{r'}{m} \\ g &= \frac{g'}{r' + g' + b'} = \frac{g'}{m} \\ b &= \frac{b'}{r' + g' + b'} = \frac{b'}{m} \end{aligned} \right\}. \quad (120)$$

Сумма относительных коэффициентов цветности

$$r + g + b = \frac{r' + g' + b'}{m} = 1. \quad (121)$$

Величина $m = r' + g' + b'$ представляет собой алгебраическую сумму коэффициентов цвета и называется цветовым модулем.

Вполне очевидно, что при одновременном и пропорциональном изменении всех трёх коэффициентов r' , g' и b' коэффициенты цветности r , g и b остаются неизменными. Следовательно, коэффициенты цветности не зависят от величины яркости цвета, а определяют лишь его цветность. При этом, поскольку в соответствии с выражением (121) независимыми переменными являются только два коэффициента цветности, то цветность определяется двумя параметрами. Коэффициенты цветности позволяют определить единственный цвет в единичных основных цветах:

$$\frac{C}{m} = rR + gG + bB. \quad (122)$$

При решении большинства колориметрических задач приходится иметь дело с излучениями, спектральный состав которых задан соотношением спектральных мощностей в ваттах, а не в единичных цветах. Поэтому необходимо иметь значения коэффициентов цвета для всех спектральных излучений, рассчитанных на единицу мощности в 1 Вт. Такие коэффициенты цвета называются удельными и обозначаются через \bar{r} , \bar{g} и \bar{b} :

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} &= \frac{r'}{P} \\ \bar{g} &= \frac{g'}{P} \\ \bar{b} &= \frac{b'}{P} \end{aligned} \right\}. \quad (123)$$

Значения коэффициентов r , g , b и \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} для монохроматических излучений от 380 нм до 780 нм через каждые 5 нм утверждены МКО в 1931 году в виде соответствующих таблиц. Например:

$$\lambda = 500_{\text{нм}} \begin{cases} r = -1,1685; g = 1,3905; b = 0,7780 \\ \bar{r} = -0,07173; \bar{g} = 0,08536; \bar{b} = 0,04776 \end{cases}$$

$$\lambda = 700_{\text{нм}} \begin{cases} r = 1,0000; g = 0,0000; b = 0,0000 \\ \bar{r} = 0,00410; \bar{g} = 0,00000; \bar{b} = 0,00000 \end{cases}$$

4.3. Цветовой треугольник

Если нас интересует только цвет, образованный при смешении единичных цветов R , G , B , то результат смешения определяется формулой (122), причём сумма относительных коэффициентов цветности r , g и b в соответствии с

формулой (121) равна единице. Следовательно, только два из них независимы. Уравнение (122) в прямоугольной системе координат с осями R , G , B представляет собой уравнение плоскости – секущей трёхгранного угла RGB , как показано на рис.П2. При этом все единичные цвета определяются точками одной плоскости. Точка C на плоскости соответствует определённому цвету. Его же определяет вектор, проведённый через точку C из начала координат.

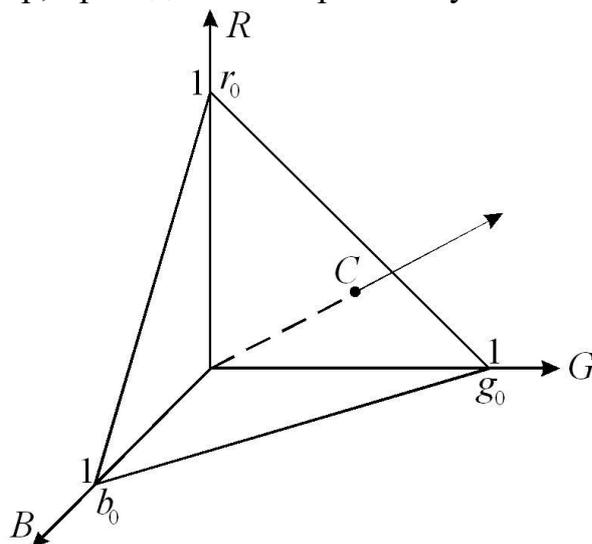


Рис.П2. Цветовой треугольник в прямоугольной системе координат

В общем случае цветовой треугольник имеет своими вершинами три точки: \tilde{R} , \tilde{G} и \tilde{B} , которые могут быть расположены на разных расстояниях от начала координат, как показано на рис.П3.

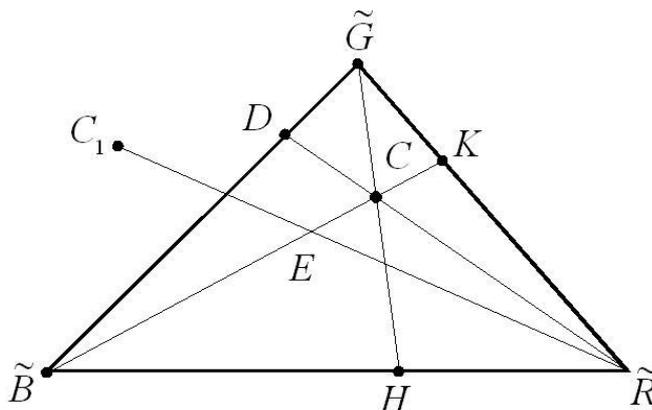


Рис. П3. Цветовой треугольник в общем случае

Точки, расположенные на сторонах треугольника $\tilde{R}\tilde{G}$, $\tilde{G}\tilde{B}$ и $\tilde{B}\tilde{R}$, обозначают цветности, получаемые путём смешения соответствующих пар основных цветов. Например, точка K обозначает смесь цветов \tilde{R} и \tilde{G} , причём отношение величин смешиваемых цветов, т.е. отношение коэффициентов

цветности $\frac{r}{g}$, равно отношению отрезков $\frac{\tilde{G}K}{\tilde{R}K}$. Другими словами, точка K делит отрезок $\tilde{R}\tilde{G}$ на части, обратно пропорциональные коэффициентам цветности смешиваемых цветов. Это правило деления отрезков называется правилом центра тяжести.

Любая точка C , лежащая в плоскости цветового треугольника, представляет собой цветность, определяемую на основании правила центра тяжести отношениями отрезков:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{CD}{\tilde{R}D} = r \\ \frac{CH}{\tilde{G}H} = g \\ \frac{CK}{\tilde{B}K} = b \end{array} \right\}. \quad (124)$$

Точки, расположенные внутри треугольника, соответствуют цветам, когда все три коэффициента цветности положительные. Точки же, расположенные вне треугольника, соответствуют цветам, определяемым отрицательными величинами коэффициентов.

Пусть в точке \tilde{R} плоскости коэффициенты $r=1, g=0, b=0$. Эта точка соответствует цвету R без примесей цветов G и B . Аналогично точка $\tilde{G}(r=0, g=1, b=0)$ соответствует цвету G без примесей цветов R и B и точка $\tilde{B}(r=0, g=0, b=1)$ соответствует цвету B без примесей цветов R и G . В этом случае точки $\tilde{R}, \tilde{G}, \tilde{B}$ определяют вершины равностороннего треугольника, представленного на рис.П4. Рассмотрим произвольную точку C внутри треугольника $\tilde{R}\tilde{G}\tilde{B}$. Она определяется коэффициентами r, g, b . Опустим перпендикуляры из этой точки на стороны треугольника. В соответствии с рис.П4 длина перпендикуляра на сторону $\tilde{R}\tilde{B}$ равна g , на сторону $\tilde{B}\tilde{G} - r$, на сторону $\tilde{R}\tilde{G} - b$.

В соответствии с одной из теорем геометрии имеем: алгебраическая сумма перпендикуляров, опущенных из любой точки, находящейся внутри равностороннего треугольника, на его стороны, равна его высоте. Приняв высоту треугольника $\tilde{R}\tilde{G}\tilde{B}$ равной единице, получаем, что в этом случае сумма длин перпендикуляров, равных сумме коэффициентов r, g и b , удовлетворяет условию (121). Таким образом, цвет смеси однозначно определяется величиной перпендикуляров на все три стороны треугольника. Именно поэтому он называется цветовым треугольником. Точка в центре такого треугольника ($r=g=b=1/3$) соответствует белому цвету.

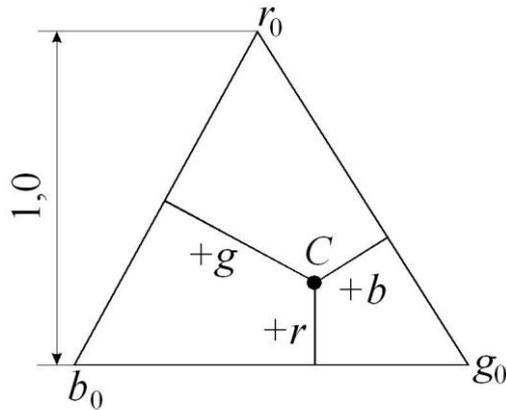


Рис. П4. Расположение точки C внутри цветового треугольника.

Все точки C внутри цветового треугольника соответствуют положительным значениям r, g, b . Однако, как следует из выражения (117), эти значения коэффициентов бывают и отрицательными. При этом точки C расположены вне цветового треугольника. Пример построения нормалей в этом случае представлен на рис.П5.

И в этом случае алгебраическая сумма длин перпендикуляров на стороны треугольника $\tilde{R}\tilde{G}\tilde{B}$ равна единице. Отсюда следует, что точки плоскости вне цветового треугольника соответствуют цветам, которые не могут быть получены смешением положительных единичных цветов. Эти точки, например, при отрицательных значениях коэффициента b определяются уравнением:

$$C + bB = rR + gG. \quad (125)$$

Цвет C – реально существующий цвет, но суммированием цветов R, G и B его не получить.

При некоторых значениях цветовых коэффициентов r', g' и b' правая часть уравнения (119) определяет чистые спектральные цвета $C'(\lambda)$:

$$C'(\lambda) = r'(\lambda)R + g'(\lambda)G + b'(\lambda)B. \quad (126)$$

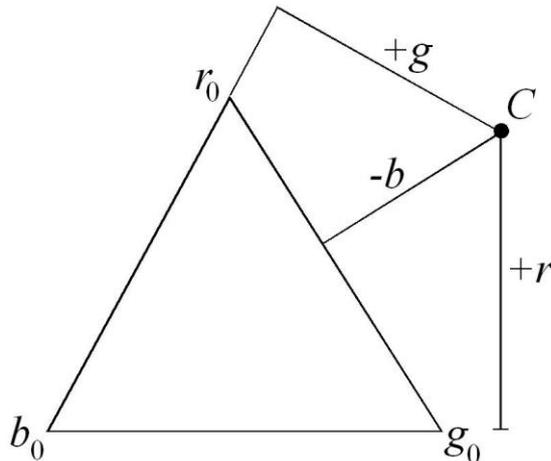


Рис.П5. Расположение точки C вне цветового треугольника

Учитывая соотношения (120), это уравнение можно представить в виде:

$$C(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B. \quad (127)$$

На рис.П6 представлено геометрическое место точек, соответствующих всем спектральным цветам для $\lambda=380\div 700$ нм. Значения коэффициентов $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ и $b(\lambda)$ взяты из таблицы, утверждённой МКО. На линии, соединяющей спектральные цвета, указаны значения длин волн в нм. На линии, соединяющей точку красного цвета R и фиолетовый цвет ($\lambda=380$ нм), лежат все пурпурные цвета.

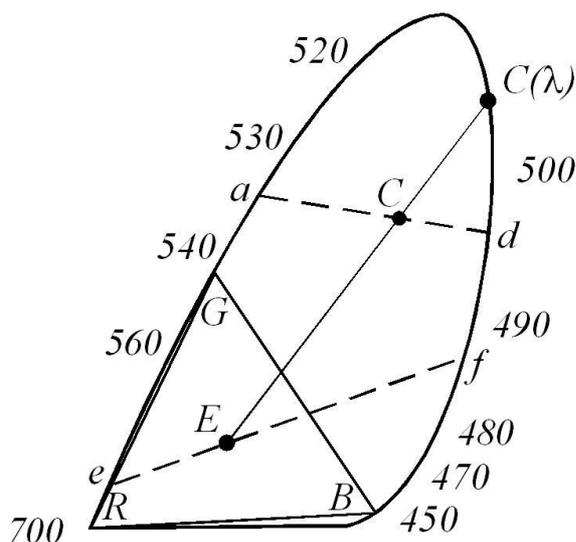


Рис.П6. Геометрическое место точек, соответствующих всем спектральным цветам для $\lambda=380\div 700$ нм

Линия, представляющая собой геометрическое место точек спектральных и чистых пурпурных цветов, называется линией спектральных цветов. Эта линия проходит через вершины цветового треугольника, охватывает всю его площадь и везде обращена выпуклостью наружу. Это означает, что любой реальный цвет, от спектрального до белого, изображается точкой, лежащей внутри площади, охватываемой линией спектральных цветов. Эта площадь получила название поля реальных цветов.

На рис.П6 проведена прямая, соединяющая белый цвет E с некоторым спектрально чистым цветом $C(\lambda)$. На этой прямой расположены все цвета, которые могут быть получены смешением белого цвета с цветом $C(\lambda)$. Они имеют одинаковый цветовой тон (λ), но по-разному разбавлены белым цветом, т.е. отличаются друг от друга чистотой цвета. В точке E чистота цвета всех цветовых тонов, естественно, равна нулю. На линии спектральных цветов чистота цвета всегда равна 100%.

Итак, любой не спектрально чистый цвет может быть получен смешением бесчисленного множества пар цветов. Проведём через точку, определяющую какой-то цвет C , любую прямую линию, которая пересекает линию спектральных цветов в точках a и d , как показано на рис.П6. Любые два цвета

на этой прямой, расположенные по разные стороны от прямой EC , при смещении в определённых количествах дадут цвет C . То же самое справедливо не только для прямой ad , но и для любых других, проведённых через точку C [31].

Если прямая проведена через центр цветового треугольника E (прямая ef на рис.П6), то суммирование любых двух цветов по разные стороны от точки E может дать белый цвет. Важно только подобрать соответствующее соотношение интенсивностей таких цветов. Эти цвета называются дополнительными. Число пар, дополнительных друг к другу, бесконечно велико.

При всём бесконечном многообразии вариантов суммирования цветов цветовой треугольник несёт вполне определённые и важные сведения. Пусть, например, смешиваются спектрально чистые цвета C_a и C_d . В результате будут получены цвета, лежащие на прямой ad . Все они не принадлежат к спектрально чистым цветам. Отсюда следует, что при смешивании двух спектрально чистых цветов получить другой спектрально чистый цвет невозможно.

Колориметрическая система R,G,B позволяет решать все задачи колориметрии:

- определение коэффициентов цветности излучения по заданному спектральному составу, а также определение цветового тона λ и чистоты цвета p по вычисленным значениям r , g и b ;

- определение r , g и b сложного цвета по известным коэффициентам смешиваемых цветов;

- определение цвета отражающих или пропускающих поверхностей, освещаемых известным излучением, и другие задачи.

Вместе с тем система R,G,B обладает одним существенным недостатком – в ней содержатся отрицательные цветовые коэффициенты, вследствие чего конкретные численные расчёты значительно усложняются. По этой причине в 1931 году Международная комиссия по освещению утвердила новую систему определения цвета.

4.4. Международная колориметрическая система X,Y,Z

В основу построения системы X,Y,Z , рекомендованной VIII сессией МКО в качестве стандартной 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: $X \geq 0$, $Y \geq 0$, $Z \geq 0$. Таким образом, основные цвета в новой системе параметров, соответствующие вершинам треугольника, оказываются вне поля реальных цветов и не являются действительными, реально существующими цветами. Эти основные цвета

имеют лишь чисто расчётный смысл. Суть дела заключается в том смешении действительных цветов, которое описывается уравнениями системы X, Y, Z .

2. Количественная характеристика цвета должна полностью определяться одним его компонентом. Только одна новая единица Y должна определять яркость, т.е. L_Y должна быть равна единице яркости. Единицы же X и Z должны быть по яркости равны нулю, т.е. $L_X = L_Z = 0$.

3. Координаты белого цвета равноэнергетического излучения должны быть равными; следовательно, точка цветности этого излучения должна лежать в центре тяжести цветового треугольника (как в системе R, G, B).

Уравнения связи цветов R, G, B с цветами X, Y, Z линейны. Были получены следующие выражения для новых единичных основных цветов, удовлетворяющих перечисленным требованиям:

$$\left. \begin{aligned} X &= 2,36461R - 0,51515G + 0,00520B \\ Y &= -0,89654R + 1,42640G - 0,01441B \\ Z &= -0,46807R + 0,08875G + 1,00921B \end{aligned} \right\}. \quad (128)$$

Легко убедиться, что в соответствии с системой уравнений (128) имеем

$$X + Y + Z = R + G + B. \quad (129)$$

Следовательно, и в новой системе параметров точка белого цвета находится в центре нового цветового треугольника.

Учитывая, что $L_R:L_G:L_B = 1:4,5907:0,0601$, в соответствии с вторым уравнением системы (128) имеем:

$$L_Y = -0,89654 \cdot 1 + 1,42640 \cdot 4,5907 - 0,01441 \cdot 0,0601 = 5,65077.$$

Но в новой системе параметров $L_Y=1$. При этом яркость единичных цветов определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L_X &= 0,41846R - 0,09116G + 0,00092B \\ L_Y &= -0,15866R + 0,25243G - 0,00255B \\ L_Z &= -0,08283R + 0,01571G + 0,17860B \end{aligned} \right\} \quad (130)$$

При этом

$$L_X = 0,41846 \cdot 1 - 0,09116 \cdot 4,5907 + 0,00092 \cdot 0,0601 = 0;$$

$$L_Y = -0,15866 \cdot 1 + 0,25243 \cdot 4,5907 - 0,00255 \cdot 0,0601 = 1;$$

$$L_Z = -0,08283 \cdot 1 + 0,01571 \cdot 4,5907 + 0,17860 \cdot 0,0601 = 0.$$

В системе X, Y, Z любой цвет определяется уравнением

$$C = x'X + y'Y + z'Z,$$

где x' , y' и z' определяют величины единичных цветов X, Y и Z , дающих в смеси цвет C . Числа x' , y' и z' называются коэффициентами цвета C . При этом коэффициенты цветности определяются как

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x'}{m} \\ y &= \frac{y'}{m} \\ z &= \frac{z'}{m} \end{aligned} \right\}, \quad (131)$$

где $m = x' + y' + z'$ – цветовой модуль. Коэффициенты x , y и z определяют цветность. Поскольку

$$x + y + z = 1, \quad (132)$$

то независимыми переменными являются только два коэффициента цветности (обычно x и y).

В системе X, Y, Z яркость цвета равна коэффициенту y' , т.е.

$$L = y'. \quad (133)$$

Следовательно, $y = \frac{y'}{m} = \frac{L}{m}$. Отсюда находим, что

$$m = \frac{L}{y}. \quad (134)$$

Соотношение (134) позволяет легко определить коэффициенты цвета по коэффициентам цветности и яркости:

$$\left. \begin{aligned} x' &= xm = \frac{x}{y} L \\ y' &= L \\ z' &= zm = \frac{z}{y} L \end{aligned} \right\}. \quad (135)$$

Можно считать, что соотношения (135) справедливы и для удельных коэффициентов цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} спектральных излучений, т.е. коэффициентов спектральных излучений одинаковой мощности в 1 вт. Так как при $P_\lambda = const. = 1$ вт яркость L_λ пропорциональна относительной видимости K_λ , то при соответствующем выборе единицы яркости можно принять $L_\lambda = K_\lambda$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_\lambda &= \frac{x'_\lambda}{P_\lambda} = \frac{x_\lambda}{y_\lambda} K_\lambda \\ \bar{y}_\lambda &= \frac{y'_\lambda}{P_\lambda} = K_\lambda \\ \bar{z}_\lambda &= \frac{z'_\lambda}{P_\lambda} = \frac{z_\lambda}{y_\lambda} K_\lambda \end{aligned} \right\}. \quad (136)$$

Таким образом, функция \bar{y}_λ совпадает с кривой относительной видимости

K_λ , а для нахождения \bar{x}_λ и \bar{z}_λ достаточно знать значения коэффициентов цветности x_λ , y_λ и z_λ .

Значения коэффициентов цветности и удельных коэффициентов цвета спектральных излучений в системе X,Y,Z для «стандартного наблюдателя МКО» приведены в табл.П1.

На рис.П7 представлен цветовой график X,Y,Z . Основные цвета X,Y и Z располагаются в вершинах прямоугольного треугольника, причём в вершине O прямого угла находится цвет Z . Такой график обладает тем свойством, что обычные координаты x и y прямоугольной системы координат любой точки C треугольника совпадают с коэффициентами цветности цвета, определяемого точкой C . Действительно, по аналогии с соотношениями (124) имеем: $\frac{CP}{XP} = x$

и $\frac{CS}{YS} = y$.

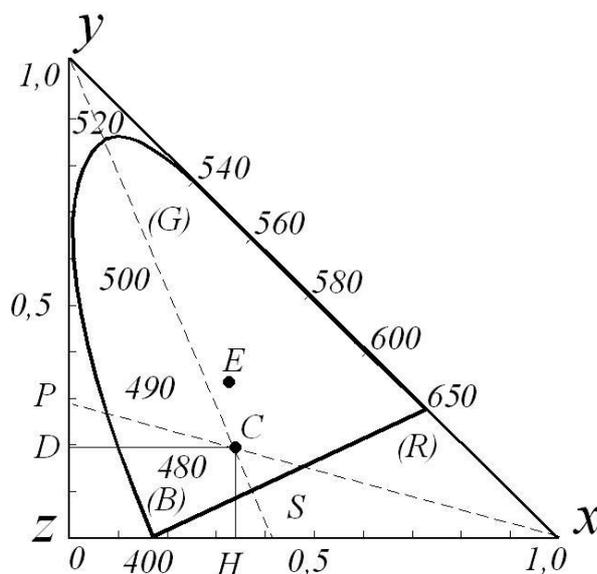


Рис.П7. Цветовой треугольник и график системы X,Y,Z

С другой стороны, X,Y и Z располагаются в вершинах прямоугольного треугольника, причём в вершине O прямого угла находится цвет Z . Такой график обладает тем свойством, что обычные координаты x и y прямоугольной системы координат любой точки C треугольника совпадают с коэффициентами цветности цвета, определяемого точкой C . Действительно, по аналогии с

соотношениями (124) имеем: $\frac{CP}{XP} = x$ и $\frac{CS}{YS} = y$. С другой стороны основные

цвета X,Y и Z располагаются в вершинах прямоугольного треугольника, причём в вершине O прямого угла находится цвет Z . Такой график обладает тем свойством, что обычные координаты x и y прямоугольной системы координат любой точки C треугольника совпадают с коэффициентами цветности цвета, определяемого точкой C .

Табл. III. Коэффициенты цветности и удельные коэффициенты цвета спектральных излучений в системе X, Y, Z

Коэффициенты цветности			λ мкм	Удельные коэффициенты цвета		
x	y	z		x	y	z
0,1741	0,0050	0,8209	380	0,0014	0,0000	0,0065
0,1738	0,0049	0,8213	390	0,0042	0,0001	0,0201
0,1733	0,0048	0,8219	400	0,0143	0,0004	0,0679
0,1726	0,0048	0,8226	410	0,0435	0,0012	0,2074
0,1714	0,0051	0,8235	420	0,1344	0,0040	0,6456
0,1689	0,0069	0,8542	430	0,2839	0,0116	0,3856
0,1644	0,0109	0,8247	440	0,3483	0,0230	1,7471
0,1566	0,0177	0,8257	450	0,3362	0,0380	1,7721
0,1440	0,0297	0,8263	460	0,2908	0,0600	1,6692
0,1241	0,0578	0,8181	470	0,1954	0,0910	1,2876
0,0913	0,1327	0,7760	480	0,0956	0,1390	0,8130
0,0454	0,2950	0,6596	490	0,0320	0,2080	0,4652
0,0082	0,5384	0,4534	500	0,0049	0,3230	0,2720
0,0139	0,7502	0,2359	510	0,0093	0,5030	0,1582
0,0743	0,8338	0,0919	520	0,0633	0,7100	0,0782
0,1547	0,8059	0,0394	530	0,1655	0,8620	0,0422
0,2296	0,7543	0,0161	540	0,2904	0,9540	0,0203
0,3016	0,6923	0,0061	550	0,4334	0,9950	0,0087
0,3731	0,6245	0,0024	560	0,5945	0,9950	0,0039
0,4441	0,5547	0,0012	570	0,7621	0,9520	0,0021
0,5125	0,4866	0,0009	580	0,9163	0,8700	0,0017
0,5752	0,4242	0,0006	590	1,0263	0,7570	0,0011
0,6270	0,3725	0,0005	600	1,0622	0,6310	0,0008
0,6658	0,3340	0,0002	610	1,0026	0,5030	0,0003
0,6915	0,3083	0,0002	620	0,8544	0,3810	0,0002
0,7079	0,2920	0,0001	630	0,6424	0,2650	0,0000
0,7190	0,2809	0,0001	640	0,4479	0,1750	0,0000
0,7260	0,2740	0,0000	650	0,2835	0,1070	0,0000
0,7300	0,2700	0,0000	660	0,1649	0,0610	0,0000
0,7320	0,2680	0,0000	670	0,0874	0,0320	0,0000
0,7334	0,2666	0,0000	680	0,0468	0,0170	0,0000
0,7344	0,2656	0,0000	690	0,0227	0,0082	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	700	0,0014	0,0041	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	710	0,0058	0,0021	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	720	0,0029	0,0010	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	730	0,0014	0,0005	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	740	0,0007	0,0003	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	750	0,0003	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	760	0,0002	0,0001	0,0000

Действительно, по аналогии с соотношениями (124) имеем: $\frac{CP}{XP} = x$ и $\frac{CS}{YS} = y$. С другой стороны, $\frac{CP}{XP} = \frac{CD}{XO}$ и $\frac{CS}{YS} = \frac{CH}{YO}$. Приняв $XO = YO = 1$, получаем $CD = x$ и $CH = y$. Цветность белого цвета E определяется точкой, координаты которой $x = y = z = 1/3$, т.е. точка E лежит в центре треугольника. Линия спектральных цветов полностью лежит внутри треугольника XYZ .

Учитывая приведённые равенства координат точек треугольника XYZ коэффициентам цветности соответствующих цветов, обычно сам треугольник не показывают, а строят цветовой график XYZ в прямоугольной системе координат xoy , как показано на рис.П8.

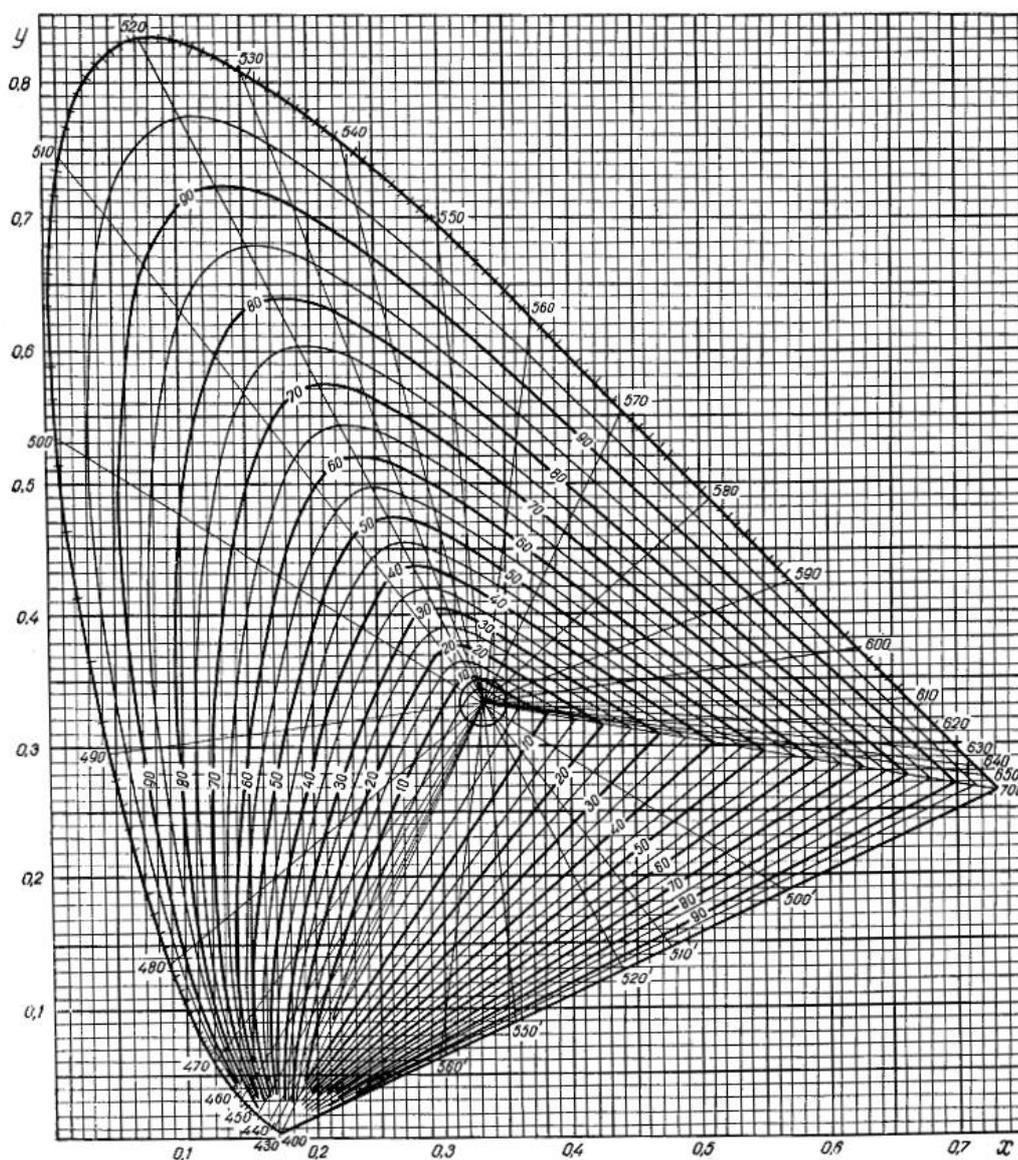


Рис.П8. Цветовой график системы X, Y, Z с сеткой кривых равной чистоты цвета

На график наносят сетки прямых и кривых линий для определения по известным x и y цветового тона λ и чистоты цвета p . Эти кривые строят следующим образом. Точку белого цвета E соединяют прямыми линиями с точками кривой спектральных цветов через равные интервалы длин волн (как правило, через 10 нм). Все точки, лежащие на некоторой прямой $E\lambda$, имеют цветовой тон λ .

Кривые линии представляют собой линии равной чистоты цвета. Их проводят через равные интервалы чистоты цвета (обычно $\Delta p=0,05$).

В области пурпурных цветов (треугольник с вершинами в точке E и в точках кривой спектральных цветов $\lambda=400$ нм и $\lambda=700$ нм) цветовой тон определяется длиной волны λ' дополнительного излучения. Длины волн λ' указаны на прямой линии $\lambda=400\div 700$ нм чистых пурпурных цветностей.

4.5. Примеры цветовых расчётов

В основе цветовых расчётов лежит закон аддитивности коэффициентов цветов при смешении цветов. Этот закон является следствием опытом установленного факта, согласно которому цвет смеси нескольких излучений зависит только от цветов последних и не зависит от их спектральных составов. Другими словами, если смешивать излучения различных спектральных составов, но некоторых постоянных цветов, то цвет смеси будет одинаковым. Пусть, например, смешиваются два цвета:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= x'_1 X + y'_1 Y + z'_1 Z \\ C_2 &= x'_2 X + y'_2 Y + z'_2 Z \end{aligned} \right\} \quad (137)$$

В равенствах (137) слева представлены два цвета, заданные произвольными излучениями, а справа – те же два цвета, воспроизведённые смесью трёх основных цветов. Изложенные выше соображения позволяют произвести алгебраическое суммирование правых и левых частей уравнений (137), не заботясь о различии их спектральных составов:

$$C = C_1 + C_2 = x'X + y'Y + z'Z, \quad (138)$$

где $x' = x'_1 + x'_2$; $y' = y'_1 + y'_2$; $z' = z'_1 + z'_2$.

Таким образом, коэффициенты цвета смеси равны суммам коэффициентов смешиваемых цветов. Это и есть закон аддитивности коэффициентов цвета.

Рассмотрим некоторые характерные примеры цветовых расчётов.

Цвет монохроматического излучения. В системе L, λ, p цвет монохроматического излучения P_λ полностью определяется яркостью L_λ , пропорциональной $P_\lambda K_\lambda$, и длиной волны λ . Чистота цвета $p=1$. В колориметрической же системе X, Y, Z коэффициенты цвета $x'_\lambda y'_\lambda z'_\lambda$ монохроматического излучения легко определяются при помощи таблицы удельных коэффициентов $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$: $x'_\lambda = \bar{x}_\lambda P_\lambda$, $y'_\lambda = \bar{y}_\lambda P_\lambda$, $z'_\lambda = \bar{z}_\lambda P_\lambda$.

Пусть, например, $P_{\lambda=500}=10$ вт. Из табл.П1 для $\lambda=500$ нм находим: $\bar{x}=0,0049$,

$\bar{y}=0,3230$ и $\bar{z}=0,2720$. Следовательно, $x'=0,049$, $y'=3,230$ и $z'=2,720$. При этом цветовой модуль $m=x'+y'+z'=5,999$.

Цвет излучения с линейчатым спектром. Лучистый поток с линейчатым спектром представим в виде суммы потоков монохроматических излучений:

$$P = \sum_{i=1}^{i=n} P_{\lambda i} .$$

Коэффициенты цвета каждого монохроматического излучения

находим с помощью таблицы удельных коэффициентов:
 $x'_{\lambda i} = \bar{x}_{\lambda i} P_{\lambda i}$, $y'_{\lambda i} = \bar{y}_{\lambda i} P_{\lambda i}$, $z'_{\lambda i} = \bar{z}_{\lambda i} P_{\lambda i}$.

В соответствии с законом аддитивности коэффициентов смешиваемых цветов коэффициенты цвета сложного излучения равны:

$$x' = \sum_{i=1}^{i=n} x'_{\lambda i} = \sum_{i=1}^{i=n} \bar{x}_{\lambda i} P_{\lambda i}, \quad y' = \sum_{i=1}^{i=n} y'_{\lambda i} = \sum_{i=1}^{i=n} \bar{y}_{\lambda i} P_{\lambda i}, \quad z' = \sum_{i=1}^{i=n} z'_{\lambda i} = \sum_{i=1}^{i=n} \bar{z}_{\lambda i} P_{\lambda i} .$$

Цветовой модуль $m=x'+y'+z'$. Коэффициенты цветности определяются

$$x = \frac{x'}{m}; \quad y = \frac{y'}{m}; \quad z = \frac{z'}{m} .$$

Пусть требуется рассчитать цвет и цветность излучения ртутной лампы по данному спектральному составу. Результаты расчёта представим в табл.П2:

Таблица П2. Пример расчета цвета и цветности излучения ртутной лампы по данному спектральному составу

λ (мкм)	P_{λ} (Вт)	Удельные коэффициенты цвета			Коэффициенты цвета		
		\bar{x}_{λ}	\bar{y}_{λ}	\bar{z}_{λ}	$x'_{\lambda} = \bar{x}_{\lambda} P_{\lambda}$	$y'_{\lambda} = \bar{y}_{\lambda} P_{\lambda}$	$z'_{\lambda} = \bar{z}_{\lambda} P_{\lambda}$
405/08	5,4	0,023	0,001	0,110	0,124	0,005	0,594
436	8,2	0,334	0,018	1,650	2,740	0,146	13,510
491	0,1	0,036	0,218	0,443	0,004	0,022	0,000
546	10,2	0,377	0,984	0,012	3,844	10,037	0,122
577/79	8,3	0,890	0,890	0,002	7,390	7,390	0,017
691	0,1	0,021	0,007	0,000	0,002	0,002	0,000
					$x' = \sum x'_{\lambda} = 14,104$	$y' = \sum y'_{\lambda} = 17,601$	$z' = \sum z'_{\lambda} = 14,243$

Коэффициенты $x'y'z'$ дают полную характеристику цвета. Коэффициент y' пропорционален яркости, а, следовательно, и световому потоку лампы. Так как $\bar{y}_{\lambda} = K_{\lambda}$, то $y' = \sum \bar{y}_{\lambda} P_{\lambda} = \sum K_{\lambda} P_{\lambda}$ определяет непосредственно световой поток в так называемых световых ваттах. Следовательно, световой поток $\Phi = 683 \cdot y' = 683 \cdot 17,601 = 12021,5$ лм.

Определим отдельно цветность. Цветовой модуль $m=45,948$. При этом коэффициенты цветности

$$x = \frac{x'}{m} = \frac{14,104}{45,948} = 0,307; y = \frac{y'}{m} = \frac{17,601}{45,948} = 0,383; z = \frac{z'}{m} = \frac{14,243}{45,948} = 0,310.$$

Легко убедиться, что $x+y+z=1$, что и следовало ожидать.

В соответствии с рис.П8 точка с координатами $x=0,307$, $y=0,383$ на цветовом графике определяет чистоту цвета $p=0,23$ и цветовой тон $\lambda=520$ нм.

Цвет сложного излучения со сплошным спектром. Лучистый поток сложного излучения со сплошным спектром определяется выражением:

$$P = \int \phi_{\lambda} d\lambda,$$

где $\phi_{\lambda} = \frac{dP_{\lambda}}{d\lambda}$ – спектральная интенсивность лучистого потока.

Для элементарного потока dP_{λ} коэффициенты цвета равны $\bar{x}_{\lambda} dP_{\lambda}$, $\bar{y}_{\lambda} dP_{\lambda}$, $\bar{z}_{\lambda} dP_{\lambda}$. Коэффициенты цвета всего потока определяются интегралами:

$$x' = \int \bar{x}_{\lambda} dP_{\lambda} = \int \bar{x}_{\lambda} \phi_{\lambda} d\lambda;$$

$$y' = \int \bar{y}_{\lambda} dP_{\lambda} = \int \bar{y}_{\lambda} \phi_{\lambda} d\lambda;$$

$$z' = \int \bar{z}_{\lambda} dP_{\lambda} = \int \bar{z}_{\lambda} \phi_{\lambda} d\lambda.$$

Учитывая, что аналитически выразить функции ϕ_{λ} , \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} трудно, на практике интегрирование приходится заменять суммированием:

$$x' = \Delta\lambda \sum \bar{x}_{\lambda} \phi_{\lambda}; y' = \Delta\lambda \sum \bar{y}_{\lambda} \phi_{\lambda}; z' = \Delta\lambda \sum \bar{z}_{\lambda} \phi_{\lambda}.$$

Интервал $\Delta\lambda$ можно выбрать тем больше, чем медленнее изменяется ϕ_{λ} . Обычно $\Delta\lambda$ принимают равным 10, 20 и даже 30 нм. Последовательность расчёта цветности такая же, как и рассмотренная в предыдущем разделе.

Пусть требуется выполнить расчёт цвета излучения вольфрамовой лампы накаливания мощностью 100 вт по данному спектральному распределению энергии. Расчёт представим в Табл.П3 ($\Delta\lambda=20$ нм):

Световой поток $\Phi=683y'=683 \cdot 7,58=5177,1$ лм. Цветовой модуль $m=8,22+7,58+2,75=18,55$. При этом коэффициенты цветности

$$x = \frac{8,22}{18,55} = 0,443; y = \frac{7,58}{18,55} = 0,409; z = \frac{2,75}{18,55} = 0,148.$$

Для контроля точности вычислений находим, что $x+y+z=0,443+0,409+0,148=1$. По цветовому графику на рис.П8 находим, что цветовой тон $\lambda=583$ нм, а чистота цвета $p=0,64$.

Таблица ПЗ. Пример расчета цвета излучения вольфрамовой лампы накаливания по данному спектральному распределению энергии.

λ (мкм)	Φ_λ (Вт/см ² ·мкм)	$\Phi_\lambda \bar{x}_\lambda$	$\Phi_\lambda \bar{y}_\lambda$	$\Phi_\lambda \bar{z}_\lambda$
380	6,0	0,008	0,000	0,04
400	9,8	0,14	0,004	0,66
420	14,8	1,99	0,059	9,55
440	20,7	7,22	0,48	36,2
460	27,0	7,85	1,62	45,0
480	35,0	3,35	4,86	28,4
500	43,5	0,21	14,05	11,8
520	52,5	3,32	37,3	1,1
540	61,5	17,9	58,6	1,25
560	70,7	42,0	70,4	0,28
580	79,9	73,2	69,5	0,14
600	89,0	94,6	56,2	0,07
620	98,2	84,0	37,4	0,00
640	107,3	48,1	18,8	0,00
660	116,2	19,2	7,1	0,00
680	123,9	5,8	2,1	0,00
700	131,0	1,5	0,54	0,00
720	137,5	0,4	0,14	0,00
740	144,2	0,1	0,04	0,00
760	150,0	0,03	0,01	0,00
		$x' = \Delta\lambda \cdot \sum x_\lambda \Phi_\lambda =$ $= 0,02 \cdot 410,92 = 8,22$	$y' = \Delta\lambda \cdot \sum y_\lambda \Phi_\lambda =$ $= 0,02 \cdot 379,2 = 7,58$	$z' = \Delta\lambda \cdot \sum z_\lambda \Phi_\lambda =$ $= 0,02 \cdot 137,51 = 2,75$

Цвет смеси нескольких сложных излучений. Предположим, что известны коэффициенты цветов двух (или нескольких) сложных излучений: x_1', y_1', z_1' и x_2', y_2', z_2' . Требуется определить цвет их смеси.

На основании закона аддитивности коэффициентов цветов имеем для цвета смеси имеем: $x' = x_1' + x_2', y' = y_1' + y_2', z' = z_1' + z_2'$. При этом коэффициенты цветности смеси равны:

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'} = \frac{x'}{m}; \quad y = \frac{y'}{m}; \quad z = \frac{z'}{m}.$$

Пусть, например, требуется определить цвет смеси излучения ртутной лампы и излучения лампы накаливания, спектральный состав и световой поток которых приведены в предыдущих примерах расчёта. При этом имеем:

$$\begin{aligned} x_1' &= 14,104; & y_1' &= 17,601; & z_1' &= 14,243; \\ x_2' &= 8,22; & y_2' &= 7,58; & z_2' &= 2,75; \\ x' &= 22,324; & y' &= 25,181; & z' &= 16,993. \end{aligned}$$

Суммарный световой поток обеих ламп $\Phi=683y'=17198,6$ лм. Цветовой модуль $m=64,498$. При этом коэффициенты цветности $x=0,346$; $y=0,390$; $z=0,264$. Полученные значения коэффициентов удовлетворяют условию: $x+y+z=0,346+0,390+0,264=1$. Применяв цветовой график на рис.П8, находим, что цветовой тон $\lambda=563$ нм, а чистота цвета $p=0,33$.

Цвет поверхности, освещаемой известным излучением. Если освещаемая поверхность серого цвета, т.е. отражает (или пропускает) излучение всех длин волн одинаково, то её цвет будет отличаться от цвета падающего излучения только меньшей яркостью. В большинстве же случаев реальные поверхности отражают падающее на них излучение селективно. Кроме того, яркость и цветность множества поверхностей различны в разных направлениях.

Пусть на отражающую поверхность падает лучистый поток $P = \int \varphi_\lambda d\lambda$.

Коэффициент отражения поверхности ρ_λ является некоторой функцией длины волны. Пусть требуется определить цвет освещаемой поверхности.

Отражённый поверхностью лучистый поток определяется выражением:

$$P_p = \int \varphi_\lambda \rho_\lambda d\lambda.$$

Коэффициенты цвета этого потока определяются так же, как и в случае излучения самого потока, с той лишь разницей, что учитывается коэффициент отражения поверхности ρ_λ :

$$x' = \int \bar{x}_\lambda \varphi_\lambda \rho_\lambda d\lambda \quad \text{или} \quad x' = \Delta\lambda \sum \bar{x}_\lambda \rho_\lambda \varphi_\lambda ;$$

$$y' = \int \bar{y}_\lambda \varphi_\lambda \rho_\lambda d\lambda \quad \text{или} \quad y' = \Delta\lambda \sum \bar{y}_\lambda \rho_\lambda \varphi_\lambda ;$$

$$z' = \int \bar{z}_\lambda \varphi_\lambda \rho_\lambda d\lambda \quad \text{или} \quad z' = \Delta\lambda \sum \bar{z}_\lambda \rho_\lambda \varphi_\lambda .$$

При линейчатом спектре излучения $\varphi_\lambda \Delta\lambda = P_\lambda$. После этого определяются цветовой модуль, коэффициенты цветности, а также цветовой тон и чистота цвета.

Пусть, например, требуется определить цвет оранжевой поверхности, освещаемой ртутной лампой. Значения ρ_λ поверхности и последовательность расчёта представлены в Табл.П4.

Интегральный коэффициент отражения $\rho = \frac{y'_p}{y'} = 0,1586$; цветовой модуль

$m = x'_p + y'_p + z'_p = 35,386$; при этом коэффициенты цветности

$$x_p = \frac{14,371}{35,386} = 0,406; \quad y_p = \frac{15,860}{35,386} = 0,448; \quad z_p = \frac{5,155}{35,386} = 0,146 .$$

Таблица П4. Пример расчета цвета оранжевой поверхности, освещаемой ртутной лампой.

λ (мкм)	ρ_λ	$\bar{x}_\lambda P_\lambda$	$\bar{y}_\lambda P_\lambda$	$\bar{z}_\lambda P_\lambda$	$\bar{x}_\lambda P_\lambda \rho_\lambda$	$\bar{y}_\lambda P_\lambda \rho_\lambda$	$\bar{z}_\lambda P_\lambda \rho_\lambda$	
405/08	0,08	0,579	0,016	2,774	0,047	0,001	0,222	
436	0,08	12,205	0,647	60,412	0,980	0,052	4,830	
491	0,08	0,026	0,216	0,415	0,002	0,017	0,033	
564	0,08	16,001	46,934	0,577	1,280	3,750	0,046	
577/79	0,460	52,216	52,175	0,103	12,035	12,030	0,024	
691	0,855	0,032	0,012	0,000	0,027	0,010	0,000	
				$y'=100,0$		$x'_p=14,371$	$y'_p=15,860$	$z'_p=5,155$

Для контроля выполненного расчёта убеждаемся, что $x_p + y_p + z_p = 1$.

Применив цветовой график на рис.П8, находим, что цветовой тон поверхности $\lambda=572,5$ нм, а чистота цвета $p=0,68$. В результате расчёта получили, что оранжевая поверхность, освещённая ртутной лампой, имеет жёлтый цвет.

Рассмотренные примеры дают представление о методическом подходе к решению задач цветовых расчётов.

4.6. Оценка цветовых различий

Важной задачей колориметрии является оценка цветовых различий. Суть вопроса заключается в следующем. Пусть имеется несколько цветов: C_1, C_2, C_3 и т.д. Как оценить и сравнить между собой различие двух цветов, например, C_1 , и C_2, C_1 , и C_3, C_2 и C_3 и т.д.? Поскольку цвет определяется зрительным ощущением прошедшего в глаз излучения, для оценки цветовых различий колориметрия пользуется физиологическим понятием о порогах ощущения, в данном случае о цветовом пороге. Цветовым порогом называется то минимальное изменение цвета, которое глаз ещё может заметить. Если измерить число порогов, разделяющих два цвета, можно этим числом характеризовать различие сравниваемых цветов.

Обычно рассматривается различие цветов при одинаковой яркости, т.е. рассматривается различие цветностей. При этом под цветовым порогом понимается минимально различаемое изменение цветности.

Цветовой порог можно определить выражением $\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$, где Δx и Δy – величины пороговых изменений коэффициентов цветности. При изменении цветности величины Δx и Δy могут изменяться от нуля до некоторых предельных значений. Точка цветового порога на поле реальных цветов в системе X, Y, Z определяется радиусом-вектором, начало которого расположено в точке, определяемой координатами x, y , а конец – в точке с координатами $(x+\Delta x)$ и $(y+\Delta y)$. Всем возможным вариациям Δx и Δy будет соответствовать

непрерывная совокупность таких радиусов-векторов, геометрическое место концов которых образует замкнутую кривую вокруг точки x, y . Эту кривую можно назвать кривой цветных порогов. Форма кривых цветных порогов весьма близка к эллипсу. Поэтому эти кривые называют эллипсами цветных порогов.

Величины цветных порогов различны для разных точек и в разных направлениях поля реальных цветов в системе X, Y, Z . Переменные размеры эллипсов и их ориентации затрудняют оценку различий цветности удалённых друг от друга точек на поле реальных цветов. В связи с этим возникла задача преобразования системы X, Y, Z таким образом, чтобы получить так называемый равноконтрастный цветной график, т.е. такой график, на котором величина цветового порога изображается одинаковым отрезком в любом месте и в любом направлении. Эта задача может быть решена только приближённо, но с достаточной для практики точностью. Равноконтрастный цветной график был вычислен сотрудниками светотехнической лаборатории Всесоюзного электротехнического института.

Оценка цветных различий играет важную роль для установления и обозначения допустимых отклонений цветности источников света и различных светотехнических материалов.

4.7. Исторический аспект развития науки о цвете

Трудно сказать, когда возникла наука о цвете. Видимо, в самом начале активного познания окружающей действительности, практического использования приобретаемого опыта и знаний. Во времена древнего мира наиболее развитые и последовательные учения о цвете были созданы в Китае и Индии. Здесь эта наука носит уже философский характер, хотя и не порывает со своей мифологической основой. Дальнейшее развитие цивилизации – Ближний и Средний Восток. В культуре народов этих стран сложилась устойчивая символика цветов, связанная с принадлежностью того или иного цвета к светлым и ярким или тёмным и тусклым.

В Греции и Риме свет и цвет становятся предметом размышлений философов. Самое смелое их дерзание – попытка проникнуть в тайну физической сущности цвета и света, а также процессов зрения. Большинство античных учёных, занимавшихся проблемой цвета, истолковывало его как вид материи, как некоторое тело, способное истекать из предметов подобно воздуху и воде и, попадая в глаз человека, вызывать в нём зрительные ощущения. Вслед за Демокритом и Эпикуром Лукреций считал, что всё сущее состоит из мельчайших частиц – первоначал. Из них складываются и материальные тела, и цвета, и запахи, и звуки, и даже частички молнии. Аналогичных взглядов, но с идеалистических позиций придерживался Платон: «...Цвет – это пламя, струящееся от каждого отдельного тела и состоящее из частиц, соразмерных способности нашего зрения ощущать...».

Особое место в античном цветоведении принадлежит Аристотелю. Если материалисты предвосхитили корпускулярную теорию света Ньютона, то Аристотель приблизился к волновой теории. В споре со своими предшественниками, сторонниками теории «истечения», он утверждал, что свет не истечение и вообще не тело. Аристотелю принадлежит утверждение: «Свет есть качество прозрачного, а цвет – его граница». Свет, по мнению Аристотеля, есть подвижное состояние прозрачной среды (эту среду в XIX веке назовут эфиром). Когда она приходит в движение, то возникает свет. Прозрачная среда приводится в движение некоторым «огнём» или чем-то подобным. Этот «огонь» и есть цвет. В работах Аристотеля много говорится о смешении цветов. Его идеи этого направления были прочно забыты и вновь сформулированы только Гельмгольцем спустя две тысячи триста лет.

Античное учение о цвете – одна из прекрасных глав в истории этой науки. Античная цветовая эстетика для европейского искусства была таким же фундаментом, как античная философия для науки.

В начале VII века в странах Ближнего и Среднего Востока распространилась новая религия – ислам. В священном писании свет и цвет воспеваются как венец красоты. Читая сказки «Тысяча и одна ночь», можно почувствовать колористику тех лет в описаниях садов, дворцов, одежд. Всё это как идеал, как то, к чему вроде бы надо стремиться. В них смысл цветовой эстетики ислама.

Эпоха Возрождения вобрала в себя всё лучшее из прошлого. Работы Леона Баттисты Альберти (1404–1472) и Леонардо да Винчи (1452–1519), посвящённые цвету, занимают особое место. Они свободны от власти авторитетов, основаны на собственных естественнонаучных наблюдениях и преследуют чёткую цель – дать художнику знания для его практической деятельности. Следует заметить, что в тот период времени ещё не видели особого различия между наукой и искусством. Наука в значительной мере служила искусству. «Науки везде и всегда приносят величайшую пользу всем художникам, к ним принадлежащим, особенно же ваятелям, живописцам и зодчим, открывая им путь к осуществлению замышляемых ими творений; ибо всякий, кто лишён того, что приобретается при помощи полезных наук, никогда не будет обладать совершенным суждением, каково бы ни было его природное дарование», – писал известный итальянский архитектор, живописец и писатель Джорджо Вазари.

В книге «О живописи» Леонардо да Винчи писал: «Итак, [если] мы скажем, что непрозрачное тело жёлтого [цвета], а источник света – синего, то я утверждаю, что освещённая часть будет зелёной, и это зелёное складывается из жёлтого и синего». Всё это, разумеется, верно, но удивительно, что в предшествующие века этого не замечали. Странно, но факт: многие данные о цветах, найденные Альберти и Леонардо да Винчи, долгое время не

использовались художниками, в том числе и самим Леонардо да Винчи. Пока ещё медленно развивалось общественное знание. Леонардо да Винчи много писал о цвете различных явлений природы. Чаще всего он объяснял их правильно, предвосхищая законы сложения и вычитания цветов при их смешении.

Наука о цветах в эпоху Возрождения, разумеется, не сводится только к работам Альберти и Леонардо да Винчи. Но они составили целую эпоху.

XVII век – переломный век в истории культуры. Основным методом науки становится рационализм. Получила развитие оптика. К числу достижений в оптике следует отнести построение телескопа Г. Галилеем и впервые в мире наведение его на небо, исследования Кеплера, Декарта, Гримальди, Ферма, Гюйгенса, Гука и, наконец, Ньютона.

Выдающимся открытием в оптике следует считать обнаруженную Ф.Гримальди дифракцию света. Он считал, что цвета возникают вследствие различия скорости колебаний вещества. Цвета существуют объективно. Гримальди писал, что цвета могут существовать только в самом свете; постоянные цвета тел зависят от их способности отражать падающий свет с особыми видоизменениями.

Рене Декарт предложил современную формулировку закона преломления света и на этой основе объяснил образование радуги. До Декарта цвет не считали чем-то объективным. Даже по Кеплеру, цвет – это качество, которое должны изучать философы, а не физики.

К концу XVII века оптика становится экспериментальной наукой, а не предметом рассуждений или, в лучшем случае, наблюдений. Но единой теории, связывающей свет с цветом, до Ньютона не существовало. Она изложена им в «Лекциях по оптике» (1669 г.), «Новой теории света и цветов» (1672 г.) и, наконец, в «Оптике» (1704 г.). Именно Ньютона можно считать основоположником физической науки о цвете. Из других учёных XVII века уместно упомянуть немецкого учёного И.Цана, который впервые построил цветовой треугольник, позволяющий сразу же определить результат смешения различных цветов.

В XVIII веке все факты пытались объяснить на основании теории истечения Ньютона, а это, как правило, не удавалось. В 1746 году Л.Эйлер опубликовал трактат «Новая теория света и цветов». В этой работе он пытался аналитическим путём (впервые в истории физики) доказать волновую природу света. Свет, по мнению Эйлера, – это продольные колебания упругого эфира. Подобная идея давно была высказана Гюйгенсом и Гуком. Однако именно Эйлер придал ей строгое математическое оформление.

Уместно напомнить трёхкомпонентную теорию цветового зрения М.В.Ломоносова. Именно он впервые предположил, что в органе зрения имеются всего три цветовоспринимающих аппарата (для красного, синего и

жёлтого). Заметим, что эта идея появилась у Ломоносова из анализа опыта художников, которые получали все цвета, смешивая три основных цвета. Теория Ломоносова – яркий пример синтеза науки и искусства. Ломоносов писал: «Натура тем паче всего удивительна, что в простоте своей многохитростна и от малого числа причин произносит неисчислимые образы свойств, перемен и явлений».

Известно, что И.В. Гёте был не только великим поэтом, но и художником. Он занимался ботаникой, минералогией, палеонтологией, философией, эстетикой, художественной и театральной критикой, а также цветоведением. Он пытался противопоставить свою истину «заблуждениям» Ньютона. Приведём подлинные слова Гёте: «Всё, что я сделал как поэт, отнюдь не наполняет меня особой гордостью. Прекрасные поэты жили одновременно со мной, ещё лучшие жили до меня и, конечно, будут жить после меня. Но что я в мой век являюсь единственным, кому известна правда о трудной науке – о цвете, этому я не могу не придавать значения, это даёт мне превосходство над многими». С точки зрения современной физики идеи Гёте не выдерживают критики. Однако, книга Гёте «К учению о цвете» – действительно замечательна. Она – философский трактат, синтез мыслей о цвете, которыми жила его эпоха.

Работа Гёте была последней описательной работой о свете и цвете. После него эта наука разветвляется на физическую оптику, физиологическую оптику, эстетику цвета и прикладное цветоведение. В физической оптике происходили революционные процессы (Юнг, Френель, Фраунгофер, Максвелл, Герц, Лебедев, Кирхгоф, Бунзен, Гельмгольц). Особый вклад внёс Максвелл в цветоведение.

В книге «Введение в современную оптику: Фотометрия. О возможном и невозможном в оптике» [32] Борис Иванович Степанов пишет: «В 1984 г. вышла в свет монография Л.Н. Мироновой «Цветоведение» [33]. Она написана как учебное пособие для студентов по специальностям «промышленное искусство», «интерьер и оборудование», «монументально-декоративное искусство». Книга насыщена богатым фактическим материалом. Сведения по физике цвета изложены кратко, больше внимания уделяется основным закономерностям восприятия цвета и его психологическому воздействию, проблемам проектирования цветового климата искусственной среды обитания и деятельности человека. Монография Мироновой очень полезна, так как в ней собраны сведения, до сих пор находившиеся в разных источниках. Нас заинтересовала, прежде всего, первая часть книги, посвящённая истории науки о цвете. Как справедливо пишет автор в предисловии, «в наше время преподавание любой художественной дисциплины (разумеется, не только художественной, но и любой другой. – Б. С.) немислимо вне связи с историей искусства и духовной культуры. Надо осмысливать опыт, накопленный

человеком».

В книге Б.И. Степанова [32] в сильно сокращённой, конспективной форме изложены сведения об истории цветоведения, собранные Мироновой. Желаям подробнее ознакомиться с материалом следует обратиться к оригиналу.

Заключение

Человеческий глаз, обладая замечательной способностью адаптироваться к достаточно широкому диапазону яркостей, не только помогает человеку ориентироваться в пространстве и является приёмником большого объёма необходимой ему информации, но также позволяет получать немалое эстетическое наслаждение от окружающего мира, природных пейзажей, флоры и фауны, предметов искусства. Биноклярное зрение, характерное для нормального зрительного аппарата, обеспечивает человеку стереоскопическое восприятие пространства и позволяет различать объекты по их разноудалённости.

Вместе с тем, при всей его сложности, зрительный анализатор не лишён недостатков и ограничений. Разрешающая способность, рабочий спектральный диапазон, дальность стереовидения глазного аппарата ограничены. Изображению, образованному оптической системой глаза, присущи аберрации, - сферическая, хроматическая, нередко астигматизм, могут проявляться, например, аметропия и анизейкония.

Коррекцию недостатков зрения осуществляют с помощью очковых линз. Очень важно при этом, чтобы очки не нарушали естественного восприятия окружающего мира, иными словами, – не очень сильно нарушали привычную угловую величину наблюдаемых предметов.

Расширить возможности зрительного аппарата, - повысить разрешающую способность, позволить рассмотреть очень мелкие объекты либо объекты, расположенные на значительном удалении от наблюдателя, видеть при низких уровнях освещённости и даже ночью, раздвинуть пределы стереовосприятия окружающего пространства, - во всём этом и во многом другом помогают человеку оптические и оптико-электронные приборы. Однако, проектируя такого рода технику, разработчик должен обязательно учитывать характеристики и возможности глаза и создавать такие приборы, которые обеспечивали бы комфортную его работу и не нарушали естественного восприятия окружающего пространства.

Учебное пособие ориентировано на студентов-оптотехников, специализирующихся в расчёте оптических систем, конструировании и проектировании оптических и оптико-электронных приборов различного назначения, а также студентов смежных специальностей.

Литература

1. Марио Льюцци. История физики / Пер. с ит. – Москва: Мир, 1970. – 464 с.
2. Инженерный справочник по космической технике. Общая редакция – А.В. Солодов, профессор, д.т.н. – Москва: Воениздат, 1969. – 693 с.
3. Эргономика зрительной деятельности человека/ В.В. Волков, А.В. Луизов, Б.В. Овчинников, Н.П. Травникова. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 112 с.; ил.
4. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы оптотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч.2. Физиологическая оптика и колориметрия.–2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989.– 432 с.; ил.
5. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов, – Москва–Ленинград: Машиностроение, 1966. – 564 с.
6. Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
7. Словарь иностранных слов. – Москва: Русский язык, 1980.– 624 с.
8. Мартин Л. Техническая оптика. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 424 с.
9. Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 180 с.
10. Виноградова О.А., Зверев В.А., Фролов Д.Н. Влияние параметров элементов оптической системы микроскопа на его разрешающую способность. Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004, том 1, с. 94–97.
11. Виноградова О.А., Точилина Т.В., Хои Рамин. Параметры оптической системы, определяющие разрешающую способность и эффективность использования светового потока в микроскопе. Сборник докладов IV международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика–2005”, СПб: СПб ГУИТМО, 2005, с. 173–174.
12. Михель К. Основы теории микроскопа. – Москва: Гостехиздат, 1955. 276 с.
13. Виноградова О.А., Гаврилюк А.В., Зверев В.А., Карпова Г.В. Осветительное устройство проекционной системы с улучшенным светораспределением в плоскости изображения. Сборник трудов оптического общества им. Д.С. Рождественского «Прикладная оптика – 2002», СПб, 2002, том 1, с. 9–15.
14. Панов В.А., Андреев А.Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. – Ленинград: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1976. – 432 с.
15. Виноградова О.А., Точилина Т.В. Эффективность осветительного устройства светового микроскопа. Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО, выпуск 18: исследования в области физики и оптики. СПб: СПб ГУ

ИТМО, 2005, с. 248–254.

16. Микроскопы. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А./ Под ред. канд. техн. наук Н.И. Полякова. – Ленинград: Машиностроение, 1969. – 512 с.
17. Виноградова О.А., Зверев В.А., Точилина Т.В., Хои Рамин Система переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа, "Оптический журнал", том 73, №10, 2006. С. 24-28;
18. Виноградова О.А., Зверев В.А., Фролов Д.Н. Анализ проблем оптимизации параметров оптической системы микроскопа. Оптический журнал. Т. 77, №1, 2011. С. 59–65.
19. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1984. – 231с.
20. Луизов А.В. Глаз и свет. – Ленинград: Энергия, 1983. – 140 с.
21. Ivanoff A. Les aberrations de l'oeil leur rôle dans l'accommodation. Paris, 1953.
22. Волков В.В., Горбань А.И., Джалиашвили О.А. Клиническая визо- и рефрактометрия. – Ленинград: Медицина, 1976. – 206 с.
23. Зверев В.А., Карасёва И.А., Карпов В.Г. Особенности визуального восприятия изображения при наблюдении через телескопическую систему.// Оптика и спектроскопия, 1998, том 85, № 5, с. 874–879.
24. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. – Ленинград: Машиностроение, 1969. – 672 с.
25. Проектирование оптических систем. Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. Перев. с англ. – Москва: Мир, 1983. – 430 с.
26. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Перев. с франц. / под ред. Г.Г. Слюсарева. – Москва: Мир, 1964. – 295 с.
27. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1950. – 267 с.
28. Лазарев П.П. Исследование по адаптации. Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1947. – 263 с.
29. Майзель.С.О. Трансформация лучистой энергии в сетчатке человеческого глаза. Центральное зрение / С. О. Майзель. – Изд. 2-е. – Москва: URSS, 2010. – 263 с.
30. Мешков В.В. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов. Ч.1. – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1979. – 368 с., ил.
31. Давыдова Е.М. Цветоведение и колористика. Портал НИ ТПУ // URL: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/d/DAVYDOVA/academic/cvetoved/Tab4> (дата обращения 26.10.2019)
32. Степанов Б.И. Введение в современную оптику: Фотометрия. О возможном и невозможном в оптике. – Минск: Наука и техника, 1989. – 254 с.
33. Миронова Л.Н. Цветоведение. Минск: Высшая школа, 1984. – 286 с.

Зверев Виктор Алексеевич
Карасева Ирина Аркадьевна
Тимощук Ирина Николаевна

Эргономика и оптотехника зрительного восприятия наблюдаемых предметов

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49