

резерв. фонд

✓

623
0-62

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
и
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НКВ СССР

ПРОВЕРЕНО
1950 г.

535
062

355 X

Депозитарий

Проб. 1950

ОПТИКА В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

СБОРНИК СТАТЕЙ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ

академика С. И. ВАВИЛОВА

и проф. М. В. СЕВАСТЬЯНОВОЙ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ЗАНОВО ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ,
В ДВУХ ТОМАХ

Том I

С. И. Вавилов
М. В. Севастьянова
1945

К. У. 1

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

Библиот. СССР
на 1-го янв. 1950
г. 10

ПРОВЕРЕНО
1950

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1945 Ленинград

9-4339
4-й ж.
28

ПРОВЕРЕНО
1936 г.

**Составители — сотрудники Государственного Оптического
института:**

К. С. Андронников, В. В. Балаков, А. Н. Бураго, Л. А. Вентман, А. А. Вишневский, Д. С. Волосов, проф. Л. Н. Гас-
совский, проф. А. А. Гершун, М. А. Ельяшевич, К. С. Ев-
стропьев, проф. М. М. Гуревич, А. И. Колядин, Б. М. Корякин,
А. Л. Курицкий, К. А. Папианц, проф. В. К. Прокофьев,
Е. К. Пудейко, М. А. Резунов, Н. Э. Ритынь, проф. М. В.
Севастьянова, Н. И. Сеннов, А. И. Стожаров, проф. Г. П. Фаер-
ман, П. П. Феофилов, проф. Е. Н. Царевский, Д. П. Чехматаев,
Е. Ф. Юдин и проф. Военно-морской академии им. К. Е. Воро-
шилова В. В. Каврайский.

*Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР за № 2017*

Подписано к печати 26/IV-45 г. Печ. л. 24 $\frac{1}{2}$ — 1 вклейка. Уч.-изд. л. 26. М 01498. Тираж 3 000.
Зак. 100.

2-я тип. „Печатный Двор“ им. А. М. Горького треста „Полиграфкнига“ ОГИЗа при СНИК РСФСР.
Ленинград. Гатчинская, 26.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение световых явлений для целей войны старо, как сама война. Это определилось совершенством и огромной чувствительностью человеческого глаза. Глаз позволяет на большом расстоянии заблаговременно заметить приближение врага, точно распознать его, ориентироваться в обстановке, оценить расстояние, установить связь между удаленными пунктами при помощи огня или дыма костров и т. д.

Возможно, что сигнализационные костры и были первым, еще доисторическим, искусственным применением оптики в военном деле. По легендарным сведениям, первым военным оптическим прибором послужили, повидимому, вогнутые зеркала, о зажигательном действии которых при концентрации солнечного света до нас дошли неправдоподобные, сказочные сведения.

Свойства света таковы, что комбинация глаза (или искусственного приемника, например фотографической пластинки) с оптическими приборами, состоящими из зеркал, линз, призм и т. д., позволяет решать различные задачи первостепенной военной важности, например: увеличивать изображение предмета (зрительные трубы), наблюдать за предметом по ломаной линии (перископы), точно определять расстояния до предмета (дальномеры), различать замаскированные сооружения (спектральные приборы) и т. д.

Эти свойства оптических приборов начали постепенно выясняться в науке практически только с конца XVI в. Несомненное применение оптических приборов для военных целей относится ко времени изобретения зрительной трубы. В XVII и XVIII вв., наряду со зрительными трубами, в военное дело проникли и другие оптические приборы: морские секстанты, перископы, различные системы оптической сигнализации. Разнообразие их чрезвычайно умножилось в XIX в. Появились военные фотографические камеры, дальномеры, прожекторы разных видов, поляризационные приборы и т. д.

Мировая война 1914—1918 гг. с несомненностью показала необходимость „большой оптики“ в современной армии. Преимущества новой артиллерии, авиации, танков и военных кораблей могут быть во многих случаях действительно применены только в сочетании с хорошими оптическими приборами (дальномеры, прицелы, аэрофотокамеры и т. д.). Поэтому за время войны объем военной оптической промышленности в разных странах повысился во много раз. В частности, в 1914 г. на земном шаре было всего 3 завода оптического стекла, к концу войны число их выросло до 11, причем увеличился и объем производства.

После войны 1914—1918 гг. рост военной оптической промышленности продолжался неуклонно. В СССР за четверть века оптическая промышленность, находившаяся в дореволюционной России только в зачаточном состоянии, заняла весьма видное место среди других отраслей производства.

Новая война, навязанная миру фашистскими поджигателями, вызвала дальнейший огромный качественный и количественный подъем военной оптики, превратившейся в большую, довольно сложную и очень важную отрасль военной техники.

В 1933 г. коллектив сотрудников Государственного Оптического института издал в честь XV-летия Красной Армии книгу „Оптика в военном деле“, предназначенную для командного состава Красной Армии. В следующем, 1934 году

потребовалось новое издание книги, значительно переработанное по сравнению с первым и увеличенное по объему приблизительно вдвое.

Настоящее — третье — издание в сущности должно рассматриваться как совсем новая книга по плану, по содержанию и по объему.

Однако и в новом виде „Оптика в военном деле“ попрежнему предназначается прежде всего для командного состава Красной Армии, для преподавателей и слушателей военных академий и училищ, для инженерно-технических работников военной промышленности, в особенности оптико-механической. Для понимания текста требуется знание физики и математики в объеме средней школы.

Громадный рост военной оптики в связи с необходимостью достаточно подробного и конкретного изложения потребовал очень значительного увеличения объема книги по сравнению с предыдущими изданиями (более чем вчетверо по сравнению с первым изданием и более чем вдвое по сравнению со вторым). В связи с этим книгу пришлось разделить на два тома.

Первый том содержит изложение основных сведений о физической и геометрической оптике, описание главных оптических материалов, вспомогательных приемов и приборов, свойств глаза, в частности в связи с вопросами ночного видения, проблемы видимости и маскировки. Два последние раздела первого тома посвящены фотографии в военном деле и оптической сигнализации.

Второй том книги полностью занят описанием основных военных оптических приборов, зрительных труб, перископов, военнотопографических приборов, артиллерийских и навигационных угломерных устройств, дальномеров и высотомеров и разных прицелов.

Несмотря на большой объем книги, она не претендует ни на полноту, ни на замену специальных инструкций. Многие приборы (особенно морские) не описаны. Естественные соображения военной тайны явились причиной умолчания о ряде наиболее новых устройств.

В конце книги приложен библиографический указатель литературы по вопросам военной оптики на русском языке.

При редактировании книги и установлении ее общей структуры очень большая работа выполнена проф. М. В. Севастьяновой.

С. Вавилов

КРАТКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Оптические приборы и оптические методы являются одним из основных средств технического оснащения современных армий. Без оптических приборов невозможно ведение современных войн. Это положение не является преувеличением. Наблюдение за полем боя, нацеливание оружия, измерение расстояний, разведка фотографированием — все эти основные элементы боя невозможны в современной войне без оптических приборов. Маскировка и демаскировка, сигнализация и связь также базируются на свойствах света и связаны с использованием оптики, оптических приборов и методов. Без оптических приборов армия подобна слепому или боксеру с плохим зрением, расточающему силы на нанесение ударов в пространство. Чем больше современная армия имеет в своем распоряжении оптических приборов, чем лучше она владеет ими, тем эффективнее используется оружие и экономнее, при прочих равных условиях, достигаются результаты боя.

Современное производство оружия и технических средств для ведения войны также связано с применением оптических методов. Измерительные приборы для точнейших измерений, оптические методы для быстрого контроля и анализа, применение которых в промышленности стало возможным при современном состоянии оптической науки, являются совершенно необходимыми средствами современного производства машин, в том числе производства оружия и других технических средств войны.

На первый взгляд оптические приборы кажутся дорогими, однако применение и использование их окупается с лихвой. Приведенные ниже соотношения и цифры показывают, какие в сущности незначительные расходы связаны с вооружением оптическими приборами и методами современной армии.

Два хороших призмённых бинокля шестикратного увеличения стоят дешевле одного выстрела 152-мм пушки.

Артиллерийская стереотруба с лимбом и треногой стоит не дороже девяти выстрелов 152-мм гаубицы.

Прицел танковой пушки обходится дешевле восьми выстрелов пушки.

Орудийная панорама по стоимости равна примерно четырем осколочно-фугасным пушечным снарядам калибра 152 мм.

Стоимость оптических приборов в сравнении со стоимостью выстрелов, производимых батареями при выполнении того или иного задания, является исчезающе-малой величиной. Расходы на приобретение биноклей для командира батареи и наблюдателя окупаются уже при пристрелке за счет экономии хотя бы одного выстрела на пристрелку; они десятки раз окупаются тогда за счет экономии выстрелов вследствие возможности наблюдать за результатами стрельбы и своевременно прекращать ее при поражении цели.

Таким образом, если принять во внимание громадный расход боеприпасов и стоимость их, то расходы, связанные со снабжением армии оптическими приборами, по сравнению с расходами только на боеприпасы окажутся крайне незначительными.

Экономичность применения оптических методов в промышленности, при производстве вооружения, может быть показана на примере спектрального анализа сплавов. Опыт работы показывает, что один аналитик, вооруженный спектроскопом, в состоянии заменить 10—15 химиков, занятых химическим анализом металлов.

Несмотря на большую стоимость прибора для спектрального анализа, затраты на приобретение его окупаются в один-два месяца.

Стоимость оснащения машиностроительной промышленности оптическими приборами по сравнению, например, с потерями от брака окажется весьма незначительной и окупается во много раз сокращением брака, расходов по зарплате персонала, занятого выполнением анализов, а также общим сокращением сроков контроля.

Война 1914—1918 гг. показала, какую роль играет оптика в военном деле. Большинство воюющих стран, кроме Германии, не имели достаточно мощной собственной оптической промышленности для снабжения своих армий нужным количеством оптических приборов. В каждой стране, принимавшей участие в войне 1914—1918 гг., были сделаны необходимые выводы о роли и значении оптических приборов для ведения войны, и во многих странах уже во время войны были предприняты меры для организации собственной оптической промышленности и расширения ее там, где она была недостаточной для военных нужд. Повидимому, и в Германии военное значение оптики надлежащим образом было оценено лишь в ходе войны; тем не менее германская армия с самого начала была снабжена оптическими приборами лучше, чем армия любой другой страны*.

Основой оптического приборостроения является оптическое стекло. До войны 1914—1918 гг. фактически работало три завода оптического стекла: Шотт в Германии, Парра-Мантуа во Франции и Ченс в Англии. Фирмы, монополизировавшие производство оптического стекла, безраздельно владели секретами производства. Даже для союзников эти секреты не открывались (фирма Мантуа во Франции). Поэтому в каждой стране были предприняты при содействии правительств решительные шаги к развитию научных исследований в области оптического стекла (Англия, Франция, Россия, США, Италия) и вместе с тем приступлено к организации производства оптического стекла.

Оптическое стекло отличается от технического высокой степенью однородности с химической и физической точек зрения. Получение больших кусков стекла, обладающих высокой степенью однородности на всем протяжении, характеризует производство оптического стекла. Этим определяются все трудности производства последнего.

Широко поставленные научные исследования, для выполнения которых правительствами соответствующих стран были привлечены группы научных работников, позволили разгадать тайны производства оптического стекла и в значительной степени обусловили быстрое развитие этого производства. Уже во время войны количество заводов, производящих оптическое стекло, выросло до 11 (Германия, Франция, Англия, США, Россия, Италия)**.

Вместе с тем принимаются меры к развитию оптико-механической промышленности, способной обеспечить удовлетворение насущных потребностей армий воюющих стран в оптических приборах. Так же, как и производство оптического стекла, организация производства оптических приборов потребовала специальных научных сил, понадобились кадры конструкторов нового типа, инженеров-производственников и вычислителей оптических систем. Организуются специальные научные учреждения и научные общества для содействия развитию оптико-механического производства. Для подготовки кадров конструкторов и вычислителей, а также для выполнения научных исследований в области оптики, оптического приборостроения и производства оптических приборов организуется Оптический институт во Флоренции, Оптический институт в Париже. Во время войны (в 1916 г.) возникает Американское оптическое общество с целью объединения всех лиц, учреждений и предприятий, занятых конструированием и производством оптических приборов, а также лиц, занимающихся теоретическими и прикладными вопросами оптики. Это общество существует и теперь и издает научный и технический журнал.

* Schwarte, Die Technik im Weltkriege, Berlin, S. 114, 1920.

** Д. С. Рождественский, Записка об оптическом стекле, Труды ГОИ, т. VIII, вып. 84, 1932.

В 1918 г. организуется в СССР Государственный Оптический институт.

Значение оптики в военном деле, возрастающая роль оптических приборов и методов в производстве, в медицине, в других областях человеческой деятельности и вместе с тем опыт мировой войны заставили каждое государство организовать собственную оптическую промышленность. Поэтому все крупнейшие страны имеют в настоящее время предприятия, производящие оптические приборы.

Италия. С целью обеспечения стеклом приборов, требуемых для вооруженных сил, по настоянию военных учреждений в 1916 г. был организован небольшой завод оптического стекла на основе французской технологии. В 1932—1934 гг. проведена реконструкция, в основу которой положены новейшие данные науки и техники, механизация производства горшков, введение нефтяных печей, электропечей для термической обработки и т. п. В 1935 г. существовало два небольших центра производства оптического стекла (во Флоренции и в Риме), причем выпускалось очень ограниченное число сортов стекла.

С 1937 г. производство оптического стекла расширяется и переносится в промышленную зону Рима. Завод производит 23 сорта оптического стекла.

В 1939 г. выпускается первый большой каталог итальянского оптического стекла.

Однако потребность оптической промышленности в стекле в Италии не покрывалась до недавнего времени производством собственного стекла, и часть стекла ввозилась из-за границы (из Франции и Германии).

Ввоз оптического стекла характеризуется следующими цифрами:

1928 г. — 287 881 лира	1931 г. — 440 275 лир
1929 г. — 405 575 лир	1932 г. — 427 715 "
1930 г. — 578 940 "	1933 г. — 468 470 "

К середине 30-х годов заводы итальянской оптической промышленности наряду с мирной продукцией производили большую группу военных приборов. Флорентийский завод Оффичине Галилео делал дальномеры, оптические центральные посты, наводки корабельной артиллерии, перископы для подводных лодок, стереопантографы для обработки аэрофотоснимков и т. д. Фирма Фиамма выпускала панорамные камеры для самолетов. Фирма Кинотехника производила съемочные и проекционные камеры и кинокамеры для самолетов. Оптико-механическое итальянское общество изготовляло охотничьи прицелы, бомбардировочные прицелы, картографические приборы, аэрофотокамеры с кассетами под пластинки и фотокамеры под пленку, нивелиры и т. п. Фирма Сан-Джорджо выпускала дальномеры, различные призмённые бинокли и другие приборы. Завод Сайбене производил теодолиты и нивелиры. Миланская фирма Сальмопрати получила известность своими оптическими морскими приборами и прожекторными зеркалами. Таким образом, почти все виды военных оптических приборов производятся внутри страны.

Статистические данные о ввозе и вывозе оптических приборов показывают, что внутренние потребности страны в оптических приборах постепенно покрываются за счет производства приборов внутри страны*.

Год	Ввоз в лирах	Вывоз в лирах	Разница в лирах
1928	22 198 606	3 522 808	18 675 798
1930	22 536 658	3 556 946	18 979 712
1931	14 352 257	5 565 798	8 786 588
1932	8 662 030	2 274 442	6 387 588
1933	13 887 005	11 499 245	2 387 760

* Zs. f. Instrumentenkunde, № 8, S. 281, 1934.

Цифры, характеризующие вывоз, показывают, что итальянская оптическая промышленность, благодаря улучшению качества продукции, конкурирует на рынке с продукцией других стран.

Перед началом войны 1939 г. Италия, несомненно, располагала достаточной для ее армии оптико-механической промышленностью.

Итальянская оптическая промышленность находится под специальным наблюдением государственной организации — Национального технического комитета для развития итальянской оптической промышленности. Комитет состоит из трех групп:

- 1) нейтральная во главе с директором промышленности (представитель Министерства корпораций) и представителя Министерства просвещения (директор Оптического института);

- 2) группа, представляющая интересы потребителей (представители Министерства военного, морского, авиации и Комитета защиты);

- 3) группа, объединяющая поставщиков сырья — представителей промышленности.

Задача комитета заключается в поднятии оптической культуры страны, в защите продукции итальянской оптической промышленности, в обеспечении высококачественного изготовления оптических приборов, в обслуживании промышленности научными исследованиями и техническим руководством. Технический комитет выдает также разрешения на производство оптических приборов, причем только тем предпринимателям, которые в состоянии обеспечить выпуск первоклассных приборов. Оптический институт, находящийся в ведении Министерства просвещения, связан с упомянутым Техническим комитетом.

Для развития национальной оптической промышленности готовятся кадры специалистов в области вычисления, конструирования и производства оптических приборов.

Германия. Оптическая промышленность Германии имеет большую историю. Ведущий завод оптической промышленности Германии — завод Цейсса — организован в середине прошлого столетия. Установленная с давних времен связь этого предприятия с научными учреждениями (Йенский университет), постоянное привлечение к работе научных сил (Аббе, Чапский и др.) позволили этой фирме организовать изготовление первоклассных приборов, расширить применение оптических приборов, занять ведущее место на мировом рынке. Трудно назвать какую-либо область человеческой деятельности, где не применялись бы приборы, разработанные и сделанные фирмой Цейсс. Научный отдел фирмы стоит на высоком уровне. За последние годы фирма провела ряд научных конференций по применению оптических методов в различных областях научной и промышленной деятельности. Такие конференции, наряду с научной пропагандой новейших методов анализа и контроля в производстве и в науке, очевидно, позволяют и самой фирме наилучшим образом учитывать все возникающие в этой области запросы и потребности и удовлетворять их путем разработки и конструирования новых приборов.

Во времена империалистической войны 1914—1918 гг. оптическая промышленность была в состоянии вооружить германскую армию нужными приборами.

После войны оптическая промышленность получает дальнейшее развитие. Этому содействовало послевоенное состояние экономики страны и технический план восстановления хозяйства и оплаты репараций. Руководящая идея восстановления хозяйства состояла в том, чтобы по возможности избегать вывоза из страны сырых материалов, а также изделий промышленности, требующих большого количества материалов и малой квалификации труда. Пропагандируется основная мысль: вывозить высококачественную продукцию, точнейшие машины, измерительные приборы, т. е. изделия, требующие приложения высококвалифицированного труда, — изделия, которые другие страны производить не в состоянии, сбыт которых за границей должен обеспечить возвращение средств, выплаченных по репарациям*. Продукция оптической промышленности наилучшим образом удо-

* К юн, Долуски в машиностроении.

влетворяет этому требованию. Вместе с тем некоторые оптические фирмы не ограничивались вывозом приборов и организовали собственные производства за границей: фирма Цейсс — производство оптических приборов в Голландии (фирма Нединско), фирма Герц — в Чехословакии.

Вывоз изделий оптико-механической промышленности за ряд лет, взятый в процентах ко всему вывозу, выражается следующими цифрами*:

1934 г. — 1,5%	1936 г. — 1,9%
1935 г. — 1,7%	1937 г. — 2%

Эти цифры указывают на относительный рост в вывозе всех товаров и изделий оптико-механической промышленности. Эти же цифры дают некоторое представление и об объеме оптико-механической промышленности Германии.

После экономического кризиса 1929—1933 гг. оптико-механическая промышленность восстанавливалась быстрее, чем вся остальная промышленность Германии.

Приведенные ниже цифры изменения количества рабочих и служащих, занятых в промышленности, выраженные в процентах к количеству, требуемому при полной нагрузке, достаточно убедительно подтверждают это**.

Год и месяц	Рабочие		Служащие	
	вся промышленность (в %)	оптико-мех. промышленность (в %)	вся промышленность (в %)	оптико-мех. промышленность (в %)
1933 VII ..	47,3	46,2	60,6	59,2
1933 XII ..	49,7	50,3	63,2	61,2
1934 I ...	49,8	51,3	63,5	62,1
1934 XII ..	61,8	63	72	68,1
1935 I ...	59,1	63,7	71,8	69,3
1935 XII ..	63,8	74,6	74,8	78,2
1936 I ...	62,8	74,6	78,1	78,8
1936 V ...	69,3	79,2	81,5	83,9

Таким образом, темпы восстановления оптико-механической промышленности превышают темпы восстановления всей остальной промышленности Германии.

Это обстоятельство подчеркивает большое значение оптико-механической промышленности в экономике страны. Она не только удовлетворяет спрос внутреннего рынка, но также служит орудием внешней торговли, орудием, воздействующим на промышленную технику, на научные исследования других стран. Любой машиностроительный завод, организуемый вновь в стране, где оптико-механическая промышленность развита слабо, вынужден приобретать оборудование для своих лабораторий и контрольные приборы для цехов в Германии. То же самое принуждены делать и научные лаборатории.

Фирма Цейсс делает все виды оптических приборов как для гражданских, так и для военных целей. Фирма Аскания делает научные инструменты: гониометры, геодезические инструменты, военные приборы, навигационные приборы, автопилоты и т. п. Фирма Герц, объединенная с Цейссом, изготавливает военные и гражданские приборы. Фирма Шмидт и Генш выпускает фотометры, спектрографы, гониометры и т. д. Ряд других фирм — Гейде, Лейтц и другие — делают микроскопы, фотографические аппараты, астрономические приборы и т. п.

Япония. До войны 1914—1918 гг. оптической промышленности в Японии почти не существовало. Большая часть оптических изделий ввозилась в Японию из Германии, а затем из Америки. Однако уже, во время войны имеют место попытки расширения отечественного производства оптических изделий. К концу войны некоторое количество дешевых оптических изделий японского производства появляется на международном рынке.

* Statistisches Jahrbuch f. D. Reich, Berlin, S. 263—265, 1938.

** Statistisches Jahrbuch f. D. Reich, Berlin, S. 27, 1936.

После войны Германия вновь выступила как конкурент Америки на японском рынке, но к этому времени японская промышленность уже была в состоянии удовлетворить почти полностью потребности страны в дешевых оптических изделиях. Очки японского производства широко распространяются в Китае, Европе, Африке, Индии и Америке, успешно конкурируя с продукцией Германии, Англии и Америки.

К середине 30-х годов экспорт японских оптических изделий начинает вызывать беспокойство германских промышленников, удивляющихся, „как японская промышленность сумела наладить выпуск продукции, которая с технической точки зрения почти не уступает германской, но продается на все расширяющемся рынке за половинную против германской продукции цену“*.

Цифр, характеризующих объем оптической промышленности Японии, не имеется; точно так же нет цифр, характеризующих ввоз и вывоз только оптических инструментов. Однако приведенные ниже цифры ввоза и вывоза оптического, химического и другого оборудования косвенно указывают на рост оптического производства.

Изделия \ Год	1932	1933	1934
Ввезено в Японию**			
Части микроскопов	255 480 иеп	126 766 иеп	229 576 иеп
Геодезические и чертежные инструменты	363 356 „	812 199 „	96 742 „
Физическое и химическое оборудование	1 309 505 „	1 049 537 „	1 003 171 „
Другое научное оборудование	1 681 385 „	2 140 842 „	1 264 828 „
Вывезено из Японии			
Очки	412 908 „	997 165 „	1 451 375 „
Физическое и химическое оборудование и части его	942 886 „	2 121 875 „	2 494 529 „

Сокращение ввоза и большое увеличение вывоза доказывают значительный рост собственного производства изделий оптической промышленности. Вывоз очков за три года увеличивается в три с половиной раза, вывоз физических и химических приборов увеличивается больше чем в два с половиной раза и превышает почти в два с половиной раза ввоз этих изделий.

Японская оптическая промышленность в настоящее время производит различные виды оптических приборов для научных и промышленных целей. Вместе с тем производятся также военные оптические приборы, артиллерийские панорамы, стереотрубы, перископы и т. п.

США. До войны 1914—1918 гг. в США существовал крупнейший завод по производству оптико-механических приборов—фирмы Бауш и Ломб (производство основано в 1874 г.). Сначала фирма производила микроскопы. Затем, благодаря широкой постановке научных исследований в области оптики и приложений оптических методов в промышленности и науке, расширяется номенклатура производимых изделий. Медицина, биология, бактериология, металлургия, машиностроение, астрономия, спектроскопия, спектрофотометрия, офтальмология, микроскопия, военные приборы — все эти области охвачены продукцией фирмы. Около 4000 различных типов приборов для применения в различных областях человеческой деятельности создано этой фирмой. С давних пор (1890 г.) фирма приобрела право пользоваться патентами фирмы Цейс и пользовалась этим правом, главным образом, в области производства фотообъективов.

* The Optician, vol. XC, № 2316, p. 2, 16 VIII 1935.

** The Optician, № 2316, p. 10, 16 VIII 1935.

Начиная с 1903 г., фирмой были предприняты опытные работы по производству оптического стекла, но только в 1914—1915 гг. было сварено оптическое стекло нужного качества. После вступления США в войну выяснилась необходимость организовать производство оптического стекла в более широких размерах. Наряду с другими заводами, Национальным научно-исследовательским советом была привлечена для этой цели также фирма Бауш и Ломб. Правительство направило группу химиков-силикатчиков на завод Бауш и Ломб для решения задач, связанных с производством оптического стекла. Были предприняты геолого-разведочные работы для изыскания на территории США огнеупорных глини, необходимых для горшков, требующихся при варке оптического стекла.

Кроме фирмы Бауш и Ломб, задачи, связанные с научными исследованиями и производством оптического стекла, были возложены также на Бюро стандартов США, где был организован небольшой завод оптического стекла. Вскоре этими двумя организациями оптическое стекло было получено в нужных количествах, и с тех пор производство оптического стекла в США встало на твердую почву.

В настоящее время фирма Бауш и Ломб выпускает 25 типов оптического стекла и 12 типов цветного для светофильтров. В 1940 г. оборудование завода позволяло выпускать около 150 т готового стекла (1000 горшков в год).

Наряду с заводом Бауш и Ломб в США имеются другие заводы (Спенсер, Американская оптическая компания, Гетнер, Тейлор и Гобсон, Кодак и др.), производящие различные оптические приборы для научных, промышленных и военных целей.

Некоторое представление об объеме оптической промышленности дают следующие цифры*:

Год переписи	Оптическая промышленность	Обрабатывающая промышленность	В %
1920	12 638 чел.	12 831 879 чел.	0,09
1930	14 385 "	14 110 652 "	0,1

Нижеприведенные цифры дают представление о числе предприятий и валовом выпуске оптических изделий**:

Год переписи	Число предприятий	Валовая продукция (в долларах)
1929	117	40 562 000
1933	103	26 214 000
1935	100	33 600 000
1937	96	47 461 134

Приведенные цифры, повидимому, не полно характеризуют объем оптической промышленности, так как по переписи часть фирм была учтена как фирмы, производящие оптические изделия, а часть — как фирмы, производящие инструменты и научные аппараты.

О развитии производства для выполнения программы вооружения оптическими приборами в настоящей войне можно судить по планам фирмы Бауш и Ломб***. Путем увеличения объема горшков и разделки их отливкой предполагается увеличить производство стекла в два раза. Принимая во внимание, что армия и флот создали к тому же большие запасы оптического стекла, опасения о нехватке оптического стекла, очевидно, не будут теперь иметь места, как это было в прошлую войну.

* Statistical Abstracts of the United States, p. 56 — 62, 1937, 1938.

** Ibid., p. 764, 1938.

*** Army Ordnance, v. 20, № 120, 1940.

Производительность оптико-механического завода предполагалось увеличить за два года в пять раз при сокращении гражданской продукции наполовину. Существовавший выход военных приборов должен быть увеличен в двадцать раз. Количество рабочих на заводе предполагалось увеличить на 4000 чел. Таким образом предполагается покрыть одну треть всей запланированной потребности в военных оптических приборах.

Англия. К началу войны 1914—1918 гг. снабжение оптическими приборами было неудовлетворительным. Работали 4 фирмы, производящие оптические инструменты, но этого, очевидно, было недостаточно. Поэтому так же, как и в других странах, встал вопрос о расширении производства оптического стекла и оптических приборов. Завод оптического стекла бр. Ченс, существовавший в Англии до войны, не был в состоянии покрыть возникшую в связи с войной потребность в оптическом стекле, несмотря на то, что он все время усиливал свою деятельность. Под покровительством правительства возникает новый завод оптического стекла компании Парксона. Завод провел большую исследовательскую работу по организации производства оптического стекла.

Уже во время настоящей войны появились сведения, что пущен в ход новый завод оптического стекла в Австралии.

В первую очередь решалась проблема подготовки квалифицированных кадров специалистов и рабочих. В 1917 г. был организован Комитет технической оптики. Его первоочередной задачей было организовать, обучить и дать специальную подготовку поступающим на работу в предприятия оптической промышленности. Две школы — Норс-гемптонский политехникум и Королевский колледж науки и технологии — были использованы для подготовки кадров, а также для научно-исследовательской и военной работы по заданию государственных учреждений. Надлежащим образом организованная подготовка кадров рабочих, конструкторов, производственников привела к расширению производства оптических приборов.

В настоящее время в Англии имеется несколько фирм, производящих оптические инструменты и приборы. Фирма Борр и Струд производит бинокли, дальномеры, перископы и другие военные приборы. Фирма Хильгер выпускает приборы и инструменты для научных исследований, спектрографы, спектрометры и т. п. Ряд фирм — Бек, Уатсон, Бекер и др. — делают микроскопы для разных целей. Оптические инструменты и приборы изготовляют также некоторые машиностроительные заводы (Джон, Лампсон, Вилкерс, Ньюолл и др.). Все же, повидимому, потребности внутреннего рынка в оптических приборах не покрываются полностью, так как Англия ввозила значительное количество изделий оптической промышленности из Германии.

Так, например, за 1936—1938 гг. ввезено из Германии* изделий оптической промышленности на следующие суммы (в герм. марках):

Предметы ввоза \ Год	1936	1937	1938
Зрительные трубы, бинокли полевые, театральные	234 000	290 000	316 000
Оптические измерительные инструменты, буссоли, компасы и т. д. .	64 000	537 000	217 000
Кино и проекционные аппараты всякого рода	—	276 000	311 000
Фотографические линзы, шлифованные и оправленные фотообъективы и фотоаппараты	1 764 000	2 675 000	3 027 000
Оптическое стекло шлифованное и оправленное, стереоскопы, микроскопы	741 000	449 000	479 000

* Deutsche Optische Wochenschrift, № 16, 30 VI 1939.

Из рассмотрения этих цифр следует, что ввоз изделий оптической промышленности в Англию повышался из года в год, и повышение ввоза шло за счет зрительных труб, биноклей, фотографических объективов и фотоаппаратов, т. е. изделий, требующих высокой квалификации производства.

В данный же момент английская оптическая промышленность приспособлена для снабжения армии нужными инструментами и приборами лучше, чем это было в начале прошлой войны. Все же настоящая война заставила расширять производство оптического стекла. В 1941—1942 гг. выстроены два завода оптического стекла в Австралии и в Канаде*. Однако и теперь основной задачей является подготовка кадров для промышленности, и здесь, очевидно, встречаются известные трудности, заключающиеся в том, что в Англии нет специализированных учебных заведений по подготовке работников промышленности оптических приборов. Сама промышленность также не имеет достаточных условий для технического обучения нужных кадров. Недостаток квалифицированных кадров оптиков, очевидно, заставил Объединенный чрезвычайный военный комитет образовывать специальную комиссию для выработки программы обучения оптиков для работы в частях артиллерийского снабжения, воздушных сил и других родах войск, где необходимо знание оптических и других научных инструментов, применяемых на войне**.

Франция. Производство оптического стекла организовано во Франции в 1827 г. фирмой Парра-Мантуа. Так же, как и в других странах, во время войны 1914—1918 гг. во Франции не хватало оптического стекла для изготовления оптических приборов для армии. Постепенно прекращается отпуск стекла в союзные страны. Однако и эта мера оказалась недостаточной. Появляется новый завод Северной французской компании, производящий оптическое стекло.

Существующая до войны оптическая промышленность Франции, повидимому, до некоторой степени удовлетворяла потребности армии, так как часть биноклей была продана в Россию.

В ходе войны потребности в оптических приборах возросли. Снабжение армии военными приборами стало одной из насущных задач. Так же, как и в других странах, начинает развиваться научная работа по конструированию, расчетам и производству оптических приборов.

В 1920 г. в Париже организуется Оптический институт.

Французская оптическая промышленность производит различные оптические приборы и инструменты как для промышленных и научных целей, так и для военных целей.

Общество оптико-механических приборов (SOM) делает дальномеры, перископы для подводных лодок, стереопантографы, геодезические инструменты, фотографические аппараты и т. п. Генеральное оптическое общество поставляет военному и морскому ведомствам бинокли, дальномеры, артиллерийские оптические приборы, теодолиты и т. п. Ряд других фирм производит микроскопы, гониометры, фотографические объективы, приборы для научных исследований и для контроля в промышленности.

В ряде других стран — Швейцарии, Австрии, Чехословакии, Швеции — имеются заводы, производящие оптико-механические приборы как для научных целей, так и военные. В Польше до оккупации ее Германией имелся завод, производивший военные оптические приборы.

За время, истекшее после войны 1914—1918 гг., во всех передовых странах оптическая промышленность получила большое развитие. Острая необходимость в военных оптических приборах, возникшая в результате войны, в каждой стране дала большой толчок развитию производства оптического стекла и оптических приборов.

Продукция оптических заводов, являясь предметом вооружения воюющих армий, является вместе с тем для многих стран не менее важным оружием в той экономической войне, которая характеризует отношения стран в послевоенный период.

* Nature, v. 149, № 3791, p. 736, 1942; № 3784, p. 518—519, 1942.

** The Optician, v. XCVIII, № 2534, p. 177, 20 X 1939.

Если в этих войнах оптическое вооружение временами и откладывается в сторону, то в других областях, а именно в научной деятельности, в технологии производства, в здравоохранении, в области культуры, т. е., в конечном итоге, в борьбе человека с природой, оптическое вооружение никогда не будет отложено в сторону и непрерывно будет совершенствоваться в процессе этой борьбы.

Каждая страна, где оптическая промышленность стоит на должной высоте и где ей уделяется должное внимание, при прочих равных условиях может рассчитывать на более быстрый прогресс в хозяйственном и научном отношении. Такая страна не окажется также безоружной в смысле снабжения оптическими военными приборами в случае войны, так как легче перестроить промышленность на выпуск нужных военных приборов, нежели создавать ее заново.

В Советском Союзе нет надобности заново создавать оптическую промышленность и производство оптического стекла, как это было в России во время войны 1914—1918 гг. Все виды оптических военных приборов и оптическое стекло имеют марки советских заводов, построенных в стране за последние 15—20 лет.

Раздел I

СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Глава I

ПРИРОДА И СВОЙСТВА СВЕТА

§ 1. Общие представления о свете. § 2. Волновое движение и его законы. § 3. Электромагнитные волны. § 4. Принцип наложения. § 5. Распространение света в среде. § 6. Ослабление света при поглощении и отражении. § 7. Диффракция света. § 8. Распространение света в кристаллах. § 9. Испускание и поглощение света. § 10. Тепловое излучение. § 11. Измерение лучистой энергии. § 12. Источники света и их свойства. § 13. Действия света.

§ 1. Общие представления о свете

Учение о свете — оптика — охватывает огромную совокупность разнообразных явлений, начиная от самых простейших и хорошо нам знакомых, например прямолинейности распространения света, его отражения и преломления, и кончая такими тонкими, как диффракция — загибание света при прохождении сквозь малые отверстия или при наличии препятствий малых размеров. В оптику, в широком смысле слова, входит изучение не только видимого света, но и невидимых лучей — инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновых. Сюда же, по существу, относится и рассмотрение свойств радиоволн. Все эти виды излучения имеют одинаковую природу — электрическую, обладают способностью распространяться в пространстве и могут быть изучены с общей точки зрения. В настоящее время, в результате всего развития оптики, мы можем не только объяснить различные частные свойства света, видимого и невидимого, но имеем и стройную теорию световых явлений, позволяющую ответить на вопрос о том, в каких условиях какие свойства света будут проявляться.

Задачей данной вводной главы является краткое изложение основных положений современного учения о свете, знакомство с которым должно способствовать ясному пониманию дальнейшего содержания книги. Поэтому предметом этой главы является физическая оптика, рассматривающая природу света, его законы и свойства.

Лучистая энергия. Важнейшее свойство света — это его способность переносить энергию.

Падая на тела, свет оказывает разнообразные действия. Прежде всего, тела при поглощении света нагреваются; достаточно указать на нагревание поверхности земли и атмосферы солнечными лучами. Под действием света возникают электрические токи (фотоэлектрический эффект); на этом явлении основаны специальные приборы, дающие ток при освещении — фотоэлементы, которые широко используются в технике. Свет оказывает химические воздействия, вызывая фотохимические реакции; примером могут служить процессы в зеленых частях растений, содержащих хлорофилл, — под влиянием света начинаются реакции, ведущие к связыванию углекислого газа воздуха; другим примером является действие света на фотографическую пластинку. Далее, в результате физико-химических действий света в глазу возникает зрительное ощущение. Свет оказывает

на тела и некоторое давление (световое давление), хотя и очень малое, которое может быть обнаружено при помощи чувствительных приборов. При этих действиях света появляются различные виды энергии — тепловая, электрическая, химическая и т. д. Источником ее служит энергия падающего света — падающих лучей, видимых и невидимых, которую иногда называют лучистой энергией. Лучистая энергия, в свою очередь, возникает в источниках света за счет других видов энергии. Накаленные тела светятся — мы имеем превращение тепловой энергии в лучистую. Химические реакции сопровождаются свечением за счет освобождающейся химической энергии; примером является свечение обычного пламени. В разрядной трубке газ светится за счет электрической энергии и т. д.

При превращении лучистой энергии в другие виды и при превращениях других видов энергии в лучистую выполняется один из основных законов природы — закон сохранения энергии.

Определенному количеству лучистой энергии соответствуют определенные количества других видов энергии. В соответствии с этим лучистую энергию можно измерять в любых единицах, в которых измеряются другие виды энергии, в частности в эргах или джоулях, или же в калориях. Так, например, лучистую энергию, получаемую землей от солнца, выражают обычно в калориях. Измерениями установлено, что на 1 см^2 поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, на границе атмосферы падает в 1 мин. 1,94 кал. Это число (солнечная постоянная) дает меру лучистой энергии, излучаемой солнцем.

Лучистую энергию, переносимую в единицу времени, называют лучистым потоком. Так как энергия, затрачиваемая в единицу времени, определяет мощность, то лучистый поток есть мощность переноса энергии светом. Его измеряют в единицах мощности, например в ваттах, т. е. в джоулях в секунду. В приведенном примере солнечной постоянной мы имеем через 1 см^2 лучистый поток.

$$1,94 \frac{\text{кал}}{\text{мин}} = \frac{1,94 \text{ кал}}{60 \text{ сек}} = \frac{1,94}{60} \cdot 4,185 \frac{\text{джоуль}}{\text{сек}} = 0,135 \text{ ватт (1 кал.} = 4,185 \text{ ватта)}.$$

Скорость света. Лучистая энергия не существует в неподвижном виде — она распространяется в пространстве, во все стороны от источника света. Распространение света происходит как в веществе (тела, пропускающие свет, называются прозрачными), так и в пустоте. Как было установлено уже в XVII в. и неоднократно проверено дальнейшими опытами, свет распространяется не мгновенно, а с определенной скоростью; согласно наиболее точным измерениям она равна 299 780 км/сек. Округляя, имеем значение скорости света

$$c = 300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}} = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

Благодаря такой скорости, огромной по сравнению с обычными скоростями движения, с которыми мы встречаемся на практике (например, со скоростью вылета снаряда или пули), распространение света представляется нам мгновенным.

Волновые и корпускулярные свойства света. Естественно встает вопрос о природе света. Распространение света с определенной скоростью во все стороны от источника света и связанный с этим перенос энергии можно объяснить, исходя из двух различных представлений о природе света, между которыми, вплоть до последнего времени, происходила борьба. Согласно одному представлению, свет есть поток мельчайших частиц — корпускул, испускаемых источником света и летящих прямолинейно во все стороны (корпускулярная теория света). Согласно другому представлению, свет есть вид волнового движения, и испускание света — это возбуждение этих волн, распространяющихся во все стороны от источника света подобно тому, как бегут волны по поверхности воды от брошенного в него камня (волновая теория света). С точки зрения первого представления — энергию несут с собой частицы; с точки зрения второго представления — происходит передача энергии волнового движения от точки к точке. Корпускулярная теория света дает естественное объяснение одних оптических явлений и законов (например, прямоли-

нейного распространения света, законов испускания и поглощения света), а волновая теория — других (например, поляризации — направленности световых колебаний, дифракции).

Согласно нашим привычным, повседневным понятиям представляется, что лишь одна из этих теорий может быть правильной — либо свет есть поток частиц, либо волновое движение. Однако по современным теоретическим представлениям свет обладает как корпускулярными свойствами (т. е. свойствами частиц), так и волновыми свойствами одновременно, не являясь, однако, ни частицей, ни волной, как мы их обычно рисуем себе, ни каким-то „соединением“ частицы и волны. Противоречивость волновых и корпускулярных свойств лежит в самой сущности оптических явлений, и поэтому вполне законно пользоваться для объяснения одних явлений понятием о свете как о потоке частиц, а для объяснения других явлений — понятием о свете как о волнах. Между обоими представлениями существует вполне определенная связь, и они друг друга дополняют, давая возможность объяснения всех оптических явлений.

В §§ 2—8 данной главы рассмотрено учение о волнах и дано на его основе объяснение ряда явлений, связанных с распространением света. Далее изложены на основе корпускулярных представлений вопросы об испускании и поглощении лучистой энергии (§§ 9, 10), затем вопросы об ее измерении и об источниках света (§§ 11, 12). Наконец, в § 13 разобраны некоторые действия света.

§ 2. Волновое движение и его законы

Волны — это процесс распространения колебаний. В любой волне, например на поверхности воды или в звуке, в каждой точке происходит колебательное движение вокруг некоторого исходного положения равновесия. Простейшим видом колебательного движения является гармоническое колебание.

Свойства гармонического колебания. Для частицы, совершающей гармоническое колебание, отклонение y частицы от положения равновесия O (рис. 1 а) определяется в каждый момент времени t формулой вида

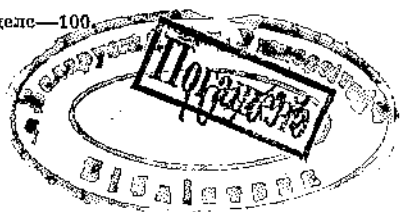
$$y = A \cos 2\pi \frac{t}{T}, \quad (2.1)$$

где A и T — постоянные. Мы имеем

$$\begin{aligned} t=0 & \quad y = A \cos 2\pi \frac{0}{T} = A \cdot 1 = A, \\ t=\frac{T}{4} & \quad y = A \cos 2\pi \frac{1}{4} = A \cos \frac{\pi}{2} = 0, \\ t=\frac{T}{2} & \quad y = A \cos 2\pi \frac{1}{2} = A \cos \pi = -A, \\ t=\frac{3}{4}T & \quad y = A \cos 2\pi \frac{3}{4} = A \cos \frac{3}{2}\pi = 0, \\ t=T & \quad y = A \cos 2\pi = A, \\ t=\frac{5}{4}T & \quad y = A \cos 2\pi \frac{5}{4} = 0, \\ & \dots \end{aligned}$$



С течением времени y меняется по тому же закону, как косинус меняется в зависимости от угла. Если отложить по горизонтали (абсциссе) время t , а по вертикали (ординате) — отклонение y , то мы получаем график гармонического колебательного движения. За время T — период колебаний — частица совершает полное колебание вверх и вниз. Наибольшее отклонение равно A , оно определяет размах колебаний и называется амплитудой. Величину $2\pi \frac{t}{T}$ называют фазой колебаний. Через промежутки времени T , $2T$, $3T$ и так далее



мы всегда получаем то же самое отклонение (например, в моменты t' и t'' на графике рис. 1 б), как говорят, — колебание находится в той же фазе*.

Частота колебаний ν — число периодов в единицу времени — равна

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (2,2)$$

Например, если $T = \frac{1}{50}$ сек. = 0,02 сек., то $\nu = \frac{1}{0,02} = 50$. Формула (2,1) запишется в виде

$$y = A \cos 2\pi \nu t. \quad (2,3)$$

Согласно (2,1) или (2,3), в начальный момент времени при $t=0$ $y=A$. В более общем случае

$$y = A \cos \left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi \right) = A \cos (2\pi \nu t + \varphi), \quad (2,4)$$

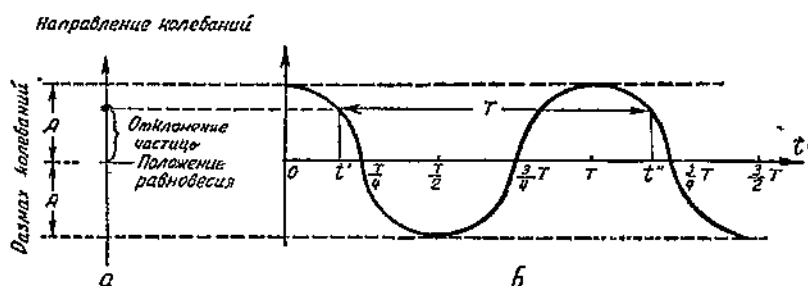


Рис. 1

где постоянная φ — начальная фаза — определяет состояние колебания в начальный момент. Например, если $\varphi = \frac{T}{4}$, то при $t=0$ $y=0$. Введение φ означает лишь сдвиг графика рис. 1 на некоторую величину.

Как можно показать, для частицы, совершающей гармонические колебания, энергия колебания пропорциональна квадрату амплитуды A , т. е. колебание с двойной амплитудой имеет учетверенную энергию.

Волновое движение. В волне колебательное движение передается от данной частицы к соседней. При этом каждая следующая частица начинает колебаться позже предыдущей и поэтому запаздывает в своем движении, — отстает по фазе. На рис. 2 изображено положение колеблющихся частиц в последовательные моменты времени. a соответствует тому моменту, когда первая частица отклонилась на A , соседняя — несколько меньше, следующая — еще меньше и т. д.; наконец, частица h только начинает колебаться. b соответствует положению через время $\frac{T}{4}$, — частица h вернулась в положение равновесия, частица k отклонилась на A ,

частица l только начинает колебаться. c соответствует времени $\frac{T}{2}$ и т. д. Стрелки показывают направление движения частиц в соответствующий момент времени. За время T волна успевает распространиться на расстояние λ , — наименьшее расстояние между частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, например h и p или l и r . Это расстояние — длина волны — есть расстояние между соседними гребнями или же соседними впадинами волны. Скорость волны, т. е. расстояние, на которое она распространяется за единицу времени, будет

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu; \quad (2,5)$$

* Увеличение t на T дает увеличение фазы $2\pi \frac{t}{T}$ на 2π ; рассматривая фазу как угол, мы получаем прежнее значение угла. Фазу можно измерять в градусах, что обычно и делается.

таким образом, на расстоянии x укладывается число длин волн, равное частоте. На единице длины укладывается

$$\nu' = \frac{1}{\lambda} \quad (2,6)$$

длин волн. ν' называют волновым числом. Очевидно,

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = v\nu'. \quad (2,7)$$

Основную формулу (2,5) можно также записать в виде

$$\lambda = vT. \quad (2,8)$$

Скорость распространения v , длина волны λ и частота ν являются основными характеристиками волнового движения.

При этом согласно (2,5) или (2,8) достаточно задания двух из этих величин, чтобы найти третью.

Легко выразить математически колебание в любой точке волны в любой момент времени. Частица, находящаяся на расстоянии λ от частицы h , начинает колебаться на время T позже и будет отставать по фазе на $2\pi \frac{T}{T} = 2\pi$, а частица на расстоянии x будет отставать в $\frac{x}{\lambda}$

раз больше, т. е. на $2\pi \frac{x}{\lambda}$. Поэтому для этой частицы фаза будет меньше на $2\pi \frac{x}{\lambda}$, и мы имеем

$$\begin{aligned} y &= A \cos \left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) = \\ &= A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (2,9)$$

Формула (2,9) дает для моментов времени $t=0, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \dots$ как раз распределение отклонений, изображенное на рис. 2. Это есть распределение отклонений вдоль направления распространения волны — вдоль луча, и обычно уравнение (2,9) называют уравнением луча. Скорость волны есть скорость перемещения всего распределения отклонений как целого. В самом деле, если в точке x_1 мы имеем в момент времени t_1 отклонение y_0 , то соответствующая фаза будет

$$\alpha = 2\pi \left(\frac{t_1}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right). \quad (2,10)$$

Такая же фаза и, следовательно, такое же отклонение в момент времени t_2 будет в точке x_2 , для которой

$$2\pi \left(\frac{t_2}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = 2\pi \left(\frac{t_1}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right). \quad (2,11)$$

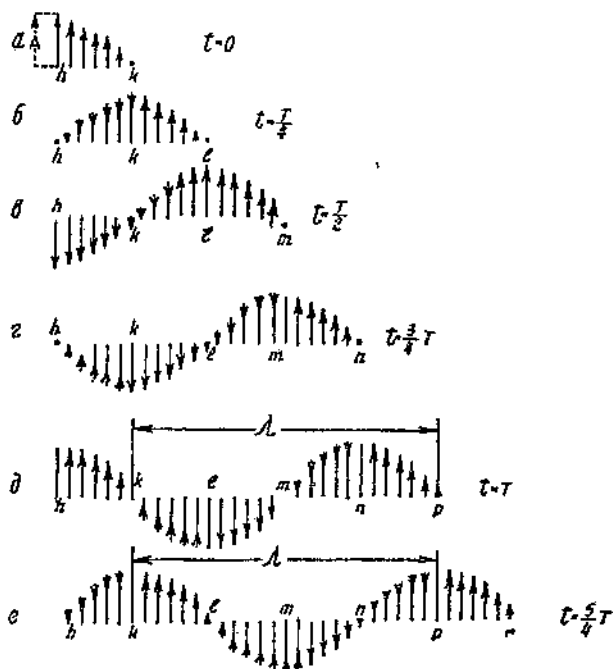


Рис. 2

Из (2,11) получаем

$$\frac{x_2 - x_1}{\lambda} = \frac{t_2 - t_1}{T} \quad (2,12)$$

или, согласно (2,5), $x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1)$.

Итак, за время $t_2 - t_1$ заданное отклонение y_0 переместилось со скоростью v на расстояние $x_2 - x_1$. Любое другое отклонение переместится за это время на такое же расстояние, т. е. волна действительно перемещается как целое.

Фронт волны. До сих пор мы рассматривали распространение волны лишь вдоль некоторой прямой, — вдоль некоторого луча, однако в действительности волна всегда распространяется более или менее широким фронтом. Простейший случай представляет собой плоская волна, для которой в любой плоскости, перпен-

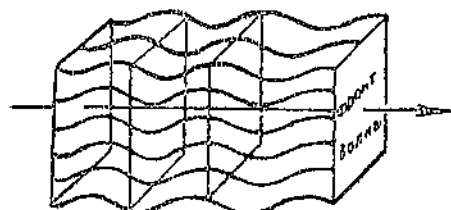


Рис. 3

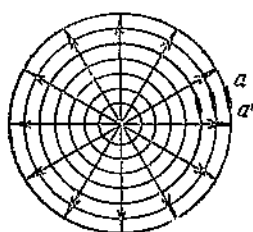


Рис. 4

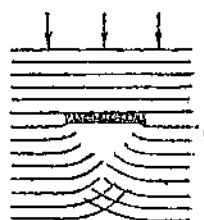


Рис. 5

дикулярной направлению распространения, колебания проходят в одной фазе (рис. 3). Поверхность, до которой колебания доходят в некоторый момент времени, называют **фронтом волны**; во всех точках такой поверхности колебания имеют одинаковую фазу. Для плоской волны мы имеем, таким образом, плоскость в качестве фронта волны. Для шаровой (сферической) волны, излучаемой некоторым источником света, фронт волны имеет вид сферы (рис. 4), — во всех точках любой сферы, описанной вокруг источника света, фаза колебаний одинакова. На достаточно большом расстоянии от источника света отдельный участок фронта волны (aa' на рис. 4) можно всегда рассматривать как плоский, что сильно упрощает решение ряда вопросов. Перпендикуляры к фронту волны определяют направление распространения энергии и представляют собой лучи света.

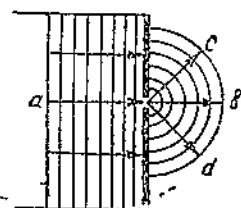


Рис. 6



Рис. 7



Рис. 8

Прямолинейное распространение света. На первый взгляд кажется, что прямолинейное распространение света противоречит волновым представлениям. В самом деле, волны огибают препятствия (рис. 5), это имеет место, например, при распространении звука; пройдя через некоторое отверстие, волны расходятся во все стороны, как изображено на рис. 6; получается непрямолинейное распространение света, например от a к c и d . С другой стороны, лучи света, распространяясь прямолинейно, задерживаются препятствиями, благодаря чему образуется тень (рис. 7).

Объяснение подобного противоречия состоит в следующем. Загибание волн в заметной степени происходит лишь для препятствий малых размеров и при прохождении через малые отверстия. Картина, изображенная на рис. 6, меняется,

если изменять величину отверстия; по мере увеличения последнего расхождение лучей уменьшается (рис. 8 а, б), и при очень большом отверстии получается ограниченный плоский фронт волны, что соответствует прямолинейному распространению лучей (рис. 8 в) с образованием тени. Таким образом, все дело в размерах препятствий или отверстий, встречаемых волной на своем пути. При этом существенны не размеры сами по себе (абсолютные значения), а размеры по сравнению с длиной волны (т. е. относительные значения). Загибание волн — диффракция, — как в случаях, изображенных на рис. 5, 6, 8 а и б, наблюдается для препятствий (или отверстий), не превышающих по величине многих длин волн. Когда же они велики по сравнению с длиной волны, то диффракция отсутствует и имеет место прямолинейное распространение. Для видимого света длины волны очень малы (несколько десятитысячных миллиметра, см. стр. 23) и уже расстояния, измеряемые миллиметрами и сантиметрами, относительно очень велики, поэтому в обычных условиях можно считать, что свет распространяется прямолинейно.

Диффракцией света во многих случаях можно пренебрегать, и лишь иногда она играет существенную и даже определяющую роль (§ 7).

Поляризация волны. Мы рассмотрели распространение волн; важен и вопрос о направлении самих колебаний по отношению к направлению распространения. В волнах, изображенных на рис. 2 и 3, движение в каждой точке происходит перпендикулярно этому направлению. Такие волны называются попереч-

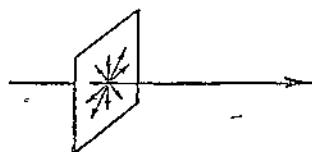


Рис. 9

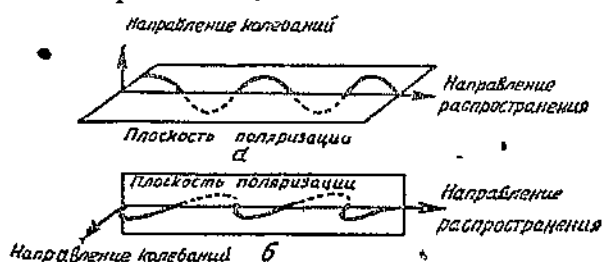


Рис. 10

ными, в отличие от продольных волн, для которых колебания происходят в направлении распространения, как, например, в звуковых волнах в воздухе. Для поперечных волн возможны самые разнообразные направления колебаний в плоскости, перпендикулярной направлению распространения (рис. 9), и поэтому существенно задание действительного направления колебаний, или, как принято говорить, их поляризации. Колебания, происходящие вдоль вполне определенного направления, называют линейно поляризованными, а плоскость колебаний, ему перпендикулярную и проходящую через направление распространения, называют плоскостью поляризации. На рис. 10 а изображены колебания с горизонтальной, а на рис. 10 б — с вертикальной плоскостью поляризации. Явление поляризации характерно именно для поперечных волн, поэтому волновые свойства света, для которого оно наблюдается, должны описываться при помощи поперечных волн. Только с такими волнами мы и будем иметь дело в дальнейшем.

§ 3. Электромагнитные волны

До сих пор мы рассматривали волны совершенно общим образом, не уточняя вопроса о том, что именно колеблется. Все изложенное справедливо как для колебаний среды, состоящей из частиц, так и для силового поля, т. е. пространства, в каждой точке которого действуют силы. Мы говорили о колебаниях частиц, но в наших рассуждениях ничего не изменится, если величиной, меняющейся по закону (2,9), является переменная во времени и пространстве сила. Именно такой случай мы имеем для света.

Электромагнитная теория света. Волновые свойства света полностью объясняются на основе электромагнитной теории, созданной в середине XIX в.

Максвеллом, согласно которой свет представляет собой электромагнитные волны. Световые явления представляют собой частный случай электрических явлений, и электромагнитная теория света со всеми ее выводами полностью справедлива в той мере, в какой вообще можно трактовать свет как волновое движение, отвлекаясь от его корпускулярных свойств.

Рассмотрим подробнее электромагнитные волны. Как известно, электрические заряды создают постоянное электрическое поле — в каждой точке окружающего заряд пространства имеется электрическая сила, действующая на помещаемый в эту точку заряд. Постоянный электрический ток создает постоянное магнитное поле, — в каждой точке окружающего ток пространства имеется магнитная сила, которая действует на помещенный туда ток или магнит. Линии электрической силы и линии магнитной силы имеют вид, изображенный на рис. 11 а и б.

В электромагнитных волнах мы имеем одновременно и электрическое поле и магнитное поле, но уже не постоянные, а переменные. В каждой точке волны имеется электрическая сила E и магнитная сила H ; они равны по величине, взаимно перпендикулярны по направлению и меняются во времени и в пространстве по закону (2,9)

$$E = H = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (3,1)$$

Изображая электрическую и магнитную силу стрелками, мы получаем картину, показанную на рис. 12 и совершенно подобную (для электрической и для магнитной

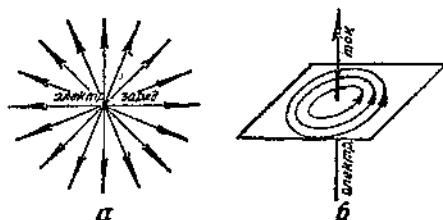


Рис. 11

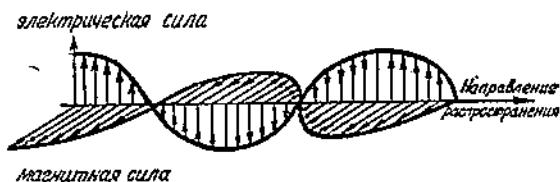


Рис. 12

силы в отдельности) картине рис. 2. Электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом и распространяются в пространстве со скоростью $v = \frac{\lambda}{T}$, образуя электромагнитную волну. Возможность распространения таких волн вытекает из основных законов электричества и магнетизма; она обусловлена связью, существующей между изменениями электрического и магнитного поля, — при изменении магнитного поля во времени возникает электрическое поле, меняющееся от точки к точке, а при изменении электрического поля возникает магнитное поле, меняющееся от точки к точке. Скорость распространения в пустоте получается вполне определенная и не зависящая от длины волны*.

Электромагнитные волны являются поперечными и поэтому обнаруживают поляризацию. Основные действия света обусловлены электрической силой, именно она определяет действительное направление световых колебаний, соответственно этому плоскость поляризации совпадает с плоскостью, в которой лежат магнитные силы. Таким образом, для электромагнитной волны, изображенной на рис. 12, осуществлен случай рис. 10 а.

Энергия электромагнитной волны складывается из электрической энергии, пропорциональной квадрату амплитуды электрической силы, и из магнитной энергии, пропорциональной квадрату амплитуды магнитной силы. Сумма этих энергий и представляет собой полную лучистую энергию.

* Эта скорость может быть определена из электрических и магнитных измерений. Равенство получающейся величины скорости света, определенной оптическими способами, и послужило в 1864 году Максвеллу основным доводом в пользу его электромагнитной теории света.

Шкала электромагнитных волн. Различные виды излучения — видимый свет, ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, радиоволны и т. д. — представляют собой электромагнитные волны, существенно отличающиеся лишь в одном отношении — по длине волны, или, что то же самое, по частоте. Длина волны может меняться от каких угодно больших величин до очень малых, — 10^{-10} см и меньше. В зависимости от длины волны меняются свойства электромагнитных волн, способы их получения и их действие. На рис. 13 дана шкала электромагнитных волн, в которой указаны участки, соответствующие различным видам излучения. Волны видимого света занимают лишь малый участок, соответствующий, примерно, длинам волн от 0,38 до 0,78 десятитысячных сантиметра*; со стороны длинных волн к ним примыкают инфракрасные лучи, со стороны коротких волн — ультрафиолетовые лучи.

Первые обычно обнаруживаются по их тепловому действию, а вторые — по их химическому действию на фотографическую пластинку**.

Видимые, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи излучаются частицами вещества — атомами и молекулами, именно их обычно и называют светом. За инфракрасными лучами лежит область радиоволн, излучаемых электрическими колебательными контурами, содержащими емкость и самоиндукцию (передатчиками); за ультрафиолетовыми лучами идут рентгеновые лучи, получающиеся при торможении отрицательных зарядов — электронов, за счет уменьшения энергии последних (при ударе об электрод рентгеновой трубки), и лучи-гамма (γ), излучаемые центральной частью атомов — атомными ядрами. Переход от одного вида излучения к другому при изменении длины волны является постепенным, и границы, указанные в шкале, являются лишь примерными.

В электромагнитной шкале, приведенной на рис. 13, даны длины волн в сантиметрах и соответствующие частоты колебаний, кроме того, приведены единицы, в которых обычно измеряются данные виды волн. Для видимых лучей такими единицами являются ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ см) и миллимикрон ($1 \text{ мкр} = 10^{-7}$ см). Таким образом, область видимых лучей охватывает длины волн

от $3800 \text{ \AA}$ до $7800 \text{ \AA}$
или от 380 мкр до 780 мкр .

* См. ниже стр. 230.

** Поэтому инфракрасные лучи называют тепловыми, а ультрафиолетовые — химическими. Нужно, однако, помнить, что как тепловое, так и химическое действие оказывают и другие виды излучения и эти названия имеют лишь условное значение.

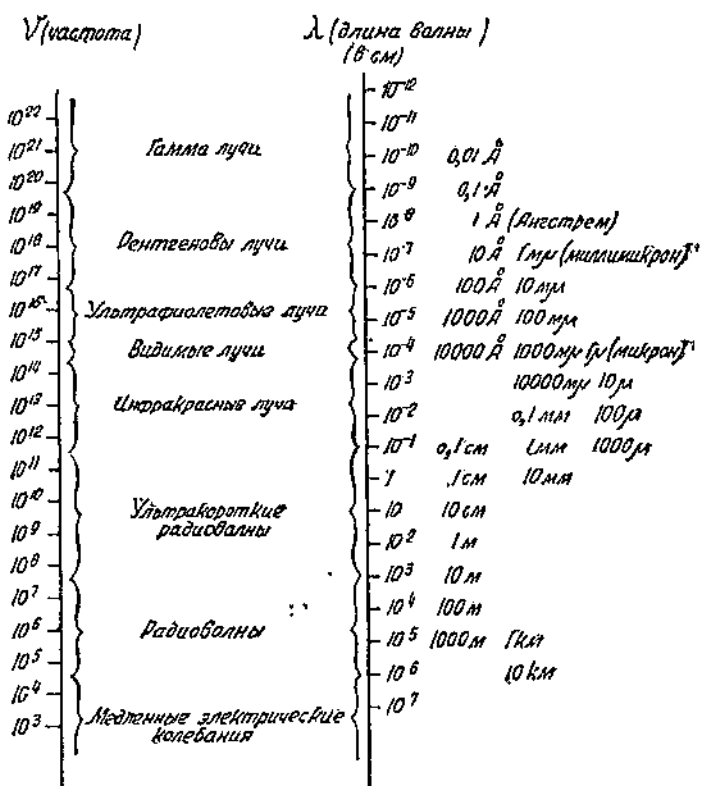


Рис. 13

Монохроматический свет. Излучение определенной длины волны называют монохроматическим. Для такого излучения все явления происходят в наиболее простой форме. Однако обычно на практике приходится иметь дело со смешанным излучением, содержащим различные длины волн.

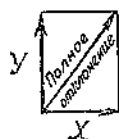
В видимой области монохроматические лучи разной длины волны воспринимаются нашим глазом как лучи различного цвета. Отдельным участкам шкалы длин волн видимого света примерно соответствуют следующие цвета (длины волн даны в миллимикронах):

380 — 450 фиолетовый	550 — 575 желто-зеленый
450 — 480 синий	575 — 585 желтый
480 — 510 голубой	585 — 620 оранжевый
510 — 550 зеленый	620 — 780 красный

Здесь идет речь о цвете, воспринимаемом при наблюдении монохроматического света. Такое же цветовое впечатление может создаваться сложным светом надлежащего состава.

§ 4. Принцип наложения

Волновые представления позволяют объяснить большое количество явлений на основе очень общего принципа наложения (суперпозиции) колебаний. Согласно этому принципу, если в некоторой точке пространства одновременно имеются два колебания, то каждое из них происходит так, как если бы другого не было. Иначе говоря, отклонение y_1 , обусловленное одним колебанием, не зависит от наличия в данной точке пространства второго колебания. Если второе колебание происходит в том же направлении и характеризуется отклонением y_2 , то полное отклонение будет просто алгебраической суммой отклонений.



$$y = y_1 + y_2. \quad (4,1)$$

Рис. 14 Два колебания различного направления будут складываться как направленные отрезки по правилу параллелограмма. Рис. 14 показывает подобное геометрическое (векторное) сложение для случая двух взаимно перпендикулярных колебаний, характеризующихся отклонениями x и y .

При одновременном распространении двух волн происходит наложение колебаний в каждой точке пространства в каждый момент времени. При этом для электромагнитных волн принцип наложения всегда выполняется и притом совершенно строго* — это есть простое следствие закона сложения электрических и магнитных сил, согласно которому полная сила (электрическая или магнитная) в заданной точке есть равнодействующая (геометрическая сумма) составляющих сил.

Благодаря справедливости принципа наложения в пространстве одновременно может распространяться ряд волн, не влияя друг на друга.

Сложение колебаний одного направления. Согласно формуле (4, 1) два колебания одного направления складываются алгебраически. При таком сложении колебаний одной и той же частоты наблюдаются весьма характерные явления интерференции колебаний. Пусть имеются два колебания с одинаковой фазой и с амплитудами A_1 и A_2

$$y_1 = A_1 \cos 2\pi\nu t,$$

$$y_2 = A_2 \cos 2\pi\nu t.$$

* Для механических колебаний это не всегда имеет место: для очень больших отклонений полное отклонение может уже не равняться сумме отдельных отклонений. Такие колебания называются нелинейными. Для малых отклонений и для механических колебаний принцип наложения будет справедлив.

В результате сложения получается колебание

$$y = y_1 + y_2 = (A_1 + A_2) \cos 2\pi\nu t \quad (4,2)$$

с той же частотой и с амплитудой, равной сумме амплитуд. Колебания усиливают друг друга. Если амплитуды одинаковы ($A_1 = A_2 = A$), то амплитуда колебаний просто удваивается. Графическое сложение колебаний в любой момент времени показано на рис. 15 а.

Пусть теперь колебания имеют фазы, отличные на 180° , т. е. на π (противоположные фазы), иначе говоря, одно колебание отстает от другого на полпериода.

$$\begin{aligned} y_1 &= A_1 \cos 2\pi\nu t, \\ y_2 &= A_2 \cos (2\pi\nu t - \pi) = -A_2 \cos 2\pi\nu t. \end{aligned}$$

Тогда получаем колебание

$$y = y_1 - y_2 = (A_1 - A_2) \cos 2\pi\nu t \quad (4,3)$$

с той же частотой и с амплитудой, равной разности амплитуд. Колебания ослабляют друг друга. Если $A_1 = A_2$, то полная амплитуда равна нулю — колебания взаимно уничтожаются (рис. 15 б).

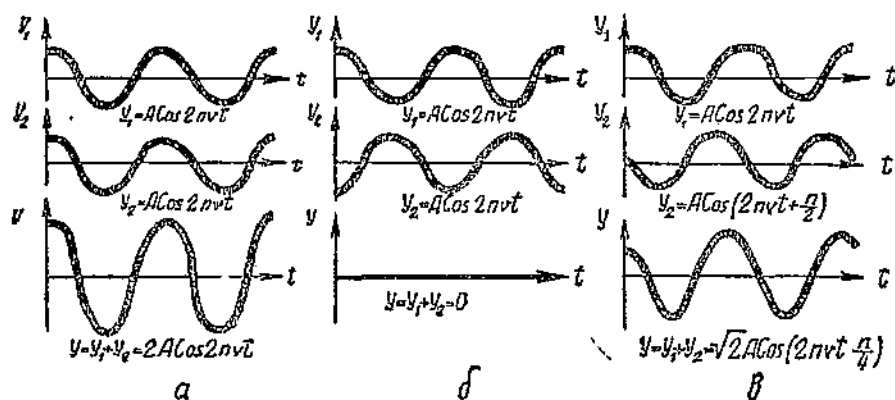


Рис. 15

В случае, когда фазы разнятся по фазе на величину между 0° и 180° , получается колебание с той же частотой и с амплитудой меньшей, чем $A_1 + A_2$, но большей, чем $A_1 - A_2$. Например, при разности фаз 90° ($\frac{\pi}{2}$), т. е. когда одно колебание опережает другое на четверть периода, и при $A_1 = A_2 = A$ получается колебание с амплитудой $\sqrt{2}A$ и с начальной фазой $\frac{\pi}{4}$ (рис. 15 в).

Явление взаимного усиления и ослабления при наложении двух колебаний одинаковой частоты и направления и называется интерференцией колебаний.

Интерференция волн. Рассмотрим теперь результат наложения двух волн одинаковой частоты, следовательно обладающих одинаковой длиной волны. Пусть две такие волны распространяются из точек A и B , как показано на рис. 16а; сплошными линиями отмечены гребни волн, пунктирными — впадины в некоторый момент времени. В точках, в которых налагаются колебания с одинаковой фазой, например гребень на гребень (точки a, c, g, i) или впадина на впадину (точки d, f), колебания усиливают друг друга; в точках, в которых налагаются колебания с противоположной фазой, например гребень на впадину (точки b, e, h), колебания ослабляют друг друга. Получается интерференция волн. На рис. 17 приведена фотография, показывающая подобную интерференцию волн на поверхности воды, темные линии соответствуют местам, где волны взаимно уничтожаются.

Легко определить условия для точек наибольшего усиления колебаний (максимумов) и наибольшего ослабления колебаний (минимумов), в зависимости от их расстояний от источников волн A и B . В точку a , отстоящую на равном расстоянии от A и B (рис. 16б), приходят колебания с одинаковой фазой, и получается максимум. В точке b , для которой расстояния Ab и Bb — пути лучей — разнятся как раз на полволны ($\lambda/2$), одно из колебаний отстает от другого на полпериода, фазы противоположны, и получается минимум. В точке c , для которой Ac и Bc разнятся на одну длину волны λ , колебания опять имеют одинаковую фазу, и

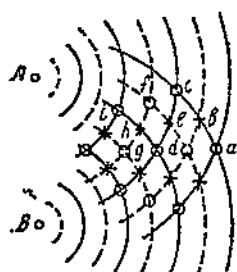


Рис. 16а

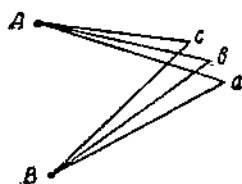


Рис. 16б

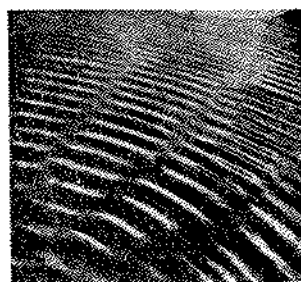


Рис. 17

снова получается максимум. Вообще при разности путей лучей, или, как ее обычно называют, при разности хода, равной $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ наблюдается наибольшее усиление колебаний; при разности хода $\lambda/2, 3/2\lambda, 5/2\lambda, \dots$ — наибольшее ослабление колебаний. На рис. 18 результат наложения в зависимости от разности хода показан для двух волн, распространяющихся в одном и том же направлении,

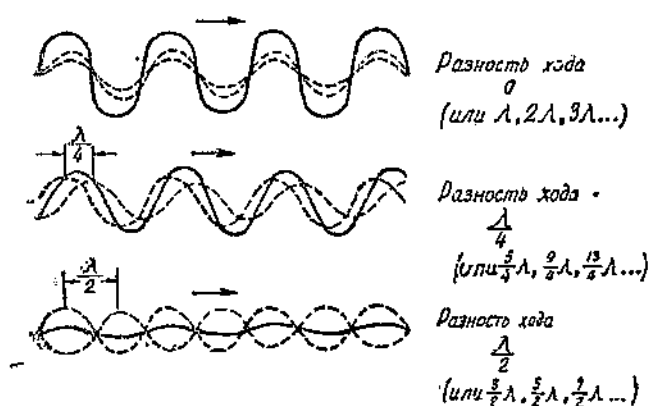


Рис. 18

указанном стрелкой; пунктиром показаны отдельные волны, а сплошной линией — результат их наложения.

Интерференция — весьма характерное волновое явление. Она наблюдается для света в весьма разнообразных формах и является лучшим дока-

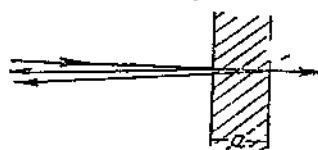


Рис. 19

зательством наличия у света волновых свойств. Существенно отметить, что два различных источника, испускающих световые колебания одинаковой частоты, никогда не сохраняют между собой постоянной разности фаз, по этой причине интерференция от двух различных источников света не может получиться. Колебания с постоянной разностью фаз — когерентные колебания, которые только и способны давать интерференцию (интерферировать), осуществляются при разделении первоначального луча на два луча.

Подобный случай представляет собой интерференция в тонких слоях. Пусть луч света падает перпендикулярно поверхности на прозрачный слой, например тонкую стеклянную пластинку, толщины d (рис. 19). Он частично отражается на поверхности слоя (луч 1), частично проходит и опять частично отражается на другой поверхности слоя (луч 2). Между лучами 1 и 2 получается постоянная разность хода, равная удвоенной толщине слоя $2d$ (луч 2, очевидно, проходит

путь на $2d$ больший, чем луч I). Лучи когерентны и интерферируют. Максимум света получается при

$$2d = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, \quad (4,4)$$

т. е. при

$$d = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots, \quad (4,5)$$

а минимум при

$$d = \frac{\lambda}{4}, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots * \quad (4,6)$$

Если толщина слоя неодинакова в разных местах, то при освещении монохроматическим светом отдельные участки слоя будут казаться светлыми или темными, в зависимости от того, выполняется в данном месте условие (4,5) или условие (4,6). При освещении сложным светом тонкий слой будет казаться окрашенным в разнообразные цвета, что связано с различием этих условий для волн различной длины, составляющих сложный свет. Подобная картина наблюдается, в частности, в тонком слое нефти на поверхности воды, в мыльных пузырях и т. д. По картине интерференции можно судить о постоянстве толщины данного слоя, например стеклянной пластинки. Наблюдая интерференцию в воздушном слое между известной поверхностью и испытываемой поверхностью, можно определить качество изготовления последней.

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. В отличие от случая сложения колебаний одного направления, при сложении (геометрическом) взаимно перпендикулярных колебаний одинакового периода интерференции не проис-

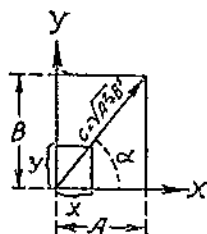


Рис. 20

ходит, зато получается характерное явление, связанное с поляризацией волн.

Если мы имеем два таких линейных колебания с одинаковой фазой, направленные по осям OX и OY (рис. 20),

$$x = A \cos 2\pi \nu t \text{ и } y = B \cos 2\pi \nu t,$$

то, складываясь, они дают линейное колебание с амплитудой $c = \sqrt{A^2 + B^2}$, направленное под углом α к оси OY , где $\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} = \frac{B}{A}$. Обратно, линейные колебания в этом направлении можно разложить на линейные колебания по осям OX и OY с амплитудами $c \cos \alpha$ и $c \sin \alpha$. При распространении по оси OZ двух линейно-поляризованных волн, колебания в которых взаимно перпендикулярны и одинаковы по фазе (рис. 21), мы получим в результате их наложения опять линейно-поляризованную волну, колебания в которой будут составлять угол α ($\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{A}$) с горизонтальной плоскостью XZ .

Сложнее обстоит дело при сложении взаимно перпендикулярных колебаний с разными начальными фазами. Например, если разность фаз равна $\frac{T}{2}$, а амплитуды одинаковы, мы имеем

$$x = A \cos 2\pi \nu t, \\ y = A \cos \left(2\pi \nu t - \frac{\pi}{2} \right) = A \sin 2\pi \nu t$$

* В действительности чаще бывает наоборот — условие (4,5) соответствует минимумам, а условие (4,6) — максимумам, что связано с изменением на π фазы колебаний при отражении. Для нас это не имеет особого значения.

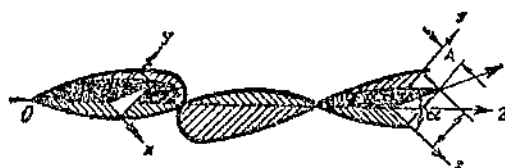


Рис. 21

и в последовательные моменты времени получают отклонения, изображенные на рис. 22. Например, при $t = \frac{T}{4}$ $x = 0$, $y = A$, отклонение направлено по оси OY , а при $t = \frac{T}{2}$ $x = -A$, $y = 0$ отклонение направлено по оси OX . Направление отклонения все время меняется, и за период описывается окружность — мы имеем так называемую круговую поляризацию. При других разностях фаз или при неравных амплитудах получается более общий случай эллиптической поляризации. В дальнейшем с этими сложными типами поляризации мы встречаться не будем и поэтому не рассматриваем их подробнее.

Чаще всего приходится иметь дело с неполяризованным светом, в котором колебания происходят во всех возможных направлениях (рис. 23 а). Такой свет представляет собой наложение линейно-поляризованных волн с различными направлениями колебаний и называется естественным светом, в отличие от поляризованного света (рис. 23 б). При определенных условиях естественный свет превращается в поляризованный, или, как говорят, поляризуется (см. стр. 21). Промежуточный случай между естественным светом и поляризованным представляет частично-поляризованный

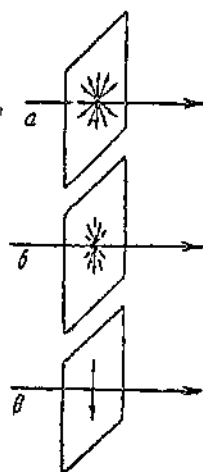


Рис. 23

свет, в котором имеется преобладающее направление колебаний, а колебания в остальных направлениях также происходят, но более слабые (рис. 23 б).

§ 5. Распространение света в среде

Законы отражения и преломления света. При падении плоской световой волны CD на границу двух сред она разделяется на две плоские волны — отраженную FE и преломленную IE (рис. 24 а). Падающие лучи AC и BDE перпендикулярны фронту волны CD , отраженные лучи (FG и EH) — фронту волны FE , наконец, преломленные лучи CIK и EL — фронту волны IE .

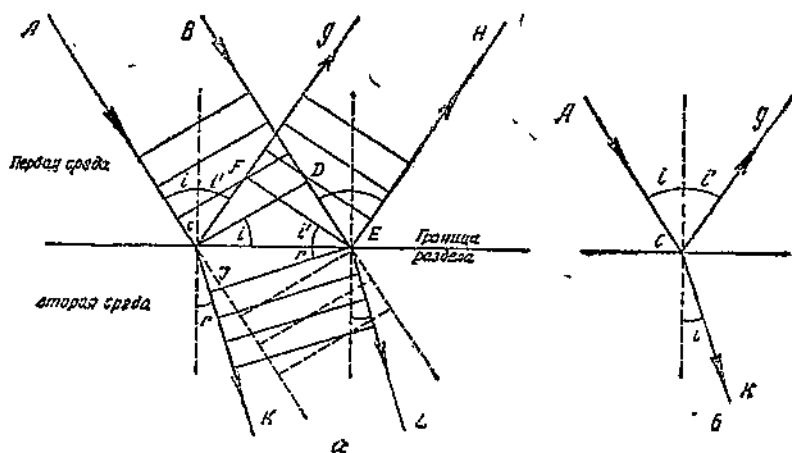


Рис. 24

Для отраженных лучей имеет место закон отражения: падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к отражающей поверхности лежат в одной плоскости, а угол падения i равен углу отражения i' (рис 24 б).

Для преломленных лучей имеет место закон преломления: падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к преломляющей поверхности лежат в одной плоскости, а отношение синуса угла падения i к синусу угла преломления r (рис. 24 б) есть величина постоянная

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5,1)$$

$\frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ называется показателем преломления второй среды относительно первой. Если первую средою является пустота, для которой $n_1 = 1$, мы имеем дело с абсолютным показателем преломления: $n_{21} = n$.

Равенство (5,1) удобнее писать в более симметричном виде, обозначив r через i_2 , а i через i_1 :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (5,2)$$

т. е. произведение абсолютного показателя преломления среды и синуса угла луча с нормалью в точке преломления остается неизменным до и после преломления.

Законы отражения и преломления связаны со скоростью распространения соответствующих волн — отраженной и преломленной. Отраженная волна распространяется в той же среде, что и падающая, следовательно с той же скоростью. Пусть в начальный момент времени фронт падающей волны есть CD и за последующее время t свет успевает распространиться вдоль луча BEH на отрезок $DE = v_1 t$. За то же время свет вдоль луча ACG пройдет отрезок CF , также равный $v_1 t$. Таким образом, $DE = CF$, а так как $DF \perp ED$ и $CF \perp EF$, то $\angle i = \angle i'$ (рис. 24 а).

Преломленная волна распространяется во второй среде со скоростью v_2 , отличной от скорости v_1 в первой среде. Вследствие этого фронт преломленной волны EI имеет иной наклон к границе раздела, чем фронт падающей волны CD (пунктиром на рис. 24 а показан фронт, который получился бы при отсутствии преломления). За время t , затрачиваемое в первой среде на прохождение отрезка $DE = v_1 t$, свет во второй среде вдоль луча ACK пройдет отрезок $CI = v_2 t$. Согласно рис. 24 а, $DE = CE \sin i$, а $CI = CE \sin r$, откуда

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{DE}{CI} = \frac{v_1 t}{v_2 t} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Окончательно находим, что

$$n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (5,3)$$

т. е. показатель преломления второй среды относительно первой равен отношению скоростей распространения в этих средах. Преломление света будет тем сильнее, чем больше разнятся скорости распространения v_1 и v_2 . Абсолютный показатель преломления будет равен отношению скорости распространения света в пустоте к скорости v распространения в среде.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (5,4)$$

Так как показатель преломления воздуха мало отличается от единицы ($n = 1,00029$), то практически можно считать показатель преломления воздуха равным показателю преломления пустоты.

От величины показателя преломления зависит и длина волны в среде при заданной частоте света. Частота света сохраняется при его переходе из одной среды в другую, тогда как скорость меняется. Согласно основной формуле (2,5), длина волны в среде

$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

а длина волны в пустоте

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu},$$

отсюда

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

или

$$\lambda = \frac{c}{v} \lambda_0,$$

следовательно

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (5,5)$$

т. е. длина волны в среде в n раз меньше, чем в пустоте.

Для большинства твердых и жидких прозрачных тел показатель преломления лежит в пределах от 1,3 до 1,8. Следующая таблица дает значения показателей преломления для некоторых прозрачных тел:

Таблица I

Лед	1,31	Флюорит	1,43
Вода	1,33	Стекло (различные сорта) ...	1,50—1,75
Эфир	1,35	Кварц плавильный	1,46
Спирт этиловый	1,36	Кварц кристаллический	1,55
Глицерин	1,47	Канадский бальзам	1,54
Бензол	1,50		

Полное внутреннее отражение. При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную угол преломления больше угла падения (рис. 25), в частности это имеет место при переходе из стекла или из воды в воздух. Мы имеем для закона преломления

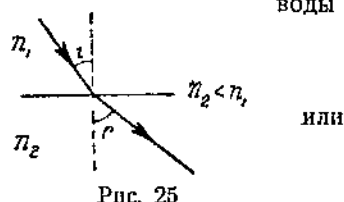


Рис. 25

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} < 1 \quad (5,6)$$

$$\sin r = \frac{\sin i}{n_{21}} > \sin i. \quad (5,7)$$

При достаточно большом угле падения $\frac{\sin i}{n_{21}}$ больше единицы, и преломление становится невозможным — весь падающий свет отражается, т. е. коэффициент отражения равен единице. Это явление носит название полного внутреннего отражения. Как и при обычном отражении, угол отражения равен углу падения.

Полное внутреннее отражение наступает при условии $\sin i = 1$, т. е. при

$$\sin i = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5,8)$$

Когда для второй среды $n_2 = 1$ (пустота или воздух), мы имеем просто

$$\sin i = \frac{1}{n}. \quad (5,9)$$

Этот угол называют предельным углом, так как при всяком угле падения большем, чем i , весь падающий световой пучок, не претерпевая преломления, отражается внутрь той среды, из которой распространялся.

Приводим значения предельного угла для некоторых веществ:

$n = 1,33$ (вода)	49°
$n = 1,50$ (легкое стекло)	42°
$n = 1,66$ (тяжелое стекло)	37°

Таким образом, для стекла ($n > 1,50$) при угле падения 45° свет, падающий из стекла на его границу с воздухом, уже полностью отражается. На этом яв-

нии основано устройство некоторых оптических деталей (призмы полного внутреннего отражения, освещение сеток в приборах — см. ниже I, гл. 2, § 1).

Дисперсия света. Скорость распространения света в среде v и, следовательно, показатель преломления зависят от длины волны. Эта зависимость от длины волны называется дисперсией*. Показатель преломления, как правило, убывает с увеличением длины волны (нормальная дисперсия). Поэтому для видимого света наибольшей преломляемостью обладают фиолетовые лучи и наименьшей — красные. На рис. 26 показана зависимость показателя преломления от длины

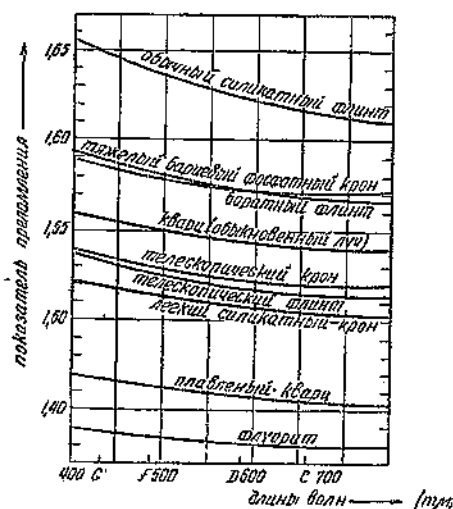


Рис. 26

волны для различных типов оптических стекол, для кварца и флюорита. Дисперсия может быть приближенно определена по формуле Гартмана

$$n = n_0 + \frac{c}{\lambda - \lambda_0}, \quad (5,10)$$

где n_0 , c и λ_0 — постоянные для заданного материала. Например, для одного из легких стекол (легкий силикатный кроун) имеем

$$n = 1,40 + \frac{74,2}{\lambda - 1703}.$$

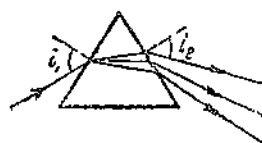


Рис. 27

На различной преломляемости различных лучей основано разложение сложного света призмой. Дважды испытывая преломления на гранях призмы (рис. 27), лучи отклоняются тем сильнее, чем короче длина их волны. Из чертежа получаем (рис. 28), что угол отклонения

$$\alpha = \beta_1 + \beta_2 = (i_1 - r_1) + (i_2 - r_2).$$

Из треугольника ABC следует

$$r_1 + r_2 = \epsilon,$$

где ϵ — преломляющий угол призмы. Отсюда

$$\alpha = i_1 + i_2 - \epsilon. \quad (5,11)$$

Наименьшее отклонение получается, когда луч в призме идет параллельно ее основанию, как и показано на рис. 28.

В этом случае

$$i_1 = i_2 = i = \frac{\alpha + \epsilon}{2}, \text{ а показатель преломления}$$

$$n = \frac{\sin i}{\sin r_1} = \frac{\sin \frac{\alpha + \epsilon}{2}}{\sin \frac{\epsilon}{2}}. \quad (5,12)$$

Для $\epsilon = 60^\circ$ (что имеет место в большинстве случаев)

$$n = 2 \sin \frac{\alpha + \epsilon}{2}, \text{ где } \frac{\alpha + \epsilon}{2} = i = \arcsin \frac{n}{2}.$$

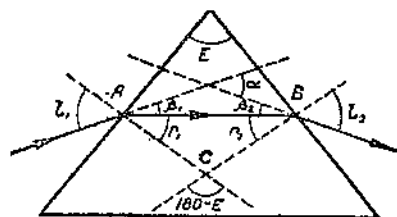


Рис. 28

* Причиной дисперсии являются сложные процессы, происходящие в среде при прохождении света. Падающая волна вызывает колебания внутри частиц вещества, которые при этом испускают вторичные световые волны. В результате наложения первоначальной волны и этих вторичных волн получается световая волна, распространяющаяся со скоростью, отличной от скорости в пустоте.

Спектральные приборы, которые применяются для разложения сложного света при помощи призм, устроены следующим образом. Свет от вертикальной щели A , освещенной источником света (рис. 29, на чертеже дано горизонтальное сечение прибора), делается параллельным при помощи объектива L_1 (коллиматор), затем отклоняется призмой P и опять собирается при помощи второго объектива L_2 в плоскости BB , где наблюдается глазом или же действует на фотографическую пластинку. (В первом случае имеем спектроскоп, во втором — спектрограф.) В каждом месте плоскости BB собираются лучи определенной длины волны, в результате получаем спектр в виде сплошной полосы (если разлагаемый свет содержит всевозможные длины волн) или в виде отдельных спектральных линий (если мы имеем дело с излучениями определенных длин волн). Каждая спектральная линия представляет собой изображение щели A в лучах соответствующей длины волны.

Для ослабления дефектов изображения, возникающих главным образом из-за наличия призм (астигматизм), необходимо, чтобы лучи падали на призму под углом наименьшего отклонения.

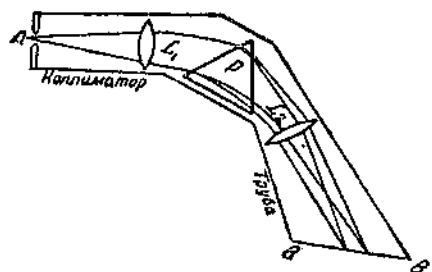


Рис. 29

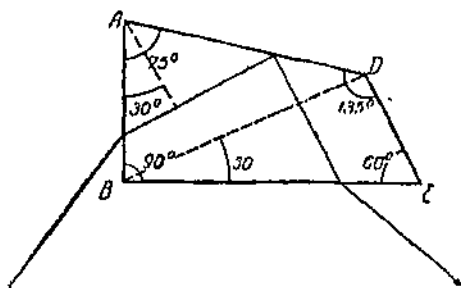


Рис. 30

Если в плоскости BB поставить щель, которая вырезала бы узкий участок спектра, можно получить более или менее монохроматический пучок света. Такие приборы называются монохроматорами. Для повышения чистоты спектра пользуются системой двух монохроматоров, установленных один за другим (двойной монохроматор).

В ряде случаев (спектрофотометрия, см. ниже) необходимо измерять энергию лучистого потока в разных частях спектра, что выполняется при помощи соответствующих приемников энергии (например фотоэлементов). Для этого необходимо, чтобы выходящему из монохроматора пучку можно было для разных длин волн давать одно направление (иначе пришлось бы приемник перемещать по спектру). На схеме, изображенной на рис. 28, этого можно достичь или изменением угла i , т. е. поворотом коллиматора с соответствующим перемещением источника света (что явно неудобно), или поворотом призмы, однако при этом нарушается условие наименьшего отклонения. Предложен ряд типов призм так называемого постоянного отклонения, в которых при повороте призмы это условие сохраняется; одна из них (Аббе-Брока), отклоняющая лучи на 90° , изображена на рис. 30, ее действие эквивалентно действию 60° призмы. Для перехода от одной длины волны к другой достаточно лишь повернуть призму так, чтобы соблюдалось условие

$$i = \arcsin \frac{n}{2}.$$

Такие призмы и устанавливаются в большинстве монохроматоров.

§ 6. Ослабление света при поглощении и отражении

Допустим, что мы имеем монохроматический пучок параллельных лучей, падающих перпендикулярно на плоскопараллельную пластинку вещества. Падающая энергия частично отражается от поверхностей, а частично поглощается

внутри среды, превращаясь в другие виды энергии (тепловую, световую при люминесценции).

При этом происходит ослабление света (рис. 31).

Если поток, вошедший в среду, дальше сохраняет свое направление, мы говорим о направленном пропускании. Оно может иметь место только в том случае, если внутри среды нет никаких включений, которые рассеивали бы поток в стороны. Такую среду называют оптически пустой. Все реальные среды рассеивают свет в большей или меньшей степени, являются мутными. Так, для получения оптически пустых жидкостей надо применять специальные методы их очистки от разных включений (пыль и т. д.). Оптическое стекло наилучшего качества так же рассеивает свет, хотя и в слабой степени. На рис. 32 представлены практически важные случаи направленно-рассеянного (а) и смешанного (б) пропускания. Во многих случаях поглощение света необходимо определять количественно.

Поглощение света. Пусть Φ_0 — поток, вошедший в среду, Φ — поток, вышедший из нее. Отношение

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (6,1)$$

называется коэффициентом пропускания.

Для чисто направленного пропускания имеем

$$T = \frac{B}{B_0}, \quad (6,1,a)$$

где B и B_0 — яркости пучков лучей, падающего и прошедшего через среду.

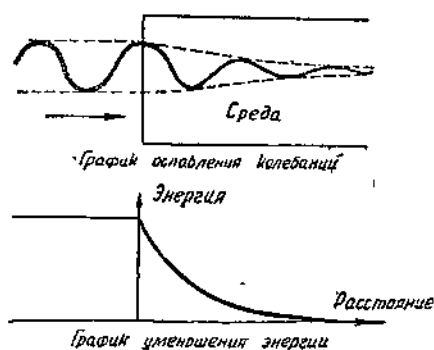


Рис. 31

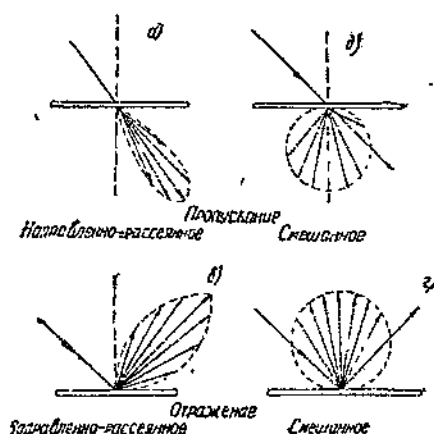


Рис. 32

Логарифм величины, обратной пропусканию, называют оптической плотностью (D); иначе, это есть логарифм отношения падающего потока к прошедшему:

$$D = \lg \left(\frac{1}{T} \right) = -\lg T = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi}. \quad (6,2)$$

Если на пути одного и того же пучка поместить ряд пластинок, характеризующих коэффициентами (направленного) пропускания T_1 , T_2 и т. д., то вся система будет иметь коэффициент пропускания

$$T = T_1 T_2 T_3,$$

или в плотностях

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad (6,3)$$

(закон аддитивности оптических плотностей), т. е. коэффициент пропускания совокупности пластинок равен произведению коэффициентов пропускания отдельных пластинок, а общая оптическая плотность равна сумме отдельных плотностей. Применяя закон аддитивности плотностей, непосредственно получаем, что плотность возрастает пропорционально толщине слоя x :

$$D = kx, \quad (6,4)$$

где k — постоянная, называемая коэффициентом погашения* света, характеризующая поглощение рассматриваемой среды; это оптическая плотность для слоя среды единичной толщины (обычно 1 см или 1 мм).

Из (6,1) и (6,2) имеем

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = T = 10^{-kx}, \quad (6,5)$$

или

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-k'x}, \quad (6,6)$$

причем $k' = k \lg_e 10 = 2,303k$ носит название коэффициента поглощения.

Коэффициент поглощения (в обычных условиях) пропорционален концентрации вещества C :

$$k' = \beta C \quad (6,7)$$

(закон Бееера), где β — постоянная.

Численные значения поглощения чрезвычайно сильно меняются в зависимости от среды и от излучения. Однако нет ни одной совершенно непрозрачной среды ($k = \infty$), ни среды совершенно прозрачной, за исключением пустоты ($k = 0$).

Для характеристики встречающихся величин добавим, что в нормальном фотографическом негативе** мы имеем дело с оптическими плотностями от 0,5 (фон, вуаль) до 2—2,5 (наиболее темные места, в которых свет ослабляется в 100—300 раз).

Весьма сильно поглощают свет металлы. Так, слой меди толщиной в одну миллионную миллиметра ослабляет свет в 12 раз, т. е.

$$k = \lg 12 \cdot 10^6 = 800\,000.$$

Для характеристики тел с таким сильным поглощением, так называемым металлическим, вводится новый термин — показатель поглощения, который определяется как коэффициент поглощения***, отнесенный не к 1 см или 1 мм, а к длине волны, деленной на 4π :

$$x' = \frac{k'\lambda}{4\pi}. \quad (6,8)$$

Формула (6,6) тогда принимает вид

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\frac{4\pi x'}{\lambda} x}. \quad (6,9a)$$

Соответственно имеем вместо формулы (6,5)

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 10^{-\frac{4\pi x}{\lambda}}; \quad (6,10)$$

где x — показатель погашения.

* В различных руководствах и книгах часто применяются различные обозначения для приведенных выше коэффициентов; мы пользуемся стандартизированной терминологией (см. ОСТ 6146, 23 X 1933 „Обозначения физической оптики“).

** См. ниже IV, гл. 13, § 3.

*** См. ОСТ 6146. В физической оптике (см., например, Вуд) принято поглощение металла характеризовать величиной $x = nx'_1$, где n — показатель преломления, x'_1 — индекс поглощения.

До сих пор мы говорили о коэффициенте поглощения, плотности и других величинах по отношению к монохроматическому излучению. У большинства тел эти величины сильно зависят от длины волны (селективное или избирательное поглощение); о характере этой зависимости можно судить по кривым (пропускания, поглощения, плотности), см., например, рис. 35.

Говорить об интегральном пропускании или поглощении имеет смысл только для определенного участка спектра: так, для интервала длин волн $\lambda_1 - \lambda_2$ имеем

$$T = \frac{\Phi_1}{\Phi_0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_\lambda T_\lambda V_\lambda d\lambda}{E_\lambda V_\lambda d\lambda}, \quad (6,11)$$

где V_λ — спектральная чувствительность глаза (см. III, гл. 7, § 12).

Обычно интегрирование производится графически*.

Отражение света. Если обозначим через Φ и Φ_0 потоки лучистой энергии — отраженный и падающий, то для коэффициента отражения будем иметь выражение

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_0}. \quad (6,12)$$

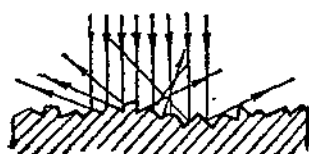


Рис. 33

Здесь также может идти речь о правильном и о диффузном, или рассеянном, отражении. Для чисто правильного (зеркального) отражения имеем аналогично формуле (6,2а):

$$R = \frac{B}{B_0}. \quad (6,12a)$$

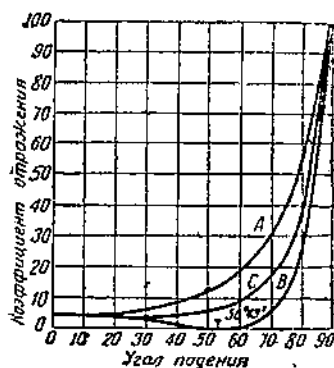


Рис. 34

Диффузное отражение имеет место в случае матовой поверхности, когда происходит рассеяние света под всевозможными углами.

Причиной его является то, что матовая поверхность в действительности не является ровной, а имеет вид, схематически изображенный на рис. 33; правильное отражение происходит от различных участков поверхности. Коэффициент отражения в этом случае („альбедо“) определяется отношением потока рассеянного под всевозможными углами к падающему потоку. Между случаями совершенно диффузного отражения и правильного существуют промежуточные случаи, направленно-рассеянного и смешанного отражения, когда имеется преобладающее рассеяние под углами, близкими к углу правильного отражения (рис. 32 в и 32 г).

Коэффициент отражения зависит от ряда факторов — от угла падения света, от его поляризации (см. рис. 34), от оптических свойств тела (показателя преломления и коэффициента поглощения), от состояния его поверхности, а также от оптических свойств той среды, из которой свет падает на поверхность тела. Наиболее простой случай мы имеем при отражении на границе прозрачных сред.

На рис. 34 изображена зависимость R от угла падения и от состояния поляризации: кривая A дает ее для случая колебаний в плоскости падения, кривая B — для колебаний, перпендикулярных плоскости падения. Для второго случая при определенном угле (так называемом угле Брюстера), для которого $\operatorname{tg} i = n$ и весь свет преломляется (на рис. 34 — $i = 56^\circ 43'$), — отражение отсутствует. При очень больших углах падения (скользящее падение) R стремится к единице; этим объясняется тот факт, что если смотреть на обыкновенное стекло сбоку, вдоль его

* См. II, гл. 4, § 1.

поверхности, оно хорошо отражает, как зеркало. Для важнейшего случая естественного (неполяризованного) света коэффициент отражения дается кривой С; он мало меняется при малых углах падения, а затем начинает быстро возрастать. Отметим, что после отражения естественный свет превращается в частично поляризованный, благодаря лучшему отражению колебаний, перпендикулярных плоскости падения, а при угле Брюстера — в полностью поляризованный, следовательно отражение дает способ получения поляризованного света.

В случае нормального падения (угол падения равен нулю) коэффициент отражения дается формулой

$$R = \left(\frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2, \quad (6,13)$$

где $n_{21} = n_2/n_1$ — показатель преломления второй среды относительно первой (см. стр. 29). Когда первая среда пустота или воздух ($n_1 = 1$), получаем

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \quad (6,14)$$

где n — обычный показатель преломления. С увеличением n коэффициент отражения возрастает:

$$n = 1,33 \text{ (вода)} \quad R = 2\%$$

$$n = 1,50 \text{ (легкое стекло)} \quad R = 4\%$$

$$n = 1,66 \text{ (тяжелое стекло)} \quad R = 6\%$$

Существенно, что коэффициент отражения на границе двух сред не зависит от того, с какой стороны свет падает на границу; при переходе света из воздуха в стекло отражается столько же, сколько и при обратном переходе — из стекла в воздух*.

Просветление оптики. Потери света на отражение, определяющиеся формулой (6,13) или (6,14), становятся весьма заметными, когда свет проходит через ряд преломляющих поверхностей, поэтому весьма желательно уменьшение коэффициента отражения с целью снижения подобных потерь (просветление оптики). Это может быть достигнуто путем нанесения на отражающую поверхность дополнительного прозрачного слоя (см. рис. 19); отражение на двух границах будет меньше, чем на одной, если показатель преломления слоя n' меньше показателя преломления отражающей поверхности n ; для отражения от поверхности раздела пленка — стекло будем иметь выражение

$$R = \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2.$$

Максимальное снижение коэффициента отражения будет иметь место при слое такой толщины, чтобы свет, отраженный на первой границе, и свет, отраженный на второй границе, ослабляли друг друга путем интерференции. Согласно формуле (4,6), это будет иметь место при наименьшей толщине слоя $d = \frac{\lambda}{4}$, что

* Для нормального падения это сразу получается из формулы. Мы имеем

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{и} \quad n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{21}},$$

$$R = \left(\frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2 = \left(\frac{1 - n_{12}}{1 + n_{12}} \right)^2 = \left(\frac{n_{12} - 1}{n_{12} + 1} \right)^2.$$

соответствует разности хода между обеими отраженными волнами, равной $\lambda/2$. Полное уничтожение света получается при равных амплитудах обеих отраженных волн, что будет при $n' = \sqrt{n}$. Для случая слоя воды на стекле это приближенно осуществляется и при $d = \frac{\lambda}{4}$ имеем $R = 0,1\%$, т. е. отражение почти равно нулю.

О разных методах просветления оптики и получающихся при этом результатах см. ниже II, гл. 3 А, § 8.

Отражение от металлов. В то время как отражение от прозрачных тел при нормальном падении невелико, для металлов получаются большие коэффициенты отражения. Действительно, в этом случае отражение зависит не только от показателя преломления n , но от коэффициента поглощения k' (см. стр. 34). Для нормального падения коэффициент отражения равен *

$$R = \frac{(n-1)^2 + k'^2}{(n+1)^2 + k'^2} \quad (6,15)$$

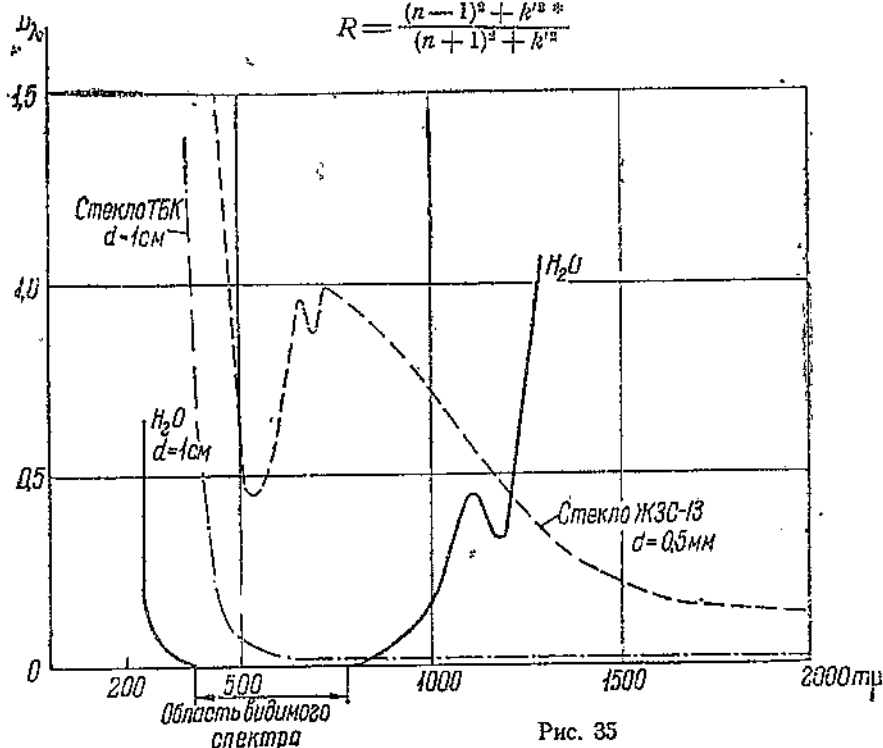


Рис. 35

и тем ближе к единице, чем больше k' . Это объясняется тем, что поглощение происходит в тонком поверхностном слое; уже на протяжении нескольких длин волн происходит полное поглощение света**, и в глубь металла свет не проникает. В этом слое поглощается доля A энергии, а оставшаяся доля R отражается ($R + A = 1$). С ростом коэффициента k' поглощение происходит все в более тонком слое, и общее количество поглощаемой энергии, т. е. поглощательная способность A , убывает, а коэффициент отражения R растет.

Приводим данные для коэффициента отражения некоторых металлов:

	(в %)
Никель	63
Алюминий	75
Ртуть	70
Серебро	93

* Формула (6,14) является частным случаем формулы (6,15) ($k' = 0$).

** Сущность поглощения света металлами сводится к следующему. Электрическое поле световой волны (световой вектор) обуславливает возникновение токов в толще металла, с этим связано выделение Джоулева тепла за счет части энергии падающей волны, а следовательно, ее постепенное ослабление по мере распространения.

Благодаря высокому коэффициенту отражения металлы являются подходящим материалом для приготовления зеркал, в частности в обычных зеркалах отражение происходит от серебряного слоя, нанесенного на стекло. Так как серебряное зеркало быстро тускнеет на воздухе, то серебряный слой наносят на заднюю сторону стекла и покрывают защитным слоем меди и лака. В оптических приборах применяются зеркала, представляющие собой отшлифованную металлическую или стеклянную поверхность, покрытую сверху слоем серебра. Применяются также зеркала с алюминиевым, а также родиевым покрытием.

Окраска тел природы обуславливается резко выраженной зависимостью от длины волны коэффициентов отражения и поглощения различных веществ.

Окраска в проходящем свете зависит от того, от каких участков спектра лучи прошли насквозь, т. е. от спектрального хода коэффициента пропускания.

На рис. 35 приведены кривые пропускания для воды и стекла неокрашенного и окрашенного.

Как видим, такие тела, которые принято называть прозрачными, — вода, стекло — являются таковыми только в очень ограниченной области видимого спектра; за его пределами они обладают сильным поглощением. Окраска получается в том случае, если поглощение захватывает и видимую область; если поглощается коротковолновая область спектра, а пропускается длинноволновая, имеем желтую, оранжевую, красную окраску, в противном случае — голубую, синюю, фиолетовую. Если поглощается средняя, зеленая часть спектра, имеем пурпурную окраску — смешение красных и фиолетовых лучей; если, напротив, эти лучи поглощаются, окраска получается зеленой.

С точки зрения физической оптики вода, стекло — также окрашенные среды (в невидимых областях спектра).

Такое вещество, которое не обладает избирательным поглощением в большом диапазоне длин волн (т. е. у которого k_λ постоянно), является нейтрально-серым, до некоторой степени таковыми являются тонкие (порядка 50 μ) слои некоторых металлов (родий, платина)*.

Окраска в отраженном (диффузно) свете зависит от того, лучи каких длин волн, отразившись, доходят до глаз наблюдателя. Белое или серое тело в видимой области спектра отражает в одинаковой степени излучения всех длин волн, в красном преобладают красные лучи и т. п. Спектральный ход коэффициента отражения обусловлен спектральным ходом коэффициента поглощения в частицах поверхностного слоя; так, хлорофилл обладает сильным поглощением в области длин волн 650—700 $m\mu$ (оранжево-красный участок спектра), на кривой спектрального отражения естественной зелени мы должны, следовательно, иметь в этой области минимум отражения. В силу повышенного вследствие этого содержания зеленых лучей в отраженном свете, листья, трава и тому подобные части, содержащие хлорофилл, представляются зелеными. В осенних листьях, лишенных хлорофилла, повышается отражение в оранжевой, красной части спектра. (Сказанное иллюстрируется кривыми отражения естественных фонов, приведенными ниже, III, гл. 10, § 4.)

§ 7. Диффракция света

Исходя из прямолинейности распространения света и законов отражения и преломления, можно решить ряд вопросов, которые составляют предмет геометрической оптики. Мы при этом отвлекаемся от волновых свойств света и ограничиваемся рассмотрением лучей и пучков лучей, их отражения и преломления на некоторых поверхностях. Геометрическая оптика является основой теории оптических инструментов, и ей посвящена гл. 2. Необходимо, однако,

* Медь и золото обладают резко выраженным избирательным поглощением и притом и в видимой области — тонкая пленка золота на просвет представляется зеленой. Серебро обладает минимумом поглощения в ультрафиолетовой области (около 320 $m\mu$).

помнить, что геометрическая оптика имеет пределы, дальше которых волновые свойства света уже сказываются — проявляется диффракция.

Диффракция от щели и круглого отверстия. Пусть имеется щель ширины $2R$, на которую падает параллельный пучок света (рис. 36). Происходит загибание лучей света, прошедших через щель, и для расчета можно считать, что из каждой точки фронта волны ABC исходят новые волны*, т. е. лучи выходят не только в прямом, но и в боковых направлениях. В некоторой плоскости aa в точке D на оси BD получается максимум света, благодаря интерференции лучей AD , BD , CD и т. д. В точке E под некоторым углом φ получается уже минимум, который определяется тем условием, что действие одной половины щели AB уничтожает действие другой половины BC . Это будет иметь место, когда разность хода лучей AE и BE (а следовательно, и BE и CE) будет равна половине длины волны. Из чертежа следует (из подобия треугольников BED и ABF), что

$$\sin \varphi = \frac{ED}{BE} = \frac{BF}{AB} = \frac{\lambda/2}{R},$$

Полагая $ED = r$ и заменяя BE через расстояние $BD = f$ от щели до плоскости aa , получим

$$\frac{r}{f} = \frac{\lambda/2}{R},$$

откуда

$$r = \frac{\lambda f}{2R}. \quad (7,1)$$

Для малых углов $\sin \varphi \approx \varphi$, следовательно

$$\varphi = \frac{r}{f} = \frac{\lambda}{2R}. \quad (7,2)$$

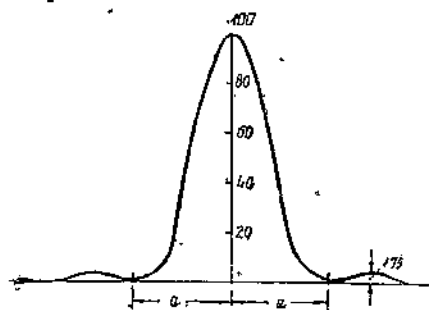


Рис. 37

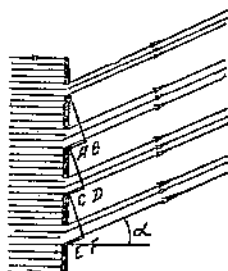


Рис. 38

где $2R$ — ширина щели.

За первым минимумом, положение которого определяется формулой (7,1) или (7,2), получается опять максимум, затем опять минимум и т. д. В результате в плоскости aa образуется дифракционная картина в виде ряда чередующихся светлых и темных полос.

Схожая картина получается для диффракции от круглого отверстия диаметра D . В этом случае вместо полос получаются светлые и темные кольца (см., например, Тудоровский [5], рис. 220, стр. 434).

Распределение энергии в дифракционной картине дано на рис. 37. Из чертежа видно, что большая часть энергии сосредоточена в центральном пятне (83,78%) и в двух-трех первых кольцах.

Радиусы окружностей r_k , соответствующих последовательным максимумам и минимумам яркости, определяются следующей формулой:

$$r_k = \frac{z_k \lambda}{\pi} \frac{f}{D}. \quad (7,3)$$

Здесь f — расстояние от отверстия до плоскости наблюдения.

* Подобное рассмотрение каждой точки фронта волны как центра новой волны носит название принципа Гюйгенса. Этот принцип не является каким-то основным принципом, вроде принципа наложения, и дает лишь удобный метод рассмотрения.

Значок k соответствует номеру кольца (светлого или темного), λ — длина волны, z_k — некоторый численный коэффициент; для первого темного кольца $z_1 = 3,83$, в этом случае имеем

$$r_1 = 1,22 \lambda \frac{f}{D}. \quad (7,4)$$

Для угла φ_1 , под которым виден радиус кольца из плоскости наблюдения, получаем

$$r = \frac{r_1}{f} = \frac{1,22 \lambda}{D} \quad (\text{в радианах}). \quad (7,5)$$

Подставляя $\lambda = 0,000555$ мм (для средней части спектра) и деля на $\frac{1}{206000}$ (значение одной угловой секунды в радианах), получаем

$$\varphi'' = \frac{138''}{D}, \quad (7,6)$$

где D — диаметр отверстия в миллиметрах.

Разрешающая сила. Оптическая система — линза или объектив, образующая изображение в некоторой плоскости, представляет собой для светового пучка круглое отверстие и создает в этой плоскости дифракционную картину. Центральный светлый кружок этой картины и есть изображение, даваемое системой, вместо точечного изображения.

Если речь идет не об одной, а о двух или нескольких точках, расположенных близко друг к другу, то дифракционные картины, соответствующие изображению каждой из них, отчасти наложатся друг на друга, и яркость в каждой точке картины будет равна сумме яркостей, даваемых каждой картиной в отдельности. Если оптическая система дает возможность различить в такой сложной дифракционной картине изображения точек по отдельности, то принято говорить, что данная система обладает достаточной разрешающей силой, чтобы разрешить эти точки.

За предел разрешающей силы принимают, до некоторой степени произвольно и условно, такое расстояние между точками, когда центр светлого кружка в дифракционной картине одной точки совпадает с краем другого, т. е. приходится против первого темного кольца соседнего изображения. При таком взаимном расположении двух точек угловое расстояние между ними равно φ'' [формула (7,6)].

Это число $\frac{138''}{D}$ или, с округлением, $\frac{140}{D}$ и принимается за меру разрешающей силы оптической системы (линзы, объектива) с диаметром D мм*.

Дифракционная решетка. При дифракции от щели или отверстия расстояние между соседними полосами или кольцами зависит от длины волны. Если пользоваться не монохроматическим светом, а сложным, то будут налагаться системы полос, соответствующие различным длинам волн, и в результате получатся окрашенные полосы, что и наблюдается в белом свете, содержащем всевозможные длины волн. Зависимость положения полос от длины волны используется для получения спектров при помощи дифракционной решетки, состоящей из ряда параллельных щелей, на которых происходит дифракция световой волны. Собирая линзой лучи, идущие под некоторым углом α , мы получим ослабление или усиление света в зависимости от разностей хода AB , CD , EF и т. д. между лучами от соседних щелей (рис. 38). Эти разности хода равны

* Подробнее о разрешающей силе фотографических объективов и телескопических систем см. в соответствующих разделах: IV, гл. 12, § 8 и VI, гл. 16, § 10.

$d \sin \alpha$, где d — расстояние между соседними щелями (постоянная решетки); максимумы получаются, когда они равны целому числу N длин волн:

$$d \sin \alpha = N\lambda. \quad (7,7)$$

При большом числе щелей получаются максимумы в виде очень резких и узких линий. Положение линии, соответствующей заданному значению N , зависит от длины волны. Для сложного света получаем для каждого N , вместо одной

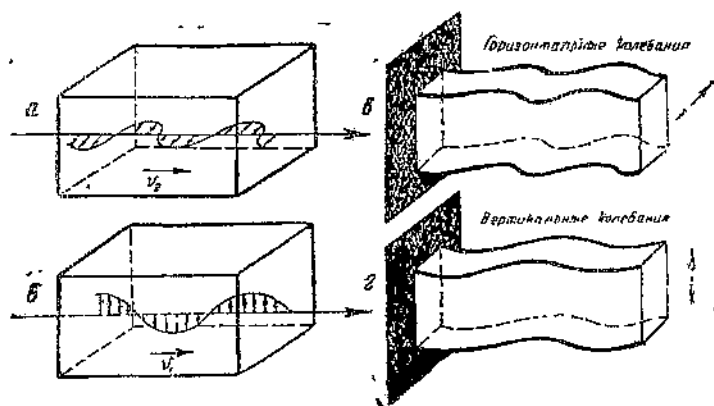


Рис. 39

линии, целый дифракционный спектр. Дифракционная решетка применяется на практике наряду с призмой для получения спектров. Обычно дифракционные решетки представляют собой стеклянные или металлические поверхности с нанесенными на них параллельными штрихами, причем наблюдаются не проходящие, а отраженные лучи. Весьма удобны вогнутые решетки, собирающие лучи сами, без помощи линзы.

§ 8. Распространение света в кристаллах

В то время как в изотропных телах, т. е. телах, свойства которых одинаковы во всех направлениях, свет распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях, в кристаллах — твердых телах, имеющих правильное строение, —



Рис. 40

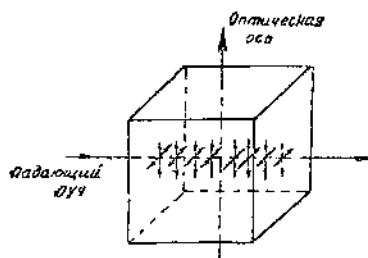


Рис. 41

положение иное. Скорость распространения зависит от направления луча и от направления колебаний в этом луче, т. е. от поляризации. Лучи, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, при том же направлении распространения обладают различными скоростями v_2 и v_1 (рис. 39 а и б). Мы имеем здесь аналогию с колебаниями стержня прямоугольного сечения (рис. 39 в и г), закреп-

пленного с одной стороны. Если ударить его сбоку, по нему побежит волна с одной скоростью, если ударить его сверху — волна с другой скоростью.

Благодаря зависимости скорости распространения луча от направления и от поляризации колебаний в кристалле, наблюдается явление двойного лучепреломления. Луч, падающий на кристалл, разделяется на два луча, распространяющиеся с различной скоростью, имеющие поэтому различные показатели преломления. На рис. 40 показан ход лучей в кристалле исландского шпата, для сечения, имеющего показанную на чертеже форму параллелограмма. В этом случае один из лучей преломляется как обычно (обыкновенный луч), а другой преломленный луч не лежит в плоскости падения (необыкновенный). В кристалле исландского шпата существует и такое направление — оптическая ось, вдоль которого оба луча распространяются с одинаковой скоростью. Рассмотрим случай нормального падения света на пластинку, вырезанную из подобного кристалла. Если грани пластинки перпендикулярны оптической оси, то оба луча будут иметь одинаковое направление — направление этой оси — и одинаковую скорость. Если грани пластинки параллельны оптической оси (рис. 41), то оба луча также будут распространяться по одному направлению, но уже с различной скоростью. При этом колебания в обыкновенном луче будут перпендикулярны оптической оси (на рис. 41 горизонтальны, ср. рис. 39 а), а в необыкновенном луче — параллельны ей (на рис. 41 вертикальны, ср. рис. 39 б).

Кристаллы, имеющие одну оптическую ось, подобно кристаллу исландского шпата, называются одноосными. Существуют кристаллы, имеющие две оптические оси, — двуосные.

На явлении двойного лучепреломления основано устройство ряда приборов для получения поляризованного света — поляризаторов. Один из наиболее распро-

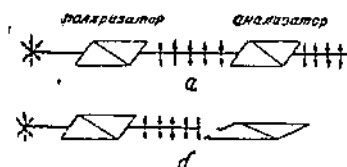


Рис. 42

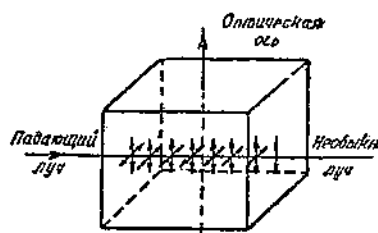


Рис. 43

страненных поляризаторов — призма Николя (которую обычно называют просто николем), состоит из двух призм исландского шпата, склеенных прозрачным веществом — канадским бальзамом, показатель преломления которого больше показателя преломления необыкновенного луча, но меньше показателя преломления обыкновенного луча. Падающий луч разделяется призмой на два луча, причем необыкновенный преломляется меньше и проходит сквозь слой канадского бальзама, а обыкновенный испытывает на этом слое полное внутреннее отражение и отводится в сторону. Поворачивая николь вокруг направления луча, можно получить свет, поляризованный в любой плоскости.

Если на николь падает уже поляризованный свет, то он пропускает полностью лишь колебания одного направления поляризации, перпендикулярные же колебания не пропускает вовсе. Поэтому николь может служить анализатором поляризованного света. Если два николя поставить так, чтобы оба пропускали, например, вертикальные колебания, то естественный свет пройдет через оба николя (рис. 42 а), если же один николь пропускает вертикальные колебания, а второй повернут на 90° и пропускает лишь горизонтальные, то свет, пройдя первый николь, задержится вторым (рис. 42 б), — это случай скрещенных николей. Поворачивая второй николь, можно постепенно ослаблять свет любым образом.

Для получения поляризованного света может быть также использовано явление дихроизма. В некоторых кристаллах лучи поглощаются по-разному, в зависи-

мости от направления колебаний. Таким свойством обладает турмалин — в нем очень сильно поглощается обыкновенный луч, а необыкновенный — проходит. Мы получаем картину, изображенную на рис. 43. Колебания в луче, прошедшем через пластинку с гранями, параллельными вертикально расположенной оптической оси,

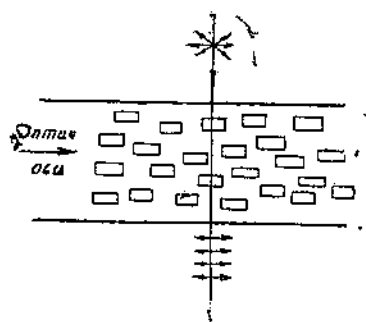


Рис. 44

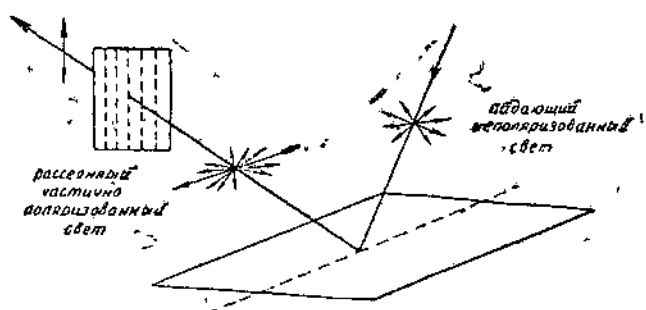


Рис. 45

являются также вертикальными; пластинка служит поляризатором. Аналогичным свойством обладают кристаллы герпатита; по размерам эти кристаллы очень малы. Можно изготовить целлулоидные пленки, в которые включены в большом числе такие кристаллики с оптическими осями, направленными параллельно поверхностям пленки (рис. 44). Подобные поляроиды дают почти полностью поляризованный свет, сравнительно дешевы и могут быть получены больших размеров. В последнее время поляроиды нашли разнообразное применение, хотя пока и не применялись в военных оптических приборах.

В качестве примера применения поляроидов можно привести их использование как фильтров при фотографировании*. При съемках часто сильно мешает отраженный от горизонтальных поверхностей свет, в котором в силу законов отражения колебания будут происходить преимущественно горизонтально (см. выше). Если перед объективом фотоаппарата поставить фильтр, пропускающий лишь вертикальные колебания, то он задержит большую часть отраженного света (рис. 45).

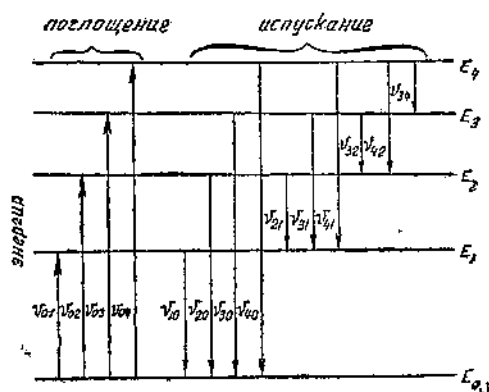


Рис. 46

§ 9. Испускание и поглощение света

В отличие от явлений, связанных с распространением света, в которых выступают его волновые свойства, при испускании и поглощении света проявляются его корпускулярные свойства (см. стр. 17). Испускание и поглощение света происходит определенными порциями энергии, а не непрерывно.

Кванты света. Простейший случай испускания света — это испускание света частицами газа, причем можно считать, что каждый атом или молекула испускает свет независимо. Согласно основным положениям квантовой теории, полностью подтвержденной на опыте, атомы и молекулы не могут обладать любым

* Г. П. Фаерман, Поляризационные светофильтры и их применение в военной технике, Военно-физ. библиотека, ОГИЗ, 1942.

запасом энергии, они могут иметь лишь вполне определенные энергии — находиться в строго определенных состояниях*.

Пусть возможные состояния частицы — атома или молекулы — соответствуют значениям энергии E_0, E_1, E_2, E_3 и т. д., тогда энергия может изменяться лишь на $E_1 - E_0, E_2 - E_0, E_2 - E_1$ и т. д., т. е. прерывным (дискретным) образом. При уменьшении энергии частицы происходит испускание света, а при ее увеличении — поглощение света. Если начальное состояние обладает энергией E_1 , а конечное — энергией E_2 , то

$$E_1 - E_2 = h\nu_{12}, \quad (9,1)$$

где h — постоянная, а ν_{12} — частота испускаемого (при $E_1 > E_2$) или поглощенного (при $E_1 < E_2$) света. Таким образом, испускание и поглощение света происходит порциями $h\nu$, которые называют квантами. Свет можно рассматривать как поток частиц — квантов — с энергией $h\nu$ **.

Постоянную h называют постоянной Планка (понятие о квантах впервые было введено Планком в 1900 г.), она равна $6,56 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Для видимого света (длина волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, частота $\nu = 1,8 \cdot 10^{15}$) величина кванта будет $h\nu = 6,56 \cdot 10^{-27} \cdot 1,8 \cdot 10^{15}$ эрг $\approx 10^{-11}$ эрг $\approx 10^{-18}$ джоуль. Эта величина очень мала, в обычных потоках лучистой энергии всегда заключается огромное число квантов, и именно поэтому можно говорить о свете, как о непрерывном потоке частиц.

Испускание и поглощение света при скачкообразном изменении энергии частицы можно пояснить графически следующим образом (рис. 46). Для каждого состояния проводят горизонтальную черту на высоте, соответствующей его энергии. Расстояние двух горизонталей дает разность энергии данных двух состояний — разность уровней энергии***. Изменение энергии согласно формуле (9,1) — переходы между уровнями энергии — изображают при помощи стрелок, соединяющих соответствующие горизонтали. Стрелка, направленная вверх, соответствует увеличению энергии, т. е. поглощению кванта света частицей; стрелка, направленная вниз, — уменьшению энергии, т. е. испусканию кванта света частицей.

Возбуждение атомов и молекул. Увеличение энергии частицы, т. е. переход с более низкого уровня на более высокий, называют ее возбуждением. Возбуждение может быть произведено различными способами. Частным случаем является возбуждение при помощи кванта света, поглощаемого частицей. Возбуждение может происходить за счет энергии, освобождающейся при химических реакциях. В электрическом разряде возбуждение получается при столкновениях отрицательно заряженных электронов с частицами за счет той энергии, которую электроны приобретают при движении в электрическом поле (возбуждение электронным ударом).

Возбужденные частицы, переходя в состояние с меньшей энергией, светятся — испускают свет. Получающееся свечение, характерное для испускания частиц, обычно называют люминесценцией. В зависимости от способа возбуждения, мы имеем различные виды люминесценции. Частным случаем люминесценции

* По наглядным представлениям теории Бора, это объясняется тем, что электроны в атомах могут вращаться не по любым орбитам, а лишь по вполне определенным, причем каждой возможной орбите соответствует своя энергия. Согласно строгим представлениям квантовой механики, такие наглядные представления дают лишь грубую модель. Здесь нет надобности останавливаться на данных вопросах подробнее, для нашего рассмотрения вполне достаточно опытно подтвержденных представлений о прерывном ряде энергий атома или молекулы.

** Эти частицы также часто называют фотонами.

*** Название „уровень энергии“ связано по аналогии с энергией, затрачиваемой на подъем некоторого тела на определенный уровень высоты. Чем выше поднято тело, тем больше его энергия положения, — потенциальная энергия. Разность потенциальных энергий тела на двух высотах определяется разностью уровней.

являются — фотолюминесценция (под действием света), хемилюминесценция (при химических реакциях), электролюминесценция (при электрическом возбуждении).

Возбужденные состояния существуют некоторое время: это время, которое проходит между моментами возбуждения и испускания. В заданном возбужденном состоянии частица может находиться большее или меньшее время. Среднее время, в течение которого существует некоторое возбужденное состояние частицы данного рода, называется его временем жизни. Обычно это время очень малое — миллионные и десятимиллионные доли секунды. Такая кратковременная фотолюминесценция носит название флуоресценции. Однако имеются случаи, когда время жизни очень велико — возбужденное состояние сохраняется очень долго (от секунд до нескольких суток); этот случай длительной фотолюминесценции называется фосфоресценцией.

Если фотолюминесценция вызывается ультрафиолетовыми или видимыми лучами, то при повторном освещении инфракрасными лучами происходит следующее: 1) энергия возбуждения сразу превращается в тепловую, не переходя в световую, — происходит „тушение“ фосфоресценции, или 2) ускоряется переход энергии возбуждения в энергию видимых лучей, — вещество вспыхивает более ярко и быстро потухает (высвечивание). (Подробнее о применении этих явлений в военном деле см. ниже II, гл. 6, а также III, гл. 8, § 4.)

Спектры испускания. В подавляющем большинстве случаев при свечении испускается сложный свет. Если разложить его призмой или дифракционной решеткой, получается спектр испускания, который может иметь весьма различный вид, в зависимости от источника, дающего свечение, и условий возбуждения в нем. Совокупность атомов газа при возбуждении обычно испускает линейчатый спектр, состоящий из ряда отдельных линий. Каждая линия соответствует переходу между определенными уровнями энергии и имеет частоту

$$\nu_{ik} = \frac{E_i - E_k}{h}. \quad (9,2)$$

Например, в случае схемы рис. 46 мы получаем линии с частотами ν_{10} , ν_{20} , ν_{30} , ν_{40} , ν_{21} ... и т. д. Для атома каждого элемента получается свой характерный спектр; на этом основан спектральный анализ химических элементов — по спектрам можно определять присутствие атомов различного рода в данном источнике света. Совокупность молекул газа испускает полосатый спектр, состоящий из ряда полос, каждая из которых, в свою очередь, распадается на ряд очень близких линий. Сложность этих спектров объясняется тем, что молекулы обладают очень частыми уровнями энергии*. Так же, как линейчатый спектр характерен для данного рода атомов, полосатый спектр характерен для данного рода молекул. Твердые и жидкие тела при нагревании обычно испускают сплошные спектры, в которых имеются всевозможные частоты в некоторых пределах. Большинство источников света, в частности электрические лампы накаливания, в которых светится накаливаемая металлическая нить, испускают сплошные спектры.

Спектры поглощения. Спектр поглощения получается, если разложить свет от некоторого источника света (обычно берется источник, дающий сплошной спектр), прошедший через поглощающее свет вещество. В первоначальном спектре будут отсутствовать или будут ослаблены те частоты, которые поглощаются данным веществом. Если поглощают атомы газа, то будут отсутствовать лишь некоторые частоты, например в случае схемы рис. 46 частоты ν_{01} , ν_{02} , ν_{03} , ν_{04} . Получается ряд темных линий поглощения на светлом фоне первоначального спектра. Характерным примером являются линии поглощения в спектре

* Это происходит благодаря возможности колебаний атомов в молекуле друг относительно друга и вращения молекул как целого; молекула может обладать при заданной энергии движения электрона по орбите (как и в атоме) различной энергией колебания и вращения.

солнца, так называемые фраунгоферовы линии. Они возникают следующим образом. Свет от центральной раскаленной части солнца, дающей сплошной спектр испускания, проходит через более холодную газовую оболочку солнца, атомы которой поглощают некоторые частоты. В табл. 2 приведены длины волн важнейших фраунгоферовых линий с указанием области спектра, их обозначения и, наконец, поглощающего вещества.

Таблица 2

Длина волны (в миллимикронах)	Область спектра	Обозначение	Элемент
759,4	Темнокрасная	A	Кислород
687,0	"	B	"
656,3	Красная	C	Водород
589,6	Оранжевая	D ₁	Натрий
589,0	"	D ₂	"
527,0	Зеленая	E	Железо
486,1	Синяя	F	Водород
434,0	Фиолетовая	G ¹	"
430,8	"	G	Железо
396,8	Темнофиолетовая	H	Кальций
393,4	"	K	"

При поглощении света молекулами газа получают темные полосы, состоящие из тонких линий на светлом фоне.

Твердые и жидкие тела обычно дают спектры поглощения, в которых отсутствуют целые участки спектра (см. выше § 6).

Связь поглощения и испускания. Те же самые переходы между уровнями энергии могут наблюдаться как в поглощении, так и в испускании; на схеме рис. 46 изображены четыре таких перехода между уровнями E_0 и уровнями E_1, E_2, E_3, E_4 . Примером могут служить D—линии натрия (D_1 и D_2), которые наблюдаются в поглощении в спектре солнца как фраунгоферовы линии (см. табл. 2, а с другой стороны, легко могут быть получены и в испускании; для этого достаточно ввести немного поваренной соли в пламя горелки, последнее окрашивается в характерный желтый цвет благодаря появлению данных линий. Вообще любая частота, наблюдающаяся в поглощении, может быть получена и в испускании: тела поглощают также же лучи, какие они способны испускать. Следует при этом иметь в виду, что в обычных условиях не всякая частота, наблюдаемая в испускании, будет телом поглощаться. Причина лежит в том, что при не слишком высоких температурах частицы будут находиться в состоянии с наименьшей энергией (невозбужденном состоянии— E_0 на рис. 46), и поэтому в поглощении будут появляться лишь линии, соответствующие переходам с этого уровня, но не более высоких уровней (E_1, E_2 и т. д.). При флуоресценции и фосфоресценции (см. стр. 45) будут, как правило, испускаться частоты меньшие, чем поглощенная частота (правило Стокса). Например, при поглощении частоты ν_{04} будут испускаться (наряду с частотой $\nu_{40} = \nu_{04}$) частоты ν_{41}, ν_{42} и ν_{43} . Флуоресценция в видимой области спектра обычно возбуждается поглощением в ультрафиолетовой области, т. е. поглощением света большей частоты.

§ 10. Тепловое излучение

Большое техническое значение имеет излучение нагретых тел* в особенности твердых, обладающее сплошным спектром (см. выше § 9) и испускаемое за счет тепловой энергии.

* См., например, А. И. Иванов, Электрические источники света, ч. I, гл. 3, ГОНТИ, 1938.

Если тело не получает энергии извне, оно, излучая, охлаждается. Пусть оно окружено стенками, находящимися при более низкой температуре и поглощающими излучаемую телом энергию; стенки будут при этом нагреваться и сами излучать энергию, которая может поглощаться телом. Будет происходить обмен лучистой энергией между телом и стенками, в результате тело будет охлаждаться, а стенки нагреваться до тех пор, пока температуры тела и стенок не станут одинаковыми и не установится тепловое равновесие. При этом тело будет излучать столько же, сколько и поглощать. Получающееся излучение — равновесное тепловое излучение — полностью определяется свойствами тела и его температурой.

Тепловое излучение количественно характеризуется мощностью излучения с единицы поверхности — так называемой светимостью (энергетической), эту величину также называют излучательной способностью. Можно говорить об энергетической светимости * полной (R) и спектральной (r_λ)**; они связаны соотношением

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_\lambda d\lambda.$$

Доля падающей на тело энергии, поглощаемой телом, согласно установившейся в физике терминологии, носит название поглощательной способности (A и A_λ).

Для теплового излучения имеют место очень общие законы, дающие зависимость излучательной способности (светимости) от (абсолютной) температуры T *** и от длины волны.

Закон Кирггофа говорит, что отношение излучательной способности тела к поглощательной есть величина постоянная, не зависящая от природы тела; иначе говоря, чем больше тело поглощает энергии при данной температуре, тем больше оно и испускает:

$$\frac{R}{A} = \varepsilon \text{ (для полного излучения),}$$

$$\frac{r_\lambda}{A_\lambda} = \varepsilon_\lambda \text{ (для монохроматического излучения).}$$

Коэффициент пропорциональности для полного излучения зависит только от температуры, для монохроматического излучения — также и от длины волны.

Идеальное тело, полностью поглощающее всю падающую на него энергию, называют абсолютно черным. Его поглощательная способность, по определению, равна 1; для всех реальных тел она более или менее отличается от 1 (для сажи — около 0,99).

Для абсолютно черного тела

$$r_\lambda^\circ = \varepsilon_\lambda,$$

т. е. имеем при заданной температуре вполне определенное спектральное распределение энергии.

Возможно искусственно осуществить тела, очень близкие по своим свойствам к абсолютно черному телу; для этого берут полость с очень малым отверстием,

* См. следующий параграф.

** Величину r_λ определяют точнее как мощность излучения с единицы поверхности, рассчитанную на единицу шкалы для длин волн. Например, если в спектральном участке от 550 μp до 560 μp излучается энергии в 20 ватт с 1 cm^2 , то r_λ для $\lambda = 550 \mu\text{p}$ равно $\frac{20 \text{ ватт}}{10 \mu\text{p}} = 2 \frac{\text{ватт}}{\mu\text{p}}$.

*** Абсолютная температура T отсчитывается по так называемой шкале Кельвина от абсолютного нуля, лежащего при $t = -273^\circ \text{C}$ и обозначается $T^\circ \text{K}$, например $T = 6000^\circ \text{K} = 5727^\circ \text{C} + 273^\circ \text{C}$.

внутренняя поверхность которого нагревается до нужной температуры (рис. 47). Каждый луч, попавший в полость извне, через отверстие, или испущенный внутри сосуда участком поверхности, поглощается либо сразу, либо после ряда отражений на стенках полости, так как выйти ему из полости очень трудно вследствие малости отверстия. Поэтому поглощательную способность следует положить равной единице; излучение, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно черного тела (черным излучением).

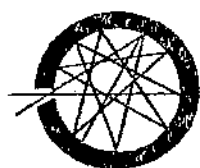


Рис. 47

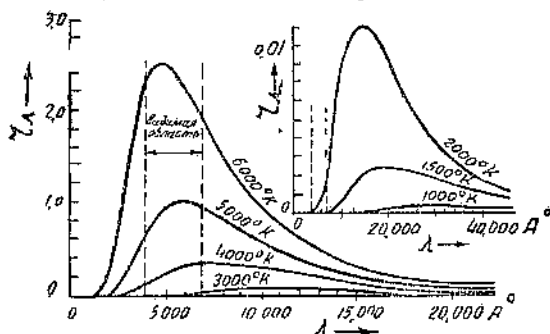


Рис. 48

Теоретическое и экспериментальное изучение излучения черного тела приводит к следующим результатам: полная светимость зависит только от температуры: $R = \varphi(T)$, спектральная светимость зависит от температуры и длины волны: $r_\lambda = f(\lambda, T)$. Эти функции φ и f универсальны и даются следующими законами:

Закон Стефана-Больцмана: плотность излучения (энергетическая светимость) черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$R = \varphi(T) = \sigma T^4, \quad (10,1)$$

где $\sigma = 5,70910 \cdot 10^{-12} \frac{\text{джоуль}}{\text{сек}/\text{см}^2 \cdot \text{град}^4} = 5,70910 \cdot 10^{-12} \frac{\text{ватт}}{\text{сек}^2/\text{град}^4}$.

Для разных температур мы получаем следующие мощности излучения с 1 см^2 :

300° K (27° C)	1 000°	2 000°	3 000°	4 000°	5 000°	6 000°
0,046 $\frac{\text{ватт}}{\text{см}^2}$	5,73	92	460	1 470	3 580	7 450

Как мы видим, уже при 4000° мощность излучения с 1 см^2 превышает 1 киловатт.

Формула Планка дает значение спектральной плотности излучения (энергетической светимости) черного тела в зависимости от λ и T :

$$r_\lambda = f(\lambda, T) = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}. \quad (10,2)$$

Приближенная формула Вина:

$$r_\lambda = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (10,3)$$

В этих формулах C_1 и C_2 — постоянные, для них принимаются следующие значения:

$$C_1 = 3,70310^4 \frac{\text{ватт}^*}{\text{см}^2},$$

$$C_2 = 14\,330^* \frac{\text{микрон}}{\text{градус}}.$$

* См. Фабри [6], стр. 135.

Существуют таблицы, вычисленные по этим формулам*.

Системы кривых r_λ , вычисленных по формуле Планка для разных T (изотермические кривые), приведены на рис. 48; как видно из рисунка, каждая кривая имеет резко выраженный максимум; положение максимума при повышении T смещается в сторону коротких волн.

На рис. 49 эти же кривые приведены к пересечению при 560 $m\mu$.

Закон смещения Вина говорит, что

1) длина волны λ_m , соответствующая максимуму r_λ , обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m T = 2684 \frac{\text{микрон}}{\text{градус}};$$

2) значение r_λ в максимуме пропорционально пятой степени абсолютной температуры.

Для разных температур мы получаем следующие положения максимума:

300° K (27° C)	1000°	2000°	3000°	4000°	5000°	6000°
96000 $m\mu$	2880 $m\mu$	1440 $m\mu$	900 $m\mu$	720 $m\mu$	580 $m\mu$	480 $m\mu$
инфракрасная область спектра				красная желтая синяя области спектра		

В соответствии с перемещением максимума меняется и цвет излучения от красного при низких температурах до белого при высоких температурах.

Нечерные тела, в силу своей меньшей поглощательной способности, излучают меньше, чем черное тело.

Коэффициент пропорциональности $e_{\lambda T}$ в выражении

$$r_{\lambda T} = e_{\lambda T} r_{\lambda T}^0, \quad (10,4)$$

где $r_{\lambda T}^0$ относится к черному телу, носит название монохроматической испускательной способности тела**. Эта величина зависит от температуры и от длины волны; для большинства металлов она повышается с уменьшением длины волны. Ряд кривых для вольфрама, по новейшим экспериментальным данным, приведен на рис. 50а; как видим, $e \sim 0,45$, т. е. вольфрам излучает приблизительно в два раза слабее, чем черное тело при той же температуре (см. также рис. 50б). То же относится и к другим металлам.

Для определения величины $r_{\lambda T}$ для реальных тел существует два способа: 1) точный расчет по формуле (10,4), по экспериментальным данным для e_λ и по данным для r_λ^0 на основании формулы Планка и 2) приближенный путем сравнения цвета излучения испытуемого тела и черного тела той или иной температуры. Та температура черного тела, при которой имеет место равенство цвета, называется цветовой температурой*** (T_c) данного тела. Искомое распределение энер-

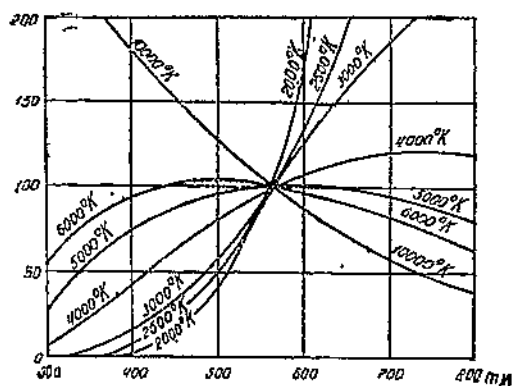


Рис. 49

* Ф о у л ь, Излучение абсолютного черного тела, Техническая энциклопедия, Справочник физических, химических и технологических величин, т. IX [15].

** Принято следующее определение этой величины: испускательная способность тела — это отношение количества лучистой энергии, испускаемой элементом поверхности данного тела, к количеству лучистой энергии, испускаемой равным элементом поверхности абсолютно черного тела при той же температуре и за тот же промежуток времени (см. ГОСТ 6146, «Основные физические величины»).

*** Одно из определений T_c : цветовая температура есть выраженная в градусах абсолютной шкалы температура абсолютно черного тела, имеющего в двух определенных спектральных участках то же отношение яркостей, как и данное тело.

гии $r_{\lambda T}$ при температуре T тогда принимается совпадающим с распределением энергии черного тела $r_{\lambda T_c}^0$ при более высокой температуре T_c . Существует несколько методов экспериментального определения цветовой температуры — непосредственное сравнение цвета тела испытуемого и стандартного (метод идентификации цвета), определение „красно-синего“ отношения величин r_{λ} для обоих тел и др. Во всех этих методах предполагается, что кривые распределения энергии по спектру для испытуемого и черного тела имеют один характер. Что это далеко не всегда имеет место, видно из рассмотрения рис. 50а для вольфрама; вслед-

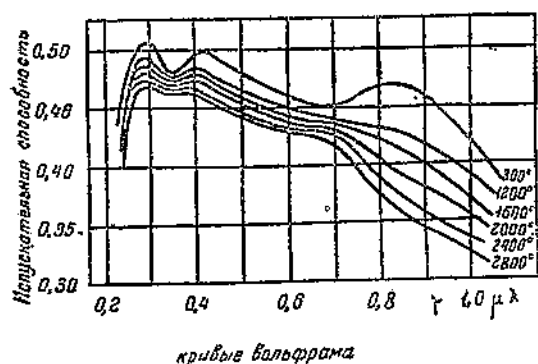


Рис. 50а

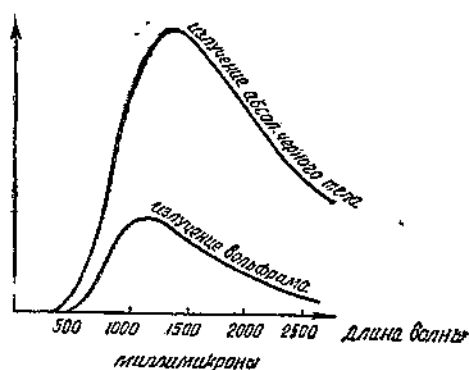


Рис. 50б

ствие неправильностей хода $e_{\lambda T}$ на краях спектра кривая $r_{\lambda T} = e_{\lambda T} / r_{\lambda T}^0$ не может быть совмещена ни с какой из кривых для черного тела; это совмещение возможно лишь в средней части видимого спектра, где $e_{\lambda T}$ имеет плавный ход. То же относится к другим веществам. Понятие цветовой температуры относится только к видимому спектру (точнее, от 665 $m\mu$ до 450 $m\mu$), в широком интервале длин волн оно теряет смысл.

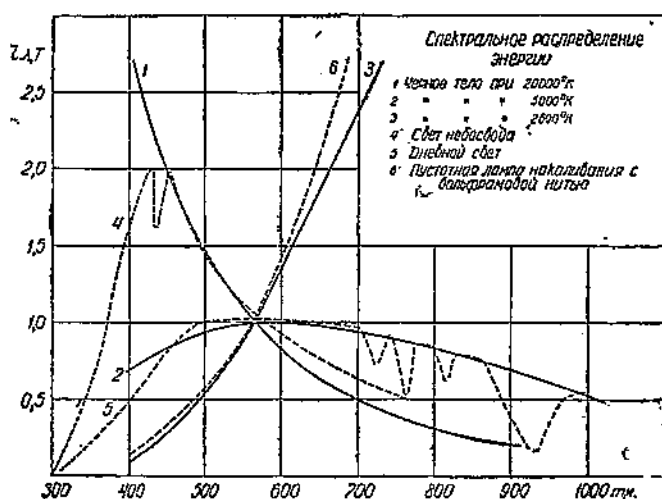


Рис. 51

Это же замечание в еще большей степени относится к попыткам применения метода цветовой температуры к определению распределения энергии по спектру, например, в дневном свете или свете неба; как видно из рис. 51, эти кривые по своему характеру весьма сильно отличаются от приведенных на том же рисунке кривых для черного тела. Для других источников света (кривая 6) совпадение

лучше. Цветовые температуры для некоторых обычных излучений приведены в нижеследующей таблице:

Таблица 3

Источник света	$T_c, ^\circ K$
Керосиновая лампа	2 045
Газополные лампы накаливания с вольфрамовой нитью	2 700—3 000
Дуговая лампа с фитилями	3 400
Свет дуны через земную атмосферу	4 100
Дневной свет (переменная облачность)	5 000—7 000
Небо очень голубое	25 000—30 000
„белесое“	9 000—10 000

Чем ниже цветовая температура излучения, тем краснее его свет.

§ 11. Измерение лучистой энергии

Лучистая энергия переносится излучениями различных длин волн. Как мы видели выше (§ 3), глазом воспринимается лишь небольшой участок длин волн — около одной октавы (380—780 $m\mu$). Основные понятия при измерении лучистой энергии были выработаны именно по отношению к видимым излучениям; изучение их составляет предмет фотометрии. Основные фотометрические величины — световой поток, сила света, освещенность, светимость и яркость. При измерении лучистой энергии (включая и невидимое излучение) по существу пользуются теми же понятиями, но терминология здесь еще не выработана. Следуя Фабри [6], мы будем в основном пользоваться хорошо разработанной фотометрической терминологией, прибавляя к соответствующим терминам прилагательное „энергетический“.

Световой поток. В § 1 было определено понятие лучистого потока как энергии, переносимой излучениями в единицу времени, т. е. как мощности переноса энергии. Лучистый поток, создаваемый источником энергии, измеряется энергией, излучаемой за единицу времени во все стороны. Лучистый поток сквозь некоторую поверхность измеряется энергией, проходящей через эту поверхность за единицу времени. Для источника света в прозрачной среде излучаемый поток будет проходить без потери через любую замкнутую поверхность, окружающую этот источник света.

Одинаковые по своей мощности лучистые потоки различными приемниками воспринимаются различно, в зависимости от спектральной чувствительности приемника — фотоэлемента или глаза. Кривые спектральной чувствительности некоторых фотоэлементов приведены ниже (II, гл. 5, рис. 164); кривая спектральной чувствительности глаза, называемая кривой видности, приведена в гл. 7, § 12 (рис. 213 и табл. 33). Она имеет максимум около 555 $m\mu$, спадая в обе стороны и приближаясь к нулю при $\lambda=380 m\mu$ и $\lambda=780 m\mu$.

Световым потоком называется лучистый поток, оцениваемый по световому восприятию. Если через Φ_λ обозначить монохроматический лучистый поток для данной длины волны, через F_λ — световой, а через V_λ — видность глаза, то имеем

$$F_\lambda = V_\lambda \Phi_\lambda.$$

Для полного светового потока получим

$$F = \int_{\lambda=380 m\mu}^{\lambda=780 m\mu} V_\lambda \Phi_\lambda.$$

Так как, например, для инфракрасных лучей $V_\lambda = 0$, то поток этих излучений вообще не будет восприниматься глазом.

Сила света. Поток, излучаемый источником света, может различным образом распределяться по направлениям. Поэтому весьма важно охарактеризовать излучение для любого направления. Это проще всего сделать в случае точечного источника света. Рассматривая излучение на достаточно большом расстоянии от источника, последний можно считать всегда точечным и определить поток, излучаемый внутри конуса с вершиной L в этом источнике (рис. 52). Растворение конуса определяется величиной соответствующего телесного угла Ω^* .

Сила света I есть отношение светового потока F , излучаемого внутри телесного угла Ω , к величине этого угла

$$I = \frac{F}{\Omega}, \quad (11,1)$$

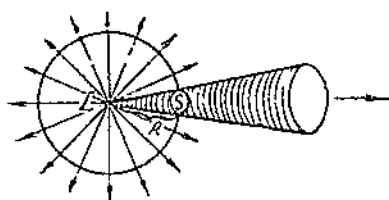


Рис. 52

т. е. поток в заданном направлении, рассчитанный на единицу телесного угла на 1 стерадиан. Для источника, равномерно излучающего свет во все стороны, сила света в любом направлении будет

$$I = \frac{F_0}{4\pi}, \quad (11,2)$$

где F_0 — полный излучаемый поток. При различной силе света в различных направлениях формула (11,2) определяет среднюю сферическую силу света.

Соответственно имеем энергетическую силу света

$$\mathfrak{I} = \frac{\Phi_0}{4\pi}. \quad (11,2a)$$

Освещенность, иначе — плотность облучения или освещения поверхности**, выражается в единицах плотности лучистого или светового потока; это — поток, падающий на единицу поверхности. Если поверхность имеет площадь S' , то освещенность

$$E = \frac{F}{S'}, \quad (11,3)$$

энергетическая освещенность

$$\mathfrak{E} = \frac{\Phi}{S'}. \quad (11,3a)$$

* Телесный угол равен отношению $\frac{S}{r^2}$ поверхности S , вырезанной конусом на сфере с центром в вершине (рис. 52), к квадрату радиуса r сферы. Это отношение не зависит от r , так как с увеличением r вырезаемая конусом поверхность S увеличивается пропорционально r^2 . Если положить $r=1$, то $\Omega=S$, т. е. телесный угол измеряется поверхностью, вырезанной в сфере единичного радиуса. Единицей телесного угла является стерадиан (st), угол, для которого $\frac{S}{r^2}=1$, т. е. в сфере единичного радиуса вырезается поверхность площадью, равной единице. Увеличивая растворение конуса так, чтобы он охватывал все пространство, мы получаем телесный угол, равный $\frac{S_0}{r^2}$, где S_0 — поверхность всей сферы, т. е. $\frac{4\pi r^2}{r^2}=4\pi$. Измерение телесного угла аналогично измерению обычного угла в радианах, как отношения стягивающей дуги к радиусу окружности.

** А. А. Гершун, Фотометрическая терминология, Справочник по осветительной технике, ОНТИ, стр. 542 и 550, 1935.

В актиометрии это же понятие носит название напряженности радиации и измеряется в тепловых единицах (калории/см²·мин).

Для точечного источника, т. е. для относительно достаточно удаленного источника, освещенность легко связать с силой света. Пусть на площадку S' , расположенную на расстоянии l от источника света, падают под углом падения φ лучи, заключенные внутри телесного угла Ω (рис. 53). Телесный угол $\Omega = \frac{S}{l^2}$, где S — площадка, перпендикулярная лучам света;

$S = S' \cos \varphi$. Таким образом, $\Omega = \frac{S' \cos \varphi}{l^2}$, откуда $S' = \frac{\Omega l^2}{\cos \varphi}$, а освещенность

$$E = \frac{F \cos \varphi}{\Omega l^2}. \quad (11,4)$$

Согласно (11,1), $\frac{F}{\Omega}$ есть сила света, поэтому

$$E = \frac{I \cos \varphi}{l^2}. \quad (11,5)$$

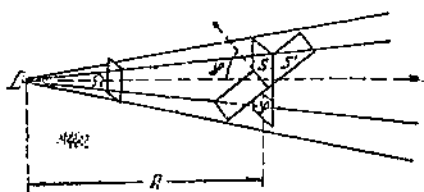


Рис. 53

Итак, освещенность, создаваемая точечным источником света, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Эта зависимость объясняется тем, что с ростом расстояния тот же поток распределяется на площадь, растущую пропорционально квадрату расстояния. Далее, из (11,5) следует, что освещенность пропорциональна косинусу угла падения.

Светимость и яркость. Для источника света, который нельзя считать точечным, существенно знать не только испускаемый поток и силу света в зависимости от направления, но и излучение различных участков светящейся поверхности. Оно характеризуется двумя величинами — светимостью и яркостью. При этом не существенно, светится ли поверхность собственным светом или отраженным.

Светимость (иначе плотность* излучения или свечения) определяется потоком, испускаемым единицей поверхности. Если площадка S излучает поток F , то светимость

$$R = \frac{F}{S}. \quad (11,6)$$

Соответственно этому для энергетической светимости (плотности излучения) имеем

$$\mathfrak{R} = \frac{\Phi}{S}. \quad (11,6a)$$

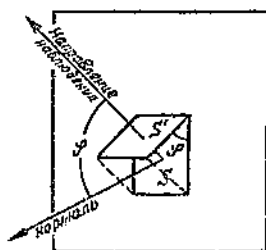


Рис. 54

Светимость дает поток, излучаемый поверхностью во всех направлениях, внутри телесного угла в 2π ; в противоположность этому яркость дает поток, излучаемый в заданном направлении. Пусть малая площадка S светящейся поверхности создает силу света в направлении, составляющем угол φ с перпендикуляром к площадке (рис. 54). Если смотреть в этом направлении, то площадка будет казаться имеющей размер $S \cos \varphi$. Величина $S' = S \cos \varphi$ есть проекция площадки S на плоскость, перпендикулярную рассматриваемому направлению. Яркость поверхности B есть отношение силы света I к проекции S' излучающей площадки S :

$$B = \frac{I}{S'} = \frac{I}{S \cos \varphi}, \quad (11,7)$$

* А. А. Гершун, Фотометрическая терминология, Справочник по осветительной технике, ОНТИ, стр. 542 и 550, 1935.

т. е. равна силе света, рассчитанной на единицу видимой поверхности источника света. Выражая силу света через поток и телесный угол, согласно (11,1), получим для яркости выражение

$$B = \frac{F}{\Omega S \cos \varphi} \quad (11,8)$$

Соответственно для энергетической яркости имеем

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{\Omega S \cos \varphi} \quad (11,8a)$$

Закон Ламберта. Важный частный случай мы получаем, если выполняется закон Ламберта, а именно, если яркость поверхности во всех направлениях одинакова. Это будет иметь место, когда сила света пропорциональна косинусу угла φ , т. е. угла между рассматриваемым направлением и перпендикуляром к поверхности. Таким образом, для поверхности, подчиняющейся закону Ламберта, сила света в любом направлении

$$I = I_0 \cos \varphi, \quad (11,9)$$

где I_0 сила света в направлении нормали — направлении, перпендикулярном к поверхности. На рис. 55 приведен график распределения силы света в этом случае. Соответствующая кривая есть окружность, касающаяся светящейся поверхности.



Рис. 55

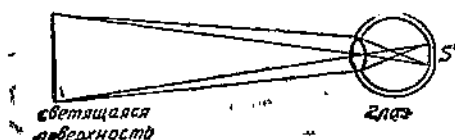


Рис. 56

Закон Ламберта выполняется для идеальной матовой поверхности (см. § 6, стр. 37). Такую поверхность, диффузно отражающую согласно закону Ламберта при коэффициенте отражения равном единице, называют абсолютно белой.

Между светимостью и яркостью для поверхности, подчиняющейся закону Ламберта, имеется простая связь — согласно следующей зависимости:

$$\begin{aligned} R &= \pi B = 3,14 B \\ \mathfrak{R} &= \pi \mathfrak{B} \end{aligned} \quad (11,10)$$

Видимая яркость источника света. При наблюдении светящейся поверхности конечных размеров глазом ее видимая яркость не зависит от расстояния, что объясняется следующим образом. Видимая яркость определяется освещенностью, которую источник света создает на сетчатке *. Изображение на сетчатке (рис. 56) получается за счет того светового потока, который падает на зрачок глаза; этот поток равен произведению освещенности E на площадь S зрачка и убывает с увеличением расстояния обратно пропорционально его квадрату (см. формулу 11,5). Освещенность сетчатки E' равна отношению потока ES к величине S' изображения светящейся поверхности на сетчатке, т. е. $E' = \frac{ES}{S'}$.

Но размеры изображения S' также убывают обратно пропорционально квадрату расстояния, поэтому освещенность сетчатки, а следовательно, и видимая яркость остается постоянной. Это справедливо, разумеется, лишь для прозрачной среды. Если имеет место поглощение света средой, то видимая яркость соответственно уменьшается, например, при наблюдении сквозь туман. В последнем случае, кроме

* Это справедливо лишь в определенных пределах, пока угловые размеры рассматриваемой поверхности не очень малы.

того, с расстоянием меняется наблюдаемый цвет источника, что объясняется тем, что при прохождении через туман свет ослабляется не за счет истинного поглощения, а за счет рассеяния, которое гораздо сильнее для синих и фиолетовых лучей, чем для красных (см. стр. 35).

Фотометрические единицы. Основной фотометрической единицей является условная единица — новая свеча (св), равная $\frac{1}{60}$ силы света (в направлении нормали), получаемой с 1 см^2 поверхности черного тела при температуре затвердения платины ($2046,6^\circ \text{ К}$) *.

Единицей светового потока является люмен (лм) — поток, излучаемый источником света в 1 свечу внутри телесного угла в 1 стерадиан. Источник, обладающий силой света в 1 свечу в любом направлении, излучает полный поток

$$4\pi I = 4\pi \text{ лм} = 12,5 \text{ лм.}$$

В качестве единицы освещенности применяются: люкс (лк) — освещенность, создаваемая потоком в 1 люмен на 1 м^2 , фот — освещенность в 1 люмен на 1 см^2 и миллифот (мф), равный 0,001 фота. Таким образом, 1 фот = 1000 миллифотам = 10 000 люменам, а 1 миллифот = 10 люменам. В Америке и Англии часто применяется в качестве единицы освещенность в 1 люмен на 1 ф^2 — так называемая фут-свеча. 1 фут-свеча = 10,76 люкса. Примерные величины освещенностей, с которыми приходится иметь дело в различных случаях, даются следующей табл. 4а.

Таблица 4а
Освещенности

От солнца в полдень летом	100 000	люкс
На открытом месте без солнца	1 000	"
Летом в светлой комнате	100	"
Для работы при искусственном свете	20	"
От полной луны	0,2	"
От ночного неба (в безлунную ночь)	0,0003	"

Светимость, так же как и освещенность, определяется потоком, относящимся к единице поверхности, и поэтому измеряется в тех же единицах. Обычно ее выражают в фотах.

За единицу яркости берется стильб (сб) — яркость равномерно светящейся поверхности в направлении нормали, имеющей в том же направлении силу света в 1 свечу с 1 см^2 , т. е. излучающей с 1 см^2 1 люмен в телесном угле в 1 стерадиан. Если для поверхности справедлив закон Ламберта, то ее светимость при яркости в 1 стильб = $\frac{1 \text{ люмен}}{\text{см}^2 \text{ стер.}}$ будет, согласно (11,10), равна $3,14 \text{ люмен/см}^2$.

В Америке часто пользуются в качестве единицы яркости ламбертом, яркостью поверхности, подчиняющейся закону Ламберта и обладающей светимостью в 1 фот, т. е. испускающей полный поток в 1 люмен/см^2 . Апостильбом (асб), или люксом на белом, называется единица, в 10 000 раз меньшая, — яркость поверхности, подчиняющейся закону Ламберта и испускающей полный поток в 1 люмен с 1 м^2 . Очевидно, что $1 \text{ стильб} = 3,14 \text{ ламберта} = 31 400 \text{ апостильба}$.

Примерные яркости, в зависимости от условий освещения, даются следующей табл. 4б.

Таблица 4б

Рассеивающая абсолютно белая поверхность, освещенная солнцем	3 стильба
Ясное небо	0,15 "
Абсолютно белая поверхность при освещенности в 30 люкс	0,001 "
Ночное безлунное небо	10^{-8}
Наименьшая различаемая яркость	10^{-10}

* Эта единица введена с 1940 г., до этого основной единицей являлась международная свеча — сила света, создаваемая электрическими лампами накаливания специальной конструкции и отличающаяся примерно на 1—2% от новой свечи. В Германии применяется другая единица — свеча Гейфнера, примерно на 10% меньшая.

В заключение приведем таблицу основных фотометрических величин и их единиц.

Таблица 5

Величина		Единица		
название	обозначение	название	обозначение	связь с другими единицами
Световой поток	F	Люмен	лм (lm)	1 св = 1 лм/стерадиан 1 фот = 1 лм/см ² 1 мф = 0,001 ф = = 0,001 лм/см ² 1 лк = 0,0001 ф = = 0,0001 лм/см ² = = 1 лм/м ² 1 сб = 1 св/см ² = = 3,14 · 10 ⁴ асб
Сила света	I	Свеча	св (с)	
Освещенность	E	Фот	ф (ph)	
		Миллифот	мф (mph)	
Светимость	R	Люкс	лк (lx)	
Яркость	B	Стильб	сб (sb)	
		Апостильб	асб (asb)	

Измерение энергии излучения. Приемниками лучистой энергии могут являться термоэлементы (см. ниже § 13), фотоэлементы (см. II, гл. 5), фотографический слой (см. IV, гл. 13) и для световых потоков — глаз. Соответственно этому мы имеем методы объективные, фотографический и визуальный.

Область применения приемников того или другого типа определяется их чувствительностью — абсолютною и спектральною.

Наибольшую абсолютною чувствительностью обладает глаз; по новейшим исследованиям, он может чувствовать световые потоки всего в несколько сотен квантов (см. II, гл. 7, § 12). Спектральная чувствительность глаза ограничена пределами видимого спектра (см. II, гл. 7, § 12). Об абсолютной чувствительности фотоэлементов см. в гл. 5, разд. II, она может быть повышена усилением фототока. Чувствительность термоэлемента для всех длин волн одинакова; у фотоэлементов она зависит от их типа (см. II, гл. 5, рис. 3 и 6).

Применение этих приемников для измерения лучистого потока основано на пропорциональности термо- или фототока воспринимающей лучистой мощности. В фотографическом методе о количестве действующей энергии мы судим по оптической плотности проявленного изображения; эта величина пропорциональна логарифму освещенности (см. IV, гл. 13, § 2).

Приборы для измерения фотометрических величин называются фотометрами. Смотря по назначению, они бывают разных типов:

а) Фотометры — для интегрального светового потока, большей частью визуальные. Все фотометрические измерения освещенности, яркости или светового потока при помощи визуальных приборов сводятся к установлению одинаковой яркости двух половин окулярного поля зрения, одна из которых освещена испытуемым источником света, а другая — стандартным; поток от этого последнего ослабляется тем или иным способом (введением фотометрического ослабителя, изменением расстояния) в известное число раз, пока яркость полей сравнения не уравнивается.

б) Спектрофотометры* — для измерения в монохроматическом свете. Они бывают всех трех типов; в визуальном и объективном методах основным прибором является монохроматор (см. выше), в фотографическом — спектрограф. Смотря по спектральной чувствительности приемника, они позволяют производить измерения в очень широком интервале длин волн: от 1800 Å в ультрафиолетовой области до нескольких микрон в инфракрасной. Последнее время в качестве приемников получают все большее распространение фотоэлементы, позволяющие, во-

* Подробнее о спектрофотометрах см., например, статью Раутиана в Справочнике оптико-механика [14], гл. XVIII, или монографию Федорова [7].

первых, увеличивать чувствительность путем усиления фототока (применением катодных ламп), а во-вторых, допускающие автоматизацию процесса измерения.

в) Денситометры и микроденситометры (микрофотометры) — для промера оптических плотностей проявленных фотографических изображений, бывают визуальные и фотоэлектрические.

г) Для измерения освещенности пользуются люксметрами. В объективном люксметре, получающем все большее распространение, приемником энергии является селеновый фотоэлемент вентильного типа со специальным светофильтром (см. II, гл. 4, § 11 и II, гл. 5, § 2), подгоняющим его спектральную чувствительность к кривой спектральной чувствительности глаза, поэтому можно считать, что он воспринимает именно световой поток и что даваемый им ток пропорционален люксам. Внешний вид люксметра ГОИ изображен на рис. 57; фототок измеряется чувствительным гальванометром.

Люксметр — существенная часть важного для военной фотографии прибора — экспонетра (см. ниже IV, гл. 13, § 4 в).

§ 12. Источники света и их свойства

Почти все практически применяемые источники света* являются электрическими, т. е. излучают свет за счет затраты электрической энергии. Они могут быть разделены на две основные группы.

К первой группе относятся лампы накаливания, в которых излучает свет тело накала, обычно металлическая нить, нагреваемая электрическим током до соответствующей температуры. В этом случае излучение является тепловым.

Ко второй группе относятся газосветные лампы, в которых светятся газы или пары металлов под действием электрического разряда.

Промежуточное место занимают дуговые лампы, в которых происходит электрический разряд между накаливаемыми угольными электродами (вольтова дуга). В них получается как тепловое излучение электродов, так и свечение облака паров между электродами.

Состав излучения источников света и световая отдача. Источники света излучают как видимые, так и невидимые лучи. Существенным является получить при заданной мощности излучения возможно больше видимых лучей, и именно тех, которые сильнее всего влияют на глаз, следовательно лежат в зеленой части спектра. Одновременно от состава излучения зависит цвет источника. Поэтому спектральный состав излучения является важной характеристикой источника света.

Общей характеристикой состава излучения является отношение светового потока F , выраженного в люменах, к полному лучистому потоку Φ , выраженному в ваттах. Это отношение называется световой отдачей излучения:

$$\eta_{\text{изл}} = \frac{F \text{ люмен}}{\Phi \text{ ватт}}. \quad (12,1)^*$$

Для монохроматического света с длиной волны $\lambda = 555 \text{ м}\mu$, к которому глаз наиболее чувствителен, световая отдача излучения равна 683 люмен/ватт, для

* Здесь идет речь об источниках света в узком смысле слова, светящихся собственным светом, а не отраженным.

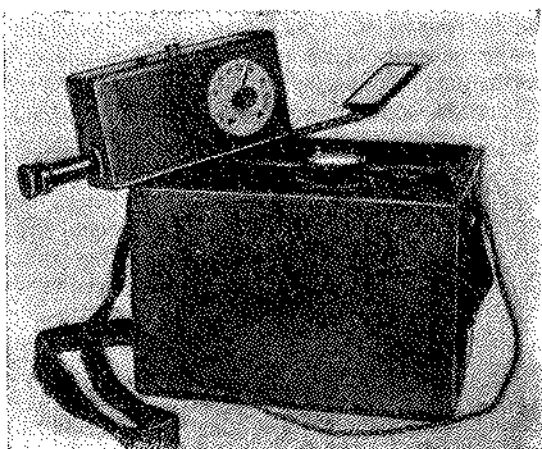


Рис. 57

любого другого излучения она будет меньше и притом тем меньше, чем большую долю в излучении составляют невидимые лучи и лучи, к которым глаз мало чувствителен (красные и фиолетовые). От световой отдачи излучения следует отличать световую отдачу источника — отношение светового потока F , выраженного в люменах, к полной мощности ψ , потребляемой источником света:

$$\eta_{\text{ист}} = \frac{F \text{ люмен}}{\psi \text{ ватт}}. \quad (12,2)$$

Очевидно, что световая отдача источника, в конечном счете и представляющая главный интерес, меньше световой отдачи излучения. Таким образом, потребляемая источником мощность лишь частично используется на создание светового потока, во-первых, из-за неизбежных потерь при превращении электрической энергии в световую и, во-вторых, из-за наличия в излучении лучей, не влияющих или мало влияющих на глаз. Вторая причина особенно существенна. Для обычно применяемых источников света световая отдача источника не превышает нескольких десятков люмен/ватт, т. е. мала по сравнению с наибольшей возможной отдачей 621 люмен/ватт, составляя лишь несколько процентов от нее. Для черного тела с повышением температуры световая отдача излучения увеличивается, в связи с перемещением максимума излучения в сторону коротких волн (см. таблицу на стр. 49). Она достигает наибольшего значения $\eta_{\text{пл}} = 87$ люмен/ватт при 6500° К. При 3000° К она составляет всего лишь около 20 люмен/ватт. Для увеличения световой отдачи выгодно применять источники, в излучении которых видимые лучи составляют возможно большую долю.

Лампы накаливания. Для источников, дающих тепловое излучение, световой отдача, так же как и для черного тела, будет расти с температурой. Поэтому обычно применяют в лампах накаливания наиболее тугоплавкий металл — вольфрам (температура плавления 3660° К) — при возможно большой температуре накала. Для этого лампы наполняют газом (азотом или аргоном), что уменьшает разрушение нити накала из-за ее испарения при высокой температуре, и придают нити форму спирали, что уменьшает потери на охлаждение. В результате температура нагрева нити может быть доведена до 3000° К. Световая отдача излучения для вольфрама несколько больше, чем для черного тела при той же температуре, благодаря большему содержанию видимых лучей в составе его излучения по сравнению с черным телом (ср. положение максимумов излучения на рис. 50). Световая отдача лампы накаливания с вольфрамовой нитью возрастает с увеличением потребляемой мощности вследствие меньших относительных потерь на охлаждение при превращении электрической энергии в энергию излучения и более высокой достигаемой температуры накала. Некоторые данные для газополных ламп накаливания, обычно применяемых для освещения, приведены в следующей табл. 6.

Таблица 6

Потребляемая мощность (в ваттах)	50	100	300	1000
Температура накала нити	2685° К	2760° К	2870° К	2990° К
Световой поток (в люменах)	500	1275	4875	19000
Средняя сила света (в свечах)	40	102	390	1520
Световая отдача лампы (в люменах на ватт) .	10,00	12,75	16,25	19,00

Газосветные лампы. В противоположность источникам света с тепловым излучением, газосветные лампы дают излучение, спектр которого уже не сплошной, а линейчатый, и лишь при больших плотностях паров становится сплошным; в последнем случае на сплошном фоне выделяются отдельные яркие спектральные линии. Излучение является, таким образом, избирательным (селективным). При надлежащем выборе светящегося вещества могут быть достигнуты высокие световые отдачи. Практически применяются различные типы газосветных ламп.

В натриевых лампах подавляющая часть излучения приходится на желтые линии натрия D_1 и D_2 (см. стр. 46), чему соответствует наибольшая возможная отдача излучения 485 люмен/ватт. Для технически применяемых ламп световая отдача значительно ниже — 50—60 люмен/ватт. Для поддержания необходимой плотности светящихся паров натрия лампа должна нагреваться до определенной температуры, что обеспечивается специальным устройством этих ламп.

Весьма разнообразны конструкции ртутных ламп. На рис. 58 изображена ртутная лампа высокого давления „Игар“ (давление паров около 2 атм), работающая при напряжении сети 220 В; мощность лампы около 500 ватт, световая отдача 40 люмен/ватт. Особое значение имеют ртутные лампы сверхвысокого давления (давление паров до 300 атм); они обладают светоотдачей до 60 люмен/ватт и очень большой яркостью, благодаря значительной мощности излучения при малом объеме, занимаемом светящимися парами.

Цвет излучения газосветных ламп обычно сильно отличается от белого, что составляет существенный недостаток при их применении для обычного освещения, но для других целей, наоборот, является преимуществом. Примером могут служить неоновые и аргоновые лампы высокого напряжения, в которых используется так называемый тлеющий электрический разряд. Аргоновые лампы дают синее свечение, а неоновые — красное. Неоновые и аргоновые лампы могут быть изготовлены в виде трубок любой формы и различной длины, причем свечение заполняет весь объем. Такие трубки используются для различных целей, в частности для сигнализации, а также для реклам (цветные надписи).

Сила света и яркость различных источников. Сила света для различных типов источников различным образом зависит от направления. Эта зависимость удобно изображается графически, как было изложено выше. В ряде случаев существенно получить определенное распределение силы света по направлениям, что достигается путем применения светильников — для освещения близко расположенных предметов и прожекторов — для освещения удаленных предметов. Особое значение конструкция светильников имеет для целей маскировки (см. ниже гл. 10). Прожектора будут рассмотрены подробно ниже (том II, XVII, гл. 29 и 30).

Очень существенной характеристикой источников света является их яркость. Для целей освещения желательно иметь при той же силе света меньшую яркость, поэтому изготовляют лампы с рассеивающей колбой (матовые лампы) или применяют светильники, дающие рассеянный свет. В прожекторах, наоборот, выгодно иметь возможно большие яркости источника света, и поэтому в них устанавливаются дуговые лампы, обладающие высокой яркостью, особенно при применении в качестве электродов специальных высокоинтенсивных углей, пропитанных фтористым черным. Большие яркости также достигаются в ртутных лампах сверхвысокого давления, как уже указывалось выше. Примерные яркости источников света в стилях даются следующей таблицей:

Таблица 7

Пламя свечи	0,6	Дуга с простыми углями . . .	15 000
Керосиновая лампа	1,5	Дуга с высокоинтенсивными углями	до 90 000
Лампа накаливания с рассеивающей колбой	2,0	Поверхность солнца	100 000
Вольфрамовая нить лампы накаливания	500	Ртутная лампа сверхвысокого давления	до 180 000

§ 13. Действия света

Лучистая энергия, поглощаясь в теле, превращается в различные другие виды энергии; тела нагреваются, светятся, в них происходят фотохимические и фотоэлектрические процессы.



Рис. 58:

Нагревательное действие лучистой энергии свойственно всем длинам волн и может быть обнаружено и в ультрафиолетовой области, но, в связи с тем, что максимум энергии большинства излучающих тел (рис. 48) лежит в длинноволновом краю спектра, оно обычно приписывается красным и инфракрасным излучениям. Тепловое действие лучистой энергии может быть обнаружено термoelementом (термопарой). Это — две проволоочки разнородных металлов, спаенных одним концом; при нагревании в месте спая возникает термоэлектродвижущая сила, дающая ток в цепи измерительного прибора, к которому присоединены свободные концы проволочек. Ток пропорционален падающей на термоэлектрод лучистой мощности, что и дает возможность ее измерять.

О превращении лучистой энергии в лучистую же шла речь выше (§ 9, фотолюминесценция).

Большое значение имеют фотохимические и фотоэлектрические действия лучистой энергии: характерным является их квантовый характер: поглощение отдельного кванта энергии $h\nu$ вызывает отдельное фотохимическое или фотоэлектрическое превращение — элементарный процесс.

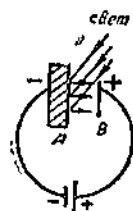


Рис. 59

Основные законы фотохимического действия. Количество вещества, прореагировавшего под действием лучистой энергии, пропорционально поглощенной энергии. Это является следствием того, что поглощение каждого кванта приводит к отдельной реакции. Происходящие при этом химические процессы могут быть весьма сложны. Их в ряде случаев можно разделить на первичные процессы, непосредственно вызываемые лучистой энергией, и вторичные процессы, сопровождающие первичные. В первичном процессе в реакцию вступают атом или молекула, возбужденные лучистой энергией (см. стр. 44), или же, когда поглощение энергии приводит к распаду молекулы (диссоциации), части распавшейся молекулы.

Вторичные процессы в большинстве случаев следуют непосредственно за первичными. Например, при действии света на смесь молекул хлора Cl_2 и водорода H_2 сразу после первичного процесса диссоциации молекулы хлора на атомы, эти атомы вступают в реакцию с молекулами водорода, что приводит к образованию хлористого водорода.

Типичным примером фотохимической реакции в твердой среде является разложение бромистого (или хлористого) серебра в зернах светочувствительной эмульсии при фотографическом процессе (подробнее см. IV, гл. 12, § 1). Здесь первичному процессу сопутствуют весьма сложные химические процессы, протекающие при проявлении.

Для первичных процессов справедлив закон эквивалентности Эйнштейна: каждый поглощенный квант вызывает один элементарный химический процесс. Для возбуждения или диссоциации необходимы достаточно большие кванты, поэтому фотохимические реакции вызываются энергией достаточно большой частоты ν . Этим объясняется то, что большинство фотохимических реакций усиливается при воздействии ультрафиолетовых лучей, обладающих большой частотой по сравнению с видимым светом. Когда первичным процессом является диссоциация молекулы, то для того, чтобы ее вызвать, необходим квант с частотой ν , большей или равной частоте ν_0 , для которой

$$h\nu_0 = D, \quad (13,1)$$

где D — энергия диссоциации.

Фотоэлектрический эффект. Сущность фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта) состоит в освобождении, или, как обычно говорят, в вырывании свободных отрицательных электрических зарядов — электронов — из вещества под действием света. Если освещать светом поверхность A вещества, дающего фотоэффект, и приложить к ней разность потенциалов так, чтобы вещество было заряжено отрицательно (рис. 59), то вырываемые электроны будут двигаться в элек-

трическом поле от A к B и создавать в цепи ток — фотоэлектрический ток (фототок).

Теория фотоэффекта состоит в следующем. Для вырывания отдельного электрона требуется затратить некоторую работу w , которая производится за счет энергии $h\nu$ падающего кванта частоты ν . Если $h\nu$ меньше w , то фотоэффекта не происходит. При $h\nu$ больше, чем w , избыток энергии превращается в энергию движения электрода — кинетическую энергию $\frac{1}{2}mv^2$, где m — масса электрона, а v — его скорость. Таким образом,

$$h\nu = w + \frac{1}{2}mv^2 \quad (13,2)$$

(уравнение Эйнштейна).

Частота ν_0 , для которой как раз $h\nu_0 = w$, определяет границу, или порог, фотоэффекта и называется граничной частотой. Для различных веществ эта граница лежит при различных длинах волн. Мы имеем следующие длинноволновые границы фотоэффекта для различных металлов (в миллимикронах):

Цезий	Калий	Натрий	Алюминий	Серебро	Вольфрам
680 $m\mu$	610 $m\mu$	580 $m\mu$	480 $m\mu$	325 $m\mu$	230 $m\mu$

Существование таких границ является ярким доказательством наличия у света квантовых свойств.

Кинетическая энергия $\frac{1}{2}mv^2$ вырванного электрона будет тем больше, чем больше частоты падающего света.

Мы имеем

$$h\nu - w = h\nu - h\nu_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

или

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_0), \quad (13,3)$$

т. е. кинетическая энергия растет пропорционально разности частот $\nu - \nu_0$, что подтверждается и опытами*.

С увеличением лучистого потока, вызывающего фотоэффект, т. е. числа падающих квантов, число вырванных электронов, а следовательно, и сила фототока, будет расти пропорционально лучистому потоку (при том же его составе). Эта зависимость, как показывает опыт, строго выполняется.

Приборы, основанные на фотоэффекте, называются фотоэлементами; им посвящена гл. 5, раздела II.

Глава 2

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 1. Основные понятия геометрической оптики. § 2. Плоское зеркало и система плоских зеркал. § 3. Преломление светового пучка через плоскости и системы плоскостей. § 4. Преломление светового пучка через сферическую поверхность и системы сферических поверхностей. § 5. Теория идеальной оптической системы. § 6. Сложение оптических систем. § 7. Ограничение пучков в оптических системах. § 8. Погрешности изображений в оптических системах. § 9. О расчете оптических систем.

Теория оптических приборов может быть в основном построена на законах геометрической оптики. Однако отдельные вопросы теории оптических

* В этих опытах создается задерживающая электроны разность потенциалов V (в случае схемы рис. 59 к A прикладывается положительное напряжение, а к B — отрицательное). Когда $\frac{1}{2}mv^2 = eV$, где e — заряд электрона, ток прекращается, т. е. электроны задерживаются полем (не доходят до B).

приборов могут быть правильно поняты и разрешены только на основе физической оптики; к ним, например, относятся вопросы, связанные с рассмотренными в предыдущей главе явлениями интерференции и дифракции света, с поглощением света в прозрачных средах и т. д.

Задача геометрической оптики в узком смысле заключается в указании простейших способов определения хода лучей световых пучков через оптическую систему и путей расчета и проектирования новых оптических систем, удовлетворяющих поставленным заранее требованиям; в последнем — практическое значение этой отрасли прикладной физики.

§ 1. Основные понятия геометрической оптики

Положения и следствия геометрической оптики основываются, с одной стороны, на известных теоремах геометрии, с другой, на четырех экспериментально установленных физических законах. Последние исходят из понятия светового луча, и касаются законов его распространения.

Эти законы следующие.

Первый закон. Всякое светящееся тело является источником световой энергии, излучаемой поверхностью тела по всем направлениям. Если размеры излучающего тела малы по сравнению с теми расстояниями, на которых изучается действие излучаемой этим телом энергии, то его можно принять за светящуюся точку. Направление, по которому распространяется световая энергия от светящейся точки, называется **лучом**.

Опыт показывает, что в однородной прозрачной среде световые лучи распространяются прямолинейно; это — закон прямолинейного распространения света. Необходимо, однако, заметить, что этот закон верен лишь в известных границах: в некоторых случаях он оказывается не вполне соответствующим действительности. Например, он оказывается неприменимым при прохождении света через очень малые отверстия (см. выше гл. 1, § 2, рис. 8). Если



Рис. 60

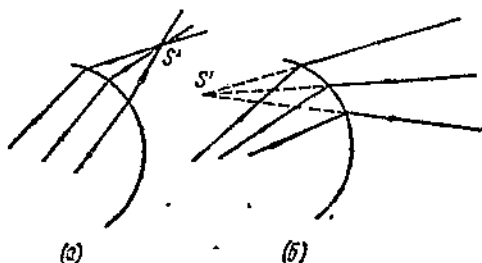


Рис. 61

отверстие экрана мало, то вокруг светлого отверстия, поместив глаз наблюдателя на прямой, можно заметить чередующиеся светлые и темные концентрические круги. Это явление противоречит закону прямолинейного распространения света; оно связано с дифракцией света (см. выше гл. 1, § 7).

Пучок световых лучей, испускаемых светящейся точкой или, наоборот, сходящихся в одной точке, называется **гомоцентрическим пучком**. Если пучки лучей, исходящие из точки S (рис. 60), после прохождения через оптический прибор вновь сходятся в точке S' , то последняя называется **изображением точки S** . Это изображение **действительное**, если в точке S' имеет место действительное пересечение лучей (рис. 61 а); точка S' называется **мнимой**, если в ней пересекаются не сами лучи, вышедшие из оптической системы, а лишь линии их продолжения (рис. 61 б).

Второй закон геометрической оптики утверждает, что световые лучи распространяются независимо друг от друга, — так, как будто других лучей, кроме рассматриваемого, не существует. Например, устанавливая непрозрачный экран P (рис. 62) на пути пучка световых лучей, мы исключаем (экранируем) из состава пучка некоторую часть его. По свойству независимости лучей мы должны считать, что действие лучей, оставшихся незаэкранированными, от этого не изменится.

Или, например, если через какую-либо точку среды проходят лучи в различных направлениях, то предполагается, что отдельные лучи не влияют друг на друга и распространяются так, как если бы других лучей и не существовало.

При определенных условиях наблюдаются здесь сложные явления интерференции (см. выше I, гл. 1, § 4), при которых взаимодействие световых лучей сопровождается ослаблением или, наоборот, усилением действия их во многих точках пространства.

Третий и четвертый законы — отражения и преломления — подробно рассмотрены выше (I, гл. 1, § 5).

Отметим здесь, в связи с этими законами, явление полного внутреннего отражения, которое находит широкое применение во многих случаях, когда в сложных оптических приборах пользуются призмами или системами призм. Из других применений заслуживает внимания прием освещения угломерных сеток, нанесенных на стеклянных пластинках, помещаемых в отсчетных зрительных трубах и прицелах. На рис. 63 изображена стеклянная пластинка с полированными поверхностями AB и CD и полированным краем BD , перед которым помещен источник света S .

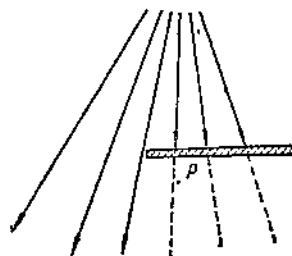


Рис. 62

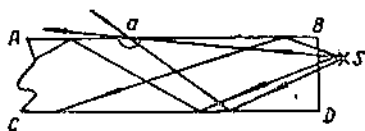


Рис. 63

Почти все лучи, входящие через грань BD , падают на грани AB и CD под углами, большими, чем предельные углы полного внутреннего отражения, и потому все эти лучи испытывают многократное отражение внутри пластинки, не преломляясь в воздух. Поэтому наблюдателю, смотрящему на пластинку в направлении, перпендикулярном граням AB и CD , пластинка будет казаться темной. Если же нанести на стекле риску (углубление) a , то лучи, попавшие на эту риску, выйдут в воздух, так как углы падения для них меньше предельных; поэтому на темном фоне риска a будет казаться яркой, самосветящейся линией.

§ 2. Плоское зеркало и система плоских зеркал

Окружающие нас предметы могут быть видимы только тогда, когда излучаемая или отражаемая ими световая энергия попадает в наш глаз.

Различаются два случая отражения (см. выше I, гл. 1, § 6) — направленное (зеркальное) и диффузное.

Изображение в плоском зеркале. Зеркалом является плоская, хорошо отполированная пластинка — стеклянная, металлическая или из какого-либо другого

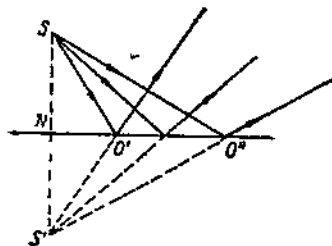


Рис. 64

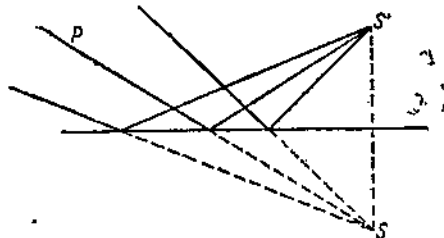


Рис. 65

материала, дающая правильное отражение. Пучок лучей, выходящий из какой-либо точки S (рис. 64), отражается от плоского зеркала таким образом, что продолжение отраженных лучей проходит через точку S' ; эта точка является мнимым изображением точки S и находится за зеркалом на нормали NS , на таком же расстоянии NS' от зеркальной поверхности, как и точка S , т. е. $SN = NS'$.

Таким образом, плоское зеркало превращает гомоцентрический пучок в гомоцентрический же, но с другим центром излучения. Доказательство этого свойства, обычно приводимое во всех учебниках физики, вытекает из равенства треугольников SNO' и $S'NO'$, SNO'' и $S'NO''$.

Зеркало может давать также и действительное изображение, если только изображаемая точка мнимая, как это представлено на рис. 65. В точке S' в этом случае сходится отразившийся от зеркала гомоцентрический пучок P ; точка S' будет, таким образом, действительным изображением мнимой точки S .

Плоское зеркало является простейшей и единственной вполне совершенной оптической системой, т. е. системой, дающей совершенные изображения точек и пространственных предметов; при этом оно изображает предметы в правильном масштабе, без увеличения или уменьшения. Прямолинейный отрезок, например стрелка CD (рис. 66), помещенная перед зеркалом, изображается в виде прямо-

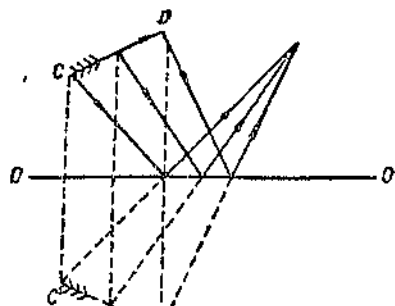


Рис. 66

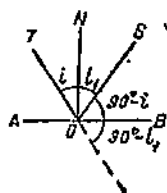


Рис. 67а

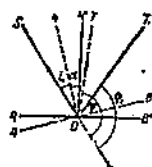


Рис. 67б

линейного отрезка $C'D'$ такой же длины; изображение какой-либо плоской фигуры в зеркале может быть совмещено с предметом путем поворота изображения вокруг оси зеркала на 180° .

Изображение пространственного предмета, даваемое плоским зеркалом, правильно передает все размеры и углы предмета, но зеркальное изображение предмета не может быть при этом совмещено с предметом: оно, как говорят, не конгруэнтно с предметом. Иногда еще изображение пространства в плоском зеркале называют не вполне обращенным. Например, изображение правой руки человека, стоящего перед зеркалом, окажется левой рукой у его изображения. Направление обращения зависит от положения наблюдателя и зеркала. Вертикальное зеркало будет обращать изображения только в горизонтальном направлении (направо — налево), горизонтальное же обращает в вертикальном (вверх — вниз).

Обращенность изображения, даваемого зеркалом, иногда используется в оптических приборах.

Изменение луча визирования при повороте зеркала. Пусть направление падающего на зеркало луча фиксировано; для изменения направления луча отраженного (луча визирования) необходим поворот зеркала. Установим зависимость между углом α поворота зеркала и углом поворота β отраженного луча. Одно зеркало отклоняет падающий луч от его первоначального направления на угол

$$\varphi = 180^\circ - 2i_1,$$

где i_1 — угол падения (рис. 67а). Если повернуть зеркало вокруг точки O на угол α (рис. 67б), то луч отраженный (луч визирования) составит с первоначальным направлением угол

$$\varphi_1 = 180^\circ - 2(i_1 + \alpha),$$

так как $(i_1 + \alpha)$ — новый угол падения.

Разность отклонений, т. е. угол поворота β линии визирования, составит:

$$\beta = \varphi - \varphi_1 = 2\alpha,$$

т. е. при повороте зеркала на угол α отраженный луч поворачивается на угол 2α в направлении вращения зеркала.

Колебание луча визирования при поворотах плоского зеркала используется, например, для передачи сигналов помощью простейшего прибора — геллиографа*, позволяющего путем отражения солнечного „зайчика“ в нужном направлении передавать световые сигналы на расстояние до 30 км.

Системы зеркал. Выше мы видели, что одно плоское зеркало дает не вполне обращенное изображение, что приводит к изменению направлений в изображении. К оптическому же прибору обычно предъявляется требование, чтобы изображение предмета было во всех отношениях подобно предмету; этого можно достигнуть постановкой двух или вообще четного количества зеркал. Очевидно, что если одно вертикально стоящее зеркало изменяет „вправо“ на „влево“, а другое вертикально расположенное зеркало еще раз изменит „вправо“ на „влево“, то получим изображение с правильными направлениями. Примером здесь может служить система из двух параллельно расположенных зеркал, применяющаяся в простейших зеркальных перископах (рис. 68).

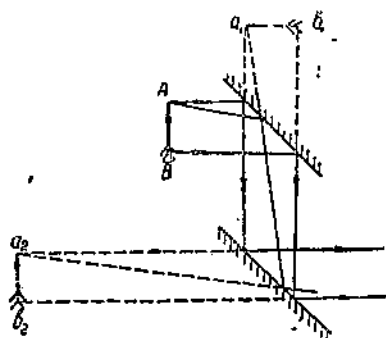


Рис. 68

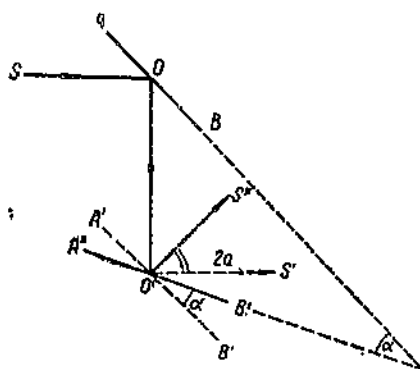


Рис. 69

скопах (рис. 68). Стрелка AB схематически представляет предмет; a_1b_1 — его мнимое изображение в верхнем зеркале перископа, a_2b_2 — его вторичное изображение в нижнем зеркале. Нетрудно видеть, что расстояние от изображения a_2b_2 до нижнего зеркала равно сумме расстояний между верхним зеркалом и предметом и между зеркалами. Заметим, что если в рассматриваемой системе зеркал, закрепив одно из них (например, верхнее зеркало), повернуть второе и перевести его из $A'B'$ в $A''B''$ (рис. 69), то отклонение отраженного от нижнего зеркала луча будет равно двойному углу 2α между зеркалами; на рис. 69 отраженный луч OS' при повороте зеркала на угол α занял положение OS'' , т. е. повернулся на угол $S''O'S'$, равный 2α .

Два зеркала, расположенные под углом в 45° (рис. 70), отклоняют падающие лучи на 90° . При покачивании или вращении такого углового зеркала вокруг ребра C изображение остается неподвижным, т. е. отклонение луча, отраженного от двух зеркал, равно двойному углу между зеркалами и не зависит от угла падения на первое зеркало.

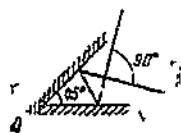


Рис. 70

В военных приборах плоское зеркало применяется там, где нужно получить параллельное смещение луча или изменение направления его. Угловые зеркала (рис. 70) применяются, например, как концевые отражатели в больших внутри-базных оптических дальномерах и предназначены для изменения направления луча на 90° .

* См. т. II, гл. 29.

§ 3. Преломление светового пучка через плоскости и системы плоскостей

Гомоцентрический пучок лучей после преломления через плоскую границу раздела двух сред с различными показателями преломления перестает быть гомоцентрическим. Рассмотрим явление подробнее. Две среды с показателями преломления n и n' разделены плоской границей AB (рис. 71). Из светящейся точки S , лежащей на расстоянии s от плоскости, распространяется гомоцентрический световой пучок. Выберем произвольный луч SM этого пучка, встречающий грань AB в точке M ; при этом углы падения и преломления обозначим через i и i' . Продолжение преломленного луча пересекает ось SO в точке S' , расстояние которой от плоскости обозначим через s' . Определим расстояние точки S' от преломляющей поверхности AB . Из треугольников OSM и $OS'M$ имеем

$$y = s \operatorname{tg} i = s' \operatorname{tg} i'.$$

Отсюда

$$s' = s \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} i'} = s \frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i}.$$

На основании закона преломления имеем

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n'}{n}.$$

После подстановки последнего в предыдущее равенство получим:

$$s' = s \frac{n' \cos i'}{n \cos i}. \quad (3,1)$$

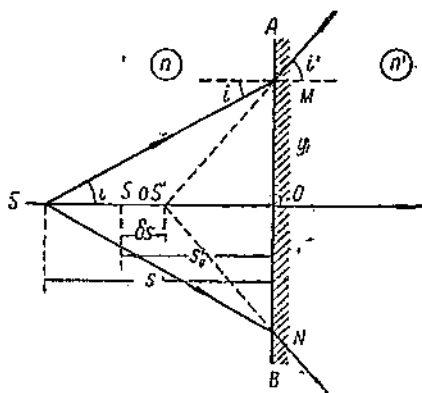


Рис. 71

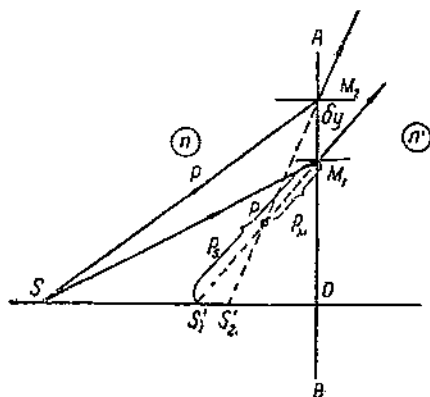


Рис. 72

В правой части этой формулы величина $s \frac{n'}{n}$ постоянная для всех углов падения i , в то время как отношение $\frac{\cos i'}{\cos i}$ зависит от угла падения i ; следовательно, и величина s' не будет оставаться постоянной, а будет зависеть от угла i . Для лучей, у которых углы падения и преломления i и i' близки к нулю, что соответствует так называемым параксиальным лучам, отношение $\frac{\cos i'}{\cos i}$ близко к единице, и величина s' оказывается равной

$$s'_0 = \frac{n'}{n} s. \quad (3,2)$$

По мере возрастания угла i точка S' удаляется от точки S'_0 , которая является параксиальным изображением точки S . Разность

$$\delta s' = s' - s'_0$$

называется продольной сферической абберацией. Она определяет длину того отрезка оси $S_0'S'$, в пределах которого расположены точки пересечения лучей, составляющих конус SMN , после их преломления.

Из последних трех формул находим

$$\delta s' = \left(\frac{\cos i'}{\cos i} - 1 \right) \frac{n'}{n} s. \quad (3,3)$$

В результате преломления гомоцентрического пучка через плоскую грань, в нем появляется не только сферическая абберация, но и так называемый астигматизм.

Рассмотрим пару весьма близких лучей SM_1 и SM_2 , находящихся в плоскости чертежа (рис. 72). Два таких луча после преломления пересекаются в точке P , которая является изображением точки S .

Обозначим отрезок PM_1 , приближенно равный PM_2 , через p_m , а отрезок $S_1'M_1$, приближенно равный $S_2'M_2$, через p_s . Разность $p_s - p_m$ (при весьма малых разностях высот падения лучей δy) называется астигматической разностью и, как доказывается в курсах геометрической оптики, выражается следующей формулой:

$$p_s - p_m = p \frac{n'}{n} \left(1 - \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i} \right). \quad (3,4)$$

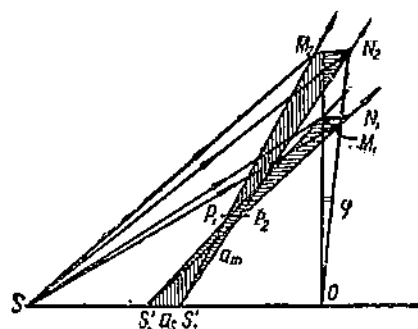


Рис. 73

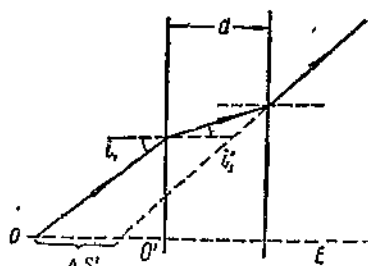


Рис. 74

Астигматическая разность обращается в нуль при $i = i' = 0$, в этом случае точка P совпадает с точкой S_1' . При возрастании угла i астигматическая разность увеличивается.

Повернем рис. 72 вокруг оси SO на малый угол φ ; лучами $S_1'M_1$ и $S_2'M_2$ вырежется узкий наклонный пучок в пространстве (рис. 73). Таким пучком точка S изображается уже не в виде точки, а в виде двух отрезков a_s и a_m , из которых первый расположен в плоскости чертежа, а второй (a_m) — перпендикулярно плоскости чертежа. Отрезок a_s называется сагиттальным изображением точки S , а отрезок a_m — меридиональным изображением этой точки. Астигматическая разность, или астигматизм, есть расстояние между этими отрезками по направлению хода луча.

Преломление пучка через плоскопараллельную пластинку. Прохождение пучка через плоскопараллельную пластинку сопровождается двумя последовательными преломлениями через плоскость. И в этом случае гомоцентрический пучок, прошедший пластинку, перестает быть гомоцентрическим. Однако сферическая абберация, появляющаяся при преломлении у первой грани пластинки, отчасти компенсируется при втором преломлении.

Всякий падающий луч выходит из пластинки параллельно своему прежнему направлению, но смещенным в сторону (рис. 74). Величина этого смещения $\Delta s'$, т. е. смещения точки O' , зависит от угла падения луча i_1 и толщины пластинки d и выражается следующей формулой:

$$\Delta s' = d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} i_1'}{\operatorname{tg} i_1} \right), \quad (3,5)$$

где d — толщина пластинки, а i_1' — угол преломления на первой грани пластинки. Тонкий пучок лучей, идущих вдоль оси OE , образует малые углы i и i' ; в этом случае отношение тангенсов углов в последней формуле можно заменить отношением синусов $\frac{\sin i_1'}{\sin i}$, которое, на основе закона преломления, равно отношению показателей $\frac{n}{n'}$. В этом случае равенство (3,5) принимает вид:

$$\Delta s' = \frac{n' - n}{n'} d; \quad (3,6)$$

последнее выражает величину смещения параксиального пучка, т. е. пучка, все лучи которого образуют малые углы падения i и i' .

Так как величина смещения луча $\Delta s'$, вышедшего из плоскопараллельной пластинки, зависит от угла падения i , заключаем, что пластинка непременно вносит сферическую абберацию в гомоцентрический пучок; например, если лучи $M_1'S_1'$ и $M_2'S_2'$ (рис. 75) продолжить назад, по выходе из пластинки они пересекут

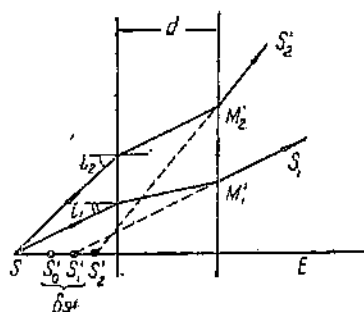


Рис. 75

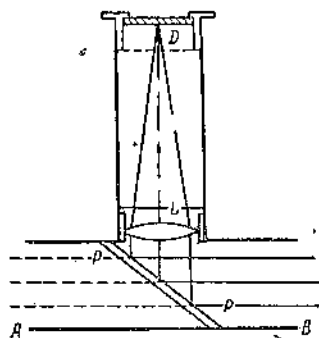


Рис. 76

ось SE в разных точках S_1' и S_2' . Через S_0' обозначена точка пересечения оси OE вышедшими из пластинки параксиальными лучами. Величина продольной сферической абберации, т. е. расстояние между точками S_2' и S_0' , выражается следующей формулой:

$$\delta s' = \frac{d}{n} \left(1 - \frac{\cos i'}{\cos i} \right), \quad (3,7)$$

где n — показатель преломления материала пластинки.

Гомоцентрический пучок лучей, преломившихся через пластинку, превращается в пучок астигматический. Астигматическая разность узкого наклонного пучка выражается, аналогично равенству (3,5), следующей формулой:

$$p_s - p_m = \frac{d}{n \cos i} \left(1 - \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i} \right). \quad (3,8)$$

Ее анализ показывает, что при большом удалении светящейся точки, когда пучок падающих лучей становится почти параллельным, нарушение гомоцентричности пучка оказывается незначительным, а при строго параллельном пучке, нормально падающем на пластинку, последняя не вызывает совершенно никаких искажений. Влияние астигматизма на изображение точки можно не учитывать во всех тех случаях, когда толщины пластинки невелики (защитные стекла, сетки в приборах и т. д.). Иначе обстоит дело в случае применения плоскопараллельных пластинок значительной толщины; к ним, как увидим ниже, могут быть отнесены отражательные призмы всякого рода, работающие в непараллельном (например, сходящемся) пучке лучей; здесь нельзя не учитывать абберации пучка, влияющие на качество изображения, даваемого прибором.

Примером применения стеклянной пластинки может служить зеркальный визир для пулеметных прицелов (рис. 76), который ставится перед объективом прицела. Прозрачная стеклянная пластинка PP , с одной стороны, пропускает лучи света в направлении AB от предмета в трубку прицела; с другой стороны, отражает в том же направлении параллельный пучок света, идущий от светящейся сетки D через линзу L . Наблюдатель, визируя прицелом в цель, видит проектирующуюся на фоне цели светящуюся сетку.

Призмы. Призмой в оптике называется прозрачное тело, ограниченное двумя или несколькими пересекающимися плоскостями. В зависимости от конструкции и условий работы, призмы разделяются на отражательные и преломляющие.

Основное назначение отражательных призм — замена зеркала или системы зеркал. Отражение света призмами основано чаще всего на явлении полного внутреннего отражения; в тех же случаях, когда полное внутреннее отражение не может иметь места, отражающие грани призмы серебрятся.

Замена зеркал призмами дает ряд технических преимуществ, а именно:

1) Призма хорошо сохраняет свою форму, углы между гранями, тогда как система зеркал легко подвергается расстройству и требует тщательной выверки при сборке.

2) Грани призмы неизменны и качество их поверхностей не портится со временем, в то время как устойчивость серебряного слоя зеркала не так велика.

3) Совершенно невозможно заменить некоторые сложные призмы, например окулярные призмы в дальномерах, какой-либо системой зеркал.

Призмы полного внутреннего отражения. Рассмотренное выше явление полного внутреннего отражения широко используется в призматических системах, так как в этих условиях отражается вся падающая на грань призмы световая энергия. Правила построения изображений в плоских зеркалах применимы и для отражательных призм. Подобно зеркальной системе, призма при нечетном числе отражений дает не вполне обращенное („зеркальное“) изображение объекта; при четном числе отражений изображение оказывается вполне обращенным. В отличие от зеркальной системы, обращающая призма не может считаться „нейтральной“ в оптической системе, так как она, подобно плоскопараллельной пластинке, вносит сферическую aberrацию и астигматизм в наклонные сходящиеся пучки. Поэтому при конструировании оптических систем призмы, по возможности, следует ставить в параллельных пучках лучей.

Во избежание окрашивания изображения вследствие разложения (дисперсии) белого светового пучка на составляющие его цветные, призма должна быть эквивалентна плоскопараллельной пластинке. Для этого необходимо равенство углов падения лучей всех цветов на входной грани и углов их преломления на выходной грани. В этом случае призма может быть „развернута“ в плоскопараллельную пластинку. Такое „развертывание“ призмы состоит в последовательном построении изображений призмы и лучей через все отражающие грани (рис. 77). Вместо истинного хода лучей aO_1a_1' , SOS' , bO_2b' , можно рассматривать ход лучей $a''O_1a_1'$, $S''OS'$, $b''O_2b'$, т. е. без изменения их направления. Значит, данная призма эквивалентна плоскопараллельной пластинке с гранями $A'B$ и AC и окрашивания давать не будет.

Число типов призм очень велико. Рассмотрим простейшие и наиболее часто встречающиеся из них, применяемые в дальномерах, панорамах, перископах и других приборах. Более сложные типы призм будут рассмотрены в последующих главах, при описании приборов, в конструкцию которых входят призмы (см. VI, гл. 16, § 3).

На рис. 77 изображена прямоугольная отражательная призма; она изменяет направление падающего луча SO на 90° . На гипотенузной грани BC лучи претерпевают полное внутреннее отражение.

Изображение, повернутое на 180° по отношению к предмету, дает прямоугольная призма, изображенная на рис. 78а. В качестве концевых отражателей в дальномерах

небольших баз применяются пентапризмы (рис. 78б), по своему действию не отличающиеся от действия системы двух зеркал (рис. 70), поставленных под углом 45° друг к другу. Направление лучей света изменяется на 90° , причем это изменение не зависит от угла падения луча на первую грань призмы.

В артиллерийских панорамах и некоторых системах перископов находит применение призм

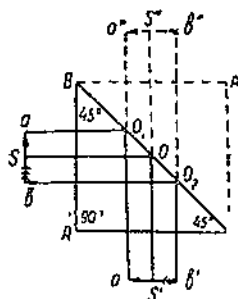


Рис. 77

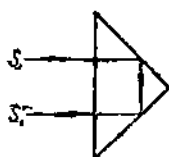


Рис. 78а

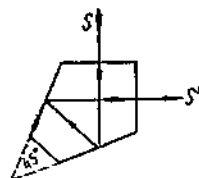


Рис. 78б

ма Дове (рис. 79). В ней получается неполное зеркальное обращение изображения в направлении „верх — низ“, при этом сохраняется направление падающих пучков лучей.

В перископах, некоторых наземных прицелах или системах, предназначенных для наблюдения всего пространства над головой наблюдателя, находит применение зенитная призма, или призма-куб

(рис. 80), представляющая собой две отражательные прямоугольные призмы, склеенные вместе гранями гипотенузы; одна из этих граней посеребрена. Каждая из склеенных половинок дает зеркальное изображение находящихся впереди призмы объектов. При на-

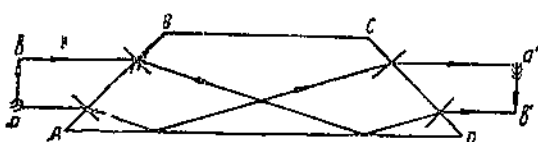


Рис. 79

клонении призмы вправо или влево действует только одна или другая половина.

Для бокового смещения падающих световых пучков без изменения их направления применяется ромбоидальная призма (рис. 81). По своему действию она подобна системе из двух зеркал (рис. 68). Величина смещения луча зависит

от расстояния между отражающими гранями и от угла падения луча. О других призмах см. в соответствующих местах (III, гл. 9, § 5 — трипельпризма).

Преломляющие призмы. В ряде военных приборов (например, компенсаторные или измерительные клинья дальномеров) существенной оптической деталью является призма с малым преломляющим углом, называемая стеклянным клином.

Преломление светового пучка через такую призму вызы-

вает не только его отклонение, т. е. изменение направления луча по выходе его из призмы, но и дисперсию пучка (см. I, гл. 1, § 5). Именно, лучи различных цветов претерпевают различное отклонение — это следствие различия показателей преломления для световых лучей разных длин волн, соответствующих различным цветам спектра.

Угол отклонения луча α , после двукратного преломления луча на гранях призмы, оказывается большим для синих и фиолетовых лучей, так как для лучей этих цветов показатель преломления стекла больше, чем, например, для лучей красных и желтых.

Кроме того, угол ε зависит от преломляющего угла призмы α и угла падения луча i_1 . В случае стеклянного клина, эта зависимость приобретает следующий вид:

$$\varepsilon = \alpha \left[\sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 i_1} - 1 \right].$$

При малых углах падения i_1 эта формула может быть представлена приближенно:

$$\varepsilon = \alpha (n - 1) \left(1 + \frac{n+1}{2n} i_1^2 \right).$$

Если угол i_1 близок к нулю, последнее выражение существенно упрощается:

$$\varepsilon = \alpha (n - 1),$$

где n — показатель преломления для данного цвета.

Разность углов отклонения для каких-либо цветов, например, соответствующих фраунгоферовым линиям F (длина волны $\lambda = 486,1 \text{ м}\mu$) и C ($\lambda = 656,3 \text{ м}\mu$) (см. I, гл. 1, § 9), определяется из последней формулы путем двукратного ее применения; эта разность равна

$$\varepsilon_F - \varepsilon_C = \alpha (n_F - n_C),$$

где $n_F - n_C$ — разность показателей преломления, соответствующая цветам F и C . Разность $n_F - n_C$ условились называть средней дисперсией стекла (см. I, гл. 1, § 5). От величины этой разности зависит дисперсия световых пучков призмой.

Средняя дисперсия $n_F - n_C$, наряду с величиной показателя преломления стекла n_D для фраунгоферовой линии спектра D (соответствующей желтым лучам с длиной волны $\lambda = 589,3 \text{ м}\mu$), положена в основу классификации оптических стекол.

§ 4. Преломление светового пучка через сферическую поверхность и системы сферических поверхностей

Основной деталью оптических приборов является линза. Линзой называется стеклянное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями (плоскую поверхность можно при этом рассматривать также как сферическую с очень большим радиусом кривизны). Заметим, что, вообще говоря, линзы могут быть изготовлены из любого прозрачного вещества, например из кварца, кристаллов каменной соли и др.; поверхности линз могут быть также и более сложной формы, например: цилиндрические, параболические и т. д. Здесь рассмотрим лишь системы из сферических преломляющих поверхностей; при этом предполагаем, что последние центрированы. Оптическая система является центрированной, если она симметрична относительно некоторой оси, так называемой оптической оси системы; на последней расположены центры кривизн всех преломляющих поверхностей линз.

Правило знаков и обозначения. При выводе уравнений и формул, выражающих оптические свойства линз, установлено определенное правило знаков для углов и отрезков прямых. Этого правила придерживаются при оформлении чертежей оптических схем, конструкций оптики, приборов и т. д.

Все углы и отрезки до преломления обозначаются малыми буквами латинского или греческого алфавита, а соответственные им величины после преломления — теми же буквами, но со штрихом наверху. Отрезки прямых отсчитываются от преломляющей поверхности и считаются положительными, если идут по направлению распространения света, и отрицательными при обратном направлении. При этом свет всегда предполагается идущим слева направо. Рис. 82 поясняет сказанное; отрезки s и p , как расположенные слева от вершины преломляющей сферы O , поставлены со знаком минус (—); отрезки s' и p' луча после преломления, расположенные справа от вершины O , считаются положительными, но знак плюс (+) обычно не ставится. Отрезки, перпендикулярные оптической

оси, считаются положительными, когда они направлены вверх от оси (как, например, высота h на рис. 82), и отрицательными, когда они направлены вниз.

Углы отсчитываются от какой-нибудь определенной оси, например от оптической оси или от нормали к преломляющей поверхности. Угол считается положительным, если его можно образовать вращением прямой линии от указанной оси в направлении, совпадающем с направлением движения часовой стрелки, и отрицательным — в противоположном случае. Следуя этому правилу, углы u , i и i' на рис. 82 поставлены со знаком минус (—), а углы φ и u' — положительные.

Сфера как простейшая оптическая система. Сферическая поверхность, разделяющая две среды с различными показателями преломления n и n' (рис. 82), является простейшей оптической системой. Предположим, что на такую поверхность с радиусом $MC = r$ падает луч SM , составляющий угол u с оптической осью. После преломления этот луч будет иметь направление MS' . Установим зависимость положения точки S' (отрезок s') от удаления светящейся точки S (отрезок $-s$), от радиуса сферы r и показателей преломления n и n' . При выводе предположим, что лучи SM и MS' являются параксиальными.

При малых углах — u и u' — можно положить: $-p = -s$ и $p' = s'$; тогда из рис. 82 имеем

$$\varphi = \frac{h}{r}, \quad -u = \frac{h}{-p} = \frac{h}{-s}, \quad u' = \frac{h}{p'} = \frac{h}{s'}. \quad (4,1)$$

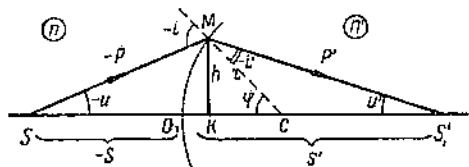


Рис. 82

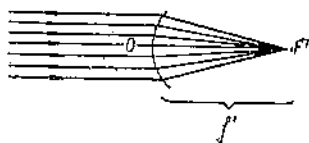


Рис. 83

Далее, угол $-i$ как внешний в $\triangle SMC$ равен сумме двух внутренних углов, т. е.

$$-i = \varphi + (-u).$$

Угол φ есть внешний угол в $\triangle MCS'$, и поэтому

$$\varphi = u' + (-i').$$

Перепишем последние два равенства в виде

$$\begin{aligned} -i &= \varphi - u, \\ -i' &= \varphi - u' \end{aligned}$$

и помножим первое на n , второе на n' :

$$-ni = (\varphi - u)n, \quad (4,2)$$

$$-n'i' = (\varphi - u')n'. \quad (4,3)$$

Согласно основному закону преломления для малых углов,

$$-ni = -n'i',$$

т. е. левые части уравнения (4,2) и (4,3) равны между собой; поэтому должны быть равны и их правые части:

$$n(\varphi - u) = n'(\varphi - u').$$

Подставив сюда значения φ , u и u' из (4,1), получим, по сокращении на h , уравнение, связывающее отрезки s , s' и r и показатели преломления n и n' :

$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'}\right). \quad (4,4)$$

Это равенство называется инвариантом Аббе. Пользуясь им, при любом положении светящейся точки S можно определить на оптической оси положение ее изображения S' . Например, при перемещении точки S на очень большое расстояние

от вершины поверхности O , или, как говорят, „в бесконечность“, лучи, падающие на сферу, параллельны; такой пучок (рис. 83) собирается в точке F' , которая называется задним главным фокусом сферы; отрезок $OF' = f'$ называется задним фокусным расстоянием. Величина f' может быть определена из уравнения (4,4), если принять $s = \infty$ ($\frac{1}{s} = 0$); в этом случае имеем

$$\frac{n}{r} = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) = \frac{n'}{r} - \frac{n'}{s'};$$

отсюда

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n'}{r} - \frac{n}{r} = \frac{n' - n}{r},$$

и, следовательно,

$$f' = s' = \frac{n'}{n' - n} r. \quad (4,5)$$

Сферические линзы. Линзы отличаются одна от другой расположением центров сферических поверхностей, их радиусами кривизн и показателями преломления вещества, из которого они сделаны. В зависимости от расположения центра

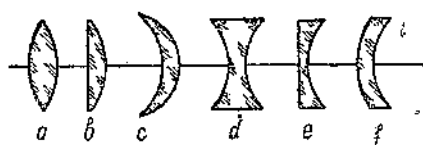


Рис. 84

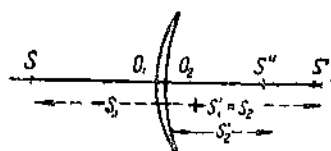


Рис. 85

преломляющей поверхности относительно вершины поверхности, радиусу сферы приписывается определенный знак согласно вышеустановленному правилу знаков для отрезков, именно, радиус сферической поверхности считается положительным, если центр поверхности расположен справа от вершины поверхности; в противном случае радиус — отрицательный.

На рис. 84 приводятся шесть основных типов линз. Рассматривая линзу как систему из двух преломляющих поверхностей, применим к ней формулы предыдущего пункта. Именно, поскольку преломление луча в линзе происходит дважды: при входе луча в стекло и при выходе его в воздух, напишем уравнение (4,4) два раза: один раз для определения положения изображения светящейся точки после первой преломляющей поверхности линзы, второй раз — для определения вторичного изображения после второй поверхности линзы. На рис. 85 светящаяся точка S изображается через первую поверхность в точке S' на расстоянии $O_1S' = s_1'$ от второй. Если пренебречь толщиной линзы, рассматривая пока лишь тонкие линзы, получим: $O_1O_2 = d \approx 0$ и, следовательно, $s_1' = s_2$. Точка S' изображается после преломления лучей через вторую поверхность в точке S'' на расстоянии $O_2S'' (= s_2')$ от линзы. Положив $n_1 = n_3 = 1$ и $n_1' = n_2 = n$, получим

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s_1} = n \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s_1'} \right),$$

$$n \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_2} \right) = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_2'}.$$

Для упрощения заменим s_1 буквой s , а s_1' буквой s' ; исключив из обоих уравнений равные величины s_2 и s_1' , получим

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4,6)$$

Это основная формула тонкой линзы. Она устанавливает зависимость между расстоянием s предмета от линзы и расстоянием s' изображения. Изображение

бесконечно далекой точки ($s = -\infty$) получается в фокусе линзы ($s' = f'$); отсюда

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4,7)$$

Эта формула определяет фокусное расстояние линзы, если известны радиусы r_1 и r_2 ее поверхностей и показатель преломления n стекла.

В зависимости от знака радиусов r_1 и r_2 изменяется знак фокусного расстояния f' в формуле (4,7); соответственно различают положительные линзы, у которых $f' > 0$, и отрицательные, имеющие $f' < 0$. К положительным линзам относятся первые три типа линз на рис. 84; к отрицательным линзам — последние три вида линз, приведенные на этом же рисунке. Например, у двояковыпуклой линзы (а, рис. 84) $r_1 > 0$, $r_2 < 0$ и, следовательно, $f' > 0$; у двояковогнутой линзы (д, рис. 84) $r_1 < 0$, $r_2 > 0$ и $f' < 0$.

Положительные линзы имеют действительный фокус, в котором собирается пучок параллельных лучей, падающий на линзу; их еще называют собирательными. Отрицательные линзы — рассеивающие: они рассеивают пучок параллельных лучей, превращая его в пучок расходящихся лучей, точка пересечения которых (фокус) оказывается мнимой.

Пример. Определить фокусное расстояние мениска (рис. 84, с), у которого $r_1 = -200$ мм, $r_2 = -150$ мм и $n = 1,6$. Из формулы (4,7) получим

$$\frac{1}{f'} (1,6 - 1) \left(\frac{1}{-200} - \frac{1}{-150} \right) = 0,6 \left(\frac{-50}{-200 \cdot 150} \right) = + \frac{0,6}{600} = + \frac{1}{1000},$$

отсюда $f' = +1000$ мм.

§ 5. Теория идеальной оптической системы

Применяющиеся оптические системы, даже если они были специально рассчитаны, неизбежно дают изображение предмета в большей или меньшей степени искаженным и отдельные детали его — размытыми. В зависимости от строгости требований, предъявляемых к качеству изображения, соответственно назначению оптического прибора, применяют оптические конструкции различной степени сложности; тем самым расширяются возможности расчета систем повышенного качества. На погрешностях изображений в реальных оптических приборах остановимся ниже (§ 8). Здесь же введем весьма плодотворное для построения некоторой геометрооптической теории понятие об идеальной оптической системе, свободной от всех недостатков реальных систем. Эта идеализированная система позволяет построить общую теорию для приближенного решения различных задач практической оптики, независимо от частных конструктивных особенностей конкретных приборов.

Идеальная оптическая система удовлетворяет следующим трем условиям (так называемым условиям Максвелла):

1. Всякий гомоцентрический пучок, вступающий в оптическую систему, остается гомоцентрическим, выйдя из нее (рис. 60). Иными словами, всякая точка изображается также в виде точки.

2. Изображение всякого предмета, лежащего в плоскости, перпендикулярной оптической оси, подобно самому предмету, т. е. остается таким же по форме, отличаясь от него лишь размерами.

3. Изображением плоскости, перпендикулярной к оптической оси, является плоскость, также перпендикулярная к оси.

Ни одна реальная оптическая система, за исключением плоского зеркала, не удовлетворяет этим условиям вполне строго.

Фокусы и главные точки идеальной оптической системы. Пусть (рис. 86) OO' изображает некоторую оптическую систему. Обозначим величину объекта AB через l , а величину его изображения $A'B'$ — через l' .

Отношение линейных размеров изображения l' к соответствующим им (или, как говорят, сопряженным им) размерам объекта l называется **линейным увеличением** оптической системы

$$\beta = \frac{l'}{l}. \quad (5,1)$$

Линейное увеличение β идеальной системы есть некоторая постоянная величина для данной пары сопряженных плоскостей P и P' (т. е. таких, когда одна плоскость является изображением другой), расположенных перпендикулярно оси, в которых лежат отрезки AB и $A'B'$ (рис. 86), т. е. значение β не должно зависеть от величины l объекта. В противном случае утеривается подобие между предметом и его изображением, что противоречит второму условию Максвелла.

Перемещая объект вдоль оси, мы будем получать различные значения линейного увеличения. В частном случае можно определить для всякой оптической системы такую пару сопряженных плоскостей, для которой линейное увеличение β равно единице:

$$\beta = +1, \quad (5,2)$$

т. е. линейный объект в этом случае должен быть равным по величине своему изображению и одинаково с ним направленным относительно оптической оси (на последнее указывает знак плюс, в соответствии с введенным в § 4 правилом

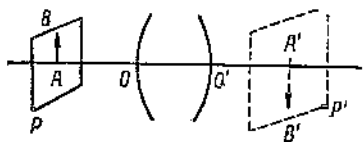


Рис. 86

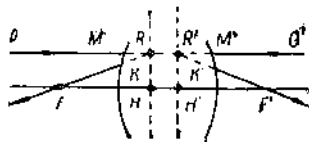


Рис. 87

знаков). Эту пару сопряженных плоскостей называют **главными плоскостями** системы. На рис. 87 указано одно из возможных положений главных плоскостей. Для определения положения этих плоскостей можно поступить следующим образом. Предположим, что на нашу оптическую систему падает луч PM , параллельный оптической оси. Пройдя через систему, луч будет иметь некоторое направление $K'F'$. Предположим дальше, что в нашу систему вступает луч $Q'M'$, идущий справа налево, параллельно оптической оси и на том же расстоянии от нее, что и луч PM . Пройдя через систему, этот луч будет иметь некоторое направление KF . Если бы выходящему лучу KF было дано обратное направление — от F к K , то, очевидно, он прошел бы путь через оптическую систему в обратной последовательности и, выйдя из системы, имел бы направление $M'Q'$. Таким образом, точку R можно рассматривать как точку пересечения лучей PM и FK , вступающих в систему, т. е. она является вершиной пучка лучей, вступающих в систему („светящейся точкой“). Изображением этой точки будет, очевидно, точка R' пересечения выходящих из системы лучей. Если теперь из точки R опустить перпендикуляр RH на оптическую ось и отрезок RH считать объектом, то отрезок $R'H'$ будет, очевидно, его изображением. Но $RH = R'H'$. Следовательно, найденная пара сопряженных отрезков удовлетворяет условию (5,2). Плоскости H и H' , в которых лежат эти отрезки, и будут **главными плоскостями** системы. Точки их пересечения с оптической осью называются **главными точками** системы.

Когда светящаяся точка, перемещаясь вдоль по оптической оси, удаляется в бесконечность, то ее изображение получается в точке F' (рис. 87), называемой **точкой заднего фокуса**; в фокусе пересекаются по выходе из системы все лучи, вступающие в систему параллельно оптической оси. Точкой **переднего фокуса** называют ту точку, в которую надо поместить точечный объект для

того, чтобы его изображение находилось на бесконечности. При этом лучи, вышедшие из точки F (рис. 87), пройдя через систему, пойдут пучком, параллельным оси. Плоскости, перпендикулярные оптической оси и проходящие через точки фокусов F и F' , называются соответственно передней и задней фокальными плоскостями. Расстояние $HF=f$ от передней главной точки H до переднего фокуса F (рис. 87) носит название переднего фокусного расстояния. Аналогично $H'F'=f'$ является задним фокусным расстоянием. Заметим, что фокусы F и F' , в отличие от главных точек H и H' , не являются сопряженными между собой.

Увеличение системы. Рассмотрим прием графического построения изображений в оптических системах. Если известно положение главных точек и фокусов системы, то всякого рода построения можно выполнить, пользуясь свойствами фокусов системы. Луч BK , параллельный оптической оси, после преломления пойдет через точку заднего фокуса F' (рис. 88). Луч BM , проходящий через точку переднего фокуса, после преломления через систему выйдет параллельно оптической оси. Пересечение лучей $K'B'$ и $M'B'$ определит точку B' , которая явится изображением точки B . Так как по условию наша система идеальная, то все лучи, вышедшие из точки B , после преломления должны пересечься в точке B' . Изображение точки A расположено на главной оптической оси в точке A' . Отрезок $A'B'$, таким образом, явится изображением отрезка AB .



Рис. 88

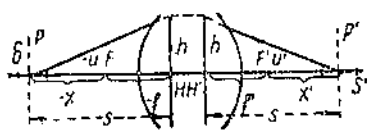


Рис. 89

Обозначим расстояние изображения от точки заднего фокуса (отрезок $F'A'$) через x' , расстояние предмета от переднего фокуса — через x ; по правилу знаков, ставим на чертеже $-x$, так как предмет находится левее точки F . Из подобия треугольников ABF и HFQ следует

$$\frac{HF}{AF} = \frac{HQ}{AB}.$$

Так как $HF=-f$, $HQ=-l'$, получаем:

$$\frac{-f}{-x} = \frac{-l'}{l}. \quad (5,3)$$

Аналогично из другой пары подобных треугольников $H'R'F'$ и $F'A'B'$ находим

$$\frac{x'}{f'} = \frac{-l'}{l}. \quad (5,4)$$

Сопоставив равенства (5,3) и (5,4) с выражением (5,1), получим

$$\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}. \quad (5,5)$$

Эта формула позволяет, зная расстояния x или x' и фокусное расстояние системы, определить линейное увеличение β . Линейное увеличение имеет определенное значение только для той заданной плоскости, в которой находится предмет, и для соответственной, или, как говорят, сопряженной плоскости изображения.

Взаимосопряженными между собой являются также предметы и их изображения, имеющие глубину, т. е. пространственные. Прямолинейный отрезок, параллельный оптической оси, изображается в виде сопряженного ему прямоли-

нейного отрезка, также параллельного оптической оси. Увеличение здесь, однако, другое, чем для поперечных линейных размеров. Оно называется *продольным* или *осевым* увеличением. Обозначим через δ и δ' малые участки оси вблизи сопряженных плоскостей P и P' (рис. 89). Продольным увеличением будет следующее отношение:

$$\alpha = \frac{\delta'}{\delta}. \quad (5,6)$$

В курсах геометрической оптики доказывается, что это отношение равно отношению расстояний (x' и x) сопряженных плоскостей P' и P от соответственных точек фокусов, т. е.

$$\alpha = -\frac{x'}{x}. \quad (5,7)$$

Из равенства (5,5) следует, что

$$x' = -\beta f' \quad \text{и} \quad x = -\frac{f}{\beta}. \quad (5,8)$$

Так как для систем, находящихся в воздухе, $f = f'$, т. е. переднее и заднее фокусные расстояния равны, после подстановки (5,8) в выражение (5,7) находим

$$\alpha = \beta^2, \quad (5,9)$$

т. е. продольное или осевое увеличение равно квадрату линейного увеличения.

Введем еще понятие об угловом увеличении системы. Пусть некоторый луч пересекает оптическую ось в плоскости P (рис. 89) под углом u ; сопряженный ему луч, пересекающий ось в плоскости P' , образует угол u' с оптической осью. Угловым увеличением γ в сопряженных плоскостях P и P' называется отношение тангенсов углов u и u' , т. е.

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}. \quad (5,10)$$

Установим связь между угловым увеличением γ и линейным увеличением β . Обозначим расстояние плоскостей P и P' от главных плоскостей H и H' через s и s' . Из рис. 89 имеем:

$$-s = -f - x \quad \text{и} \quad s' = f' + x'. \quad (5,11)$$

Далее

$$\operatorname{tg}(-u) = \frac{h}{-s} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} u' = \frac{h}{s'}. \quad (5,12)$$

Равенства (5,10) и (5,12) дают

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{s}{s'}, \quad (5,13)$$

или, на основании равенств (5,11), находим

$$\gamma = \frac{f+x}{f'+x'}. \quad (5,14)$$

Заменив в этом выражении величины x и x' через β_1 [равенство (5,8)], после упрощений получим

$$\gamma = \frac{1}{\beta}. \quad (5,15)$$

т. е. угловое увеличение в сопряженных плоскостях равно обратному значению линейного увеличения.

Уравнения Ньютона и Гаусса. Из формулы (5,5) непосредственно следует

$$xx' = ff'. \quad (5,16)$$

Пользуясь этим уравнением, можно, по известным фокусным расстояниям и положению предмета относительно переднего фокуса, найти положение изображения на оптической оси системы. Полученное выражение называется уравнением Ньютона.

Если система находится в воздухе, то у нее, как доказывается в курсах оптики, переднее фокусное расстояние по абсолютной величине равно заднему фокусному расстоянию ($-f=f'$) и равенство (5,16) принимает вид:

$$xx' = -f^2. \quad (5,17)$$

Так как для какой-либо определенной системы фокусное расстояние есть величина постоянная, то при увеличении x , т. е. при удалении предмета влево от переднего фокуса системы, его изображение будет приближаться к заднему фокусу (x' будет уменьшаться). При $x=\infty$, x' будет равно нулю, т. е. изображение совместится с фокусом. При $x=-f$, $x'=f$, т. е., если предмет расположится на двойном фокусном расстоянии слева от передней главной плоскости, его изображение получится также на двойном фокусном расстоянии справа от задней главной плоскости.

Положение объекта и его изображения иногда удобнее определять отрезками s и s' , т. е. через их расстояния от главных плоскостей системы.

Из рис. 89 находим

$$\begin{aligned} x &= s - f, \\ x' &= s' - f'. \end{aligned} \quad (5,18)$$

Подставляя эти выражения для x и x' в уравнение Ньютона (5,16), получим после сокращений

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1. \quad (5,19)$$

Или, для случая, когда $-f=f'$, находим

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}. \quad (5,20)$$

Полученное выражение называется уравнением Гаусса. Наряду с вышеустановленными соотношениями и в частности с равенствами (5,5), (5,9) и (5,15) оно является основным выражением геометрической оптики.

Построение изображений в оптической системе. Установленные выше соотношения (5,5) и (5,20) дают возможность определить расстояние изображения от оптической системы и величину его, если известны расстояние объекта от этой системы и величина объекта. Этот же вопрос может быть решен графическим методом. Выполняемые при этом геометрические построения исходят из основного свойства фокусов системы: именно, луч, падающий на систему параллельно оптической оси, выходит из системы так, что пересекает оптическую ось в заднем фокусе системы, и всякий луч, проходящий через передний фокус системы, по выходе из нее проходит параллельно оптической оси. Обычно рассматривают здесь три частных случая положения предмета, именно: предмет находится между передней главной плоскостью системы и передним фокусом ее; предмет расположен дальше переднего фокуса и в то же время ближе, чем двойное фокусное расстояние; и, наконец, случай, когда предмет расположен относительно главной плоскости дальше, чем на двойном фокусном расстоянии системы. В первом случае изображение предмета оказывается мнимым, уменьшенным и прямым, т. е. ориентированным так же, как и предмет; во втором случае изображение оказывается действительным, увеличенным и обратным, т. е. ориентированным противоположно предмету; наконец, в третьем случае изображение получается действительным, уменьшенным и обратным; этот случай представлен на рис. 90.

Предоставляем читателю также убедиться, что в случае изображения через рассеивающие (отрицательные) системы, независимо от расположения предмета, изображение всегда оказывается мнимым, уменьшенным и прямым; построение, относящееся к этому случаю, приведено на рис. 91.

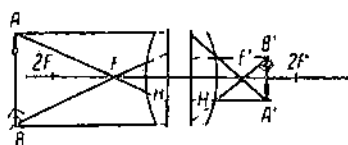


Рис. 90

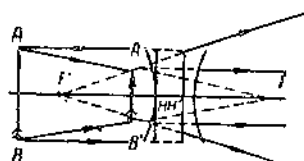


Рис. 91

§ 6. Сложение оптических систем

Всякий оптический прибор представляет систему из двух или нескольких компонентов, понимая под последними комбинации из нескольких линз. Для уяснения хода лучей и действия такой системы должно быть известно положение фокусов и главных плоскостей в каждом компоненте и их взаимное расположение друг относительно друга. На рис. 92 схематически представлена двухкомпонентная система, у которой первый компонент имеет фокусное расстояние f_1' , а второй — фокусное расстояние f_2' ; расположение основных точек F_1, F_1', H_1 и H_1' для первого компонента и F_2, F_2', H_2 и H_2' для второго, а также расстояние d между компонентами предполагаются известными. Первейшей задачей является определение фокусного расстояния такой двухкомпонентной системы. Геометрическая оптика дает, применительно к рассматриваемому случаю, следующую формулу:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{d}{f_1' f_2'}, \quad (6,1)$$

где f' — фокусное расстояние всей системы.

В качестве слагаемых в равенство (6,1) входят величины, обратные величинам фокусных расстояний. Величину, обратную фокусному расстоянию линзы или компонента, называют оптической силой и обозначают через $\varphi = \frac{1}{f'}$. Таким образом, равенство (6,1) может быть написано еще в таком виде:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d, \quad (6,1a)$$

где φ_1 и φ_2 — оптические силы компонентов.

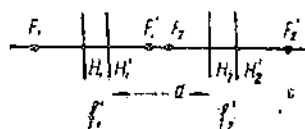


Рис. 92

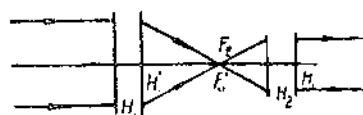


Рис. 93

Оптическая сила линзы обычно измеряется в диоптриях. За единицу принимается оптическая сила линзы, имеющей фокусное расстояние, равное 1 м. Например, очковое стекло с фокусным расстоянием $20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ имеет оптическую силу

$$\varphi = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ диоптрий.}$$

Из равенства (6,1a) следует, что если сложить две тонкие линзы вплотную ($d=0$), то оптическая сила сложной линзы равна сумме оптических сил каждой из линз:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (6,2)$$

Телескопические системы. Увеличивая расстояние d между компонентами, можно сделать оптическую силу системы равной нулю ($\varphi = 0$). Такая система будет иметь „бесконечно большое“ фокусное расстояние, и, следовательно, пучок параллельных лучей, поступающий в такую систему, по выходе из нее будет также оставаться параллельным. Оптические системы, обладающие подобным свойством, называются телескопическими. Телескопические системы имеют большое практическое значение благодаря тому, что все оптические приборы для наблюдения удаленных целей (зрительные трубы, бинокли, перископы и т. д.) являются системами такого рода. Им посвящается специальная глава 16 данной книги.

Для телескопической системы $\varphi = 0$ и, таким образом, из равенства (6,1а) следует

$$d = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_1 \varphi_2} = \frac{1}{\varphi_1} + \frac{1}{\varphi_2} = f_1' + f_2'. \quad (6,3)$$

Следовательно, для того, чтобы система оказалась телескопической, достаточно расположить компоненты друг от друга на расстоянии d , равном алгебраической сумме фокусных расстояний f_1' и f_2' ее компонентов.

Условимся первый компонент телескопической системы называть объективом, а второй — окуляром. Очевидно, в телескопических системах задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра, так как только в этом случае оказывается удовлетворенным условие $d = f_1' + f_2'$. Пучок лучей, идущих параллельно оси по выходе из объектива (рис. 93), проходит через точку F_1' его заднего фокуса. Но эта точка является вместе с тем точкой переднего фокуса окуляра F_2 . По свойству этой точки лучи пучка должны оставаться по выходе из окуляра также параллельными оптической оси. Из рассмотрения рис. 93 нетрудно заметить, что ширина параллельного пучка, выходящего из окуляра, меньше ширины пучка, падающего на объектив. Здесь простая пропорция

$$\frac{H}{h} = \frac{f_1'}{f_2'},$$

где H и h — поперечные сечения светового пучка при входе и выходе его из системы.

Телескопическая система имеет некоторое угловое увеличение γ , т. е. угол зрения, под которым глаз наблюдателя видит изображение в приборе, обычно оказывается большим того угла, под которым виден сам объект невооруженным глазом. Как показывает теория, это увеличение телескопической системы (γ) оказывается равным написанному выше отношению:

$$\gamma = \frac{H}{h} = \frac{f_1'}{f_2'}, \quad (6,4)$$

т. е. увеличение телескопической системы равно отношению фокусного расстояния объектива f_1' к фокусному расстоянию окуляра f_2' , поэтому в зрительных трубах большого увеличения необходимо применение длиннофокусных объективов в комбинации с короткофокусными окулярами.

Линзы конечной толщины. Выше (§ 4) были рассмотрены свойства и выведены формулы (4,6) и (4,7), относящиеся к тонким линзам. Эти формулы получены в предположении, что толщина линзы d исчезающе мала по сравнению с величиной ее фокусного расстояния. В тех случаях, когда толщиной линзы нельзя пренебречь ($d \neq 0$) (случай линз конечной толщины), построение изображений, а также определение положения изображения для заданного положения предмета может быть выполнено применением той же формулы Гаусса с тем лишь отличием, что расстояния s предмета и изображения s' отсчитываются не от вершин преломляющих поверхностей линзы, а от ее главных плоскостей.

Положения главных плоскостей в линзе зависят от конструкции ее, т. е. от радиусов поверхностей r_1 и r_2 , от толщины линзы d и показателя преломления стекла n . На рис. 95 показано расположение главных плоскостей у шести различных простых линз. Линзы, расположенные в первом ряду (рис. 95), относятся к группе положительных, или собирающих, линз; линзы второго ряда принадлежат к группе отрицательных, или рассеивающих, линз.

Геометрическая оптика дает следующую формулу, определяющую фокусное расстояние линзы конечной толщины:

$$f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1) + (n-1)d]}. \quad (6,5)$$

Заметим, что в случае тонкой линзы $d=0$ эта формула, естественно, может быть преобразована в выражение (4,7).

Положения главных плоскостей линзы обычно определяют относительно ее вершин O_1 и O_2 (рис. 94) отрезками O_1H и O_2H' . Эти отрезки также зависят от конструкции линзы:

$$O_1H = -\frac{dr_1}{n(r_2-r_1) + (n-1)d}, \quad (6,5a)$$

$$O_2H' = -\frac{dr_2}{n(r_2-r_1) + (n-1)d}.$$

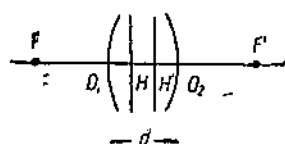


Рис. 94

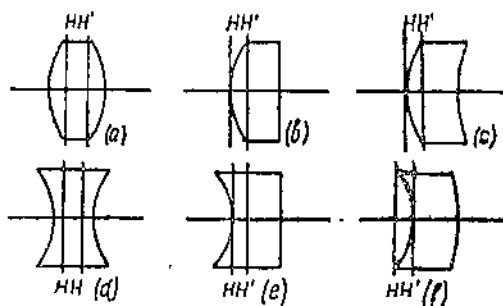


Рис. 95

Анализ этих формул показывает, что расстояние HH' между главными плоскостями линзы равно приблизительно величине $\left(1 - \frac{1}{n}\right)d$ и не зависит от формы линзы; например, в случае, когда $n=1,5$, это расстояние оказывается равным $\frac{1}{3}d$, т. е. главные плоскости делят толщину линзы d на три приблизительно равные части. Это свойство оказывается точно соблюденным в случае равносторонней линзы (рис. 95 а), имеющей радиусы r_1 и r_2 равными по величине, но отличными по знаку:

$$r_1 = -r_2.$$

В том случае, формулы (6,5а) приобретают следующий вид:

$$O_1H = \frac{d}{2n},$$

$$O_2H' = -\frac{d}{2n}.$$

При дополнительном условии, что $n=1,5$, имеем

$$O_1H = \frac{d}{3},$$

$$O_2H' = -\frac{d}{3}.$$

Сравнивая положение главных плоскостей в линзах различной формы (рис. 95), можно сделать следующее заключение: при непрерывном изменении радиуса r_2 второй поверхности в одну сторону без изменения радиуса r_1 первой поверхности, главные плоскости непрерывно перемещаются в одном и том же направлении. При этом расстояние между главными плоскостями остается все время

почти неизменным и равным приблизительно трети толщины линзы. Это заключение остается приблизительно верным до тех пор, пока радиусы r_1 и r_2 не сделаются близкими по величине и по знаку.

Простые линзы очень часто применяются в качестве коллективов зрительных труб, луп малого увеличения, коллективных линз окуляров и т. д.

§ 7. Ограничение пучков в оптических системах

Оптическая система состоит из линз, призм, зеркал, вмонтированных в оправы. Кроме того, почти во всех оптических приборах имеются непрозрачные экраны с отверстиями — диафрагмы, которые так же, как и оправы линз, ограничивают световые пучки, вступающие и проходящие сквозь систему. Таким образом, во всех оптических приборах имеет место ограничение пучков лучей. Ограничение пучков определяет ряд основных свойств оптических систем и прежде всего — их апертуру и поле зрения. С апертурой связана, кроме того, разрешающая способность и качество изображения.

Та диафрагма или оправа одной из линз, которая ограничивает пучки лучей, проходящих через систему, называется апертурной, или действующей диафрагмой.

Наряду с апертурной диафрагмой в каждой оптической системе имеется диафрагма, ограничивающая поле зрения системы. Эта диафрагма называется диафрагмой поля зрения.

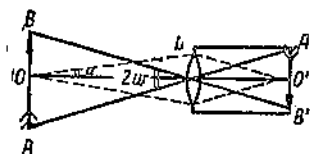


Рис. 96

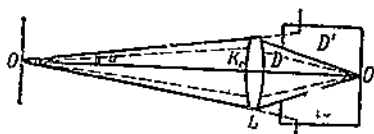


Рис. 97

Поясним сказанное на простом примере. Представим себе камеру с отверстием, закрытым линзой L (рис. 96), дающей на задней стенке камеры изображение $A'B'$ некоторого предмета AB . Апертурной диафрагмой в рассматриваемом случае будет являться само отверстие камеры. Для определения угла поля зрения 2ω прибора необходимо соединить крайние точки A' и B' изображения с центром линзы и продолжить лучи до пересечения с плоскостью предмета AB . Очевидно, на экране $A'B'$ могут быть получены изображения только тех точек предмета, которые лежат внутри некоторого угла 2ω , называемого углом поля зрения. Диафрагмой поля зрения в рассматриваемом случае будет являться задняя стенка камеры, своими краями ограничивающая изображение, создаваемое линзой L . Увеличивая размеры задней стенки камеры, увеличиваем тем самым угол 2ω , а следовательно, и величину поля зрения прибора.

Приведем второй пример. Допустим, что имеется система, отличающаяся от рассмотренной только тем, что линза L помещена перед стенкой камеры (рис. 97).

Если для определения отверстия пучка, выходящего из точки O и проходящего сквозь систему, мы, как и раньше, соединим точки O с краями отверстия D в передней стенке камеры, то не получим правильного решения, так как после преломления в линзе L луч OK_1 пройдет не через край действующей диафрагмы D , а ниже его. Для определения наибольшего отверстия пучка, проходящего через систему, необходимо, очевидно, взять лучи, которые после преломления в линзе, пройдут через край отверстия действующей диафрагмы D . Ход этих лучей проще всего определить следующим образом. Предположим, что диафрагма D является предметом, который рассматривается через линзу L из точки O . Пусть D' будет изображением этой диафрагмы. Соединяя точку O с краями изображения D' , очевидно, определим направления тех лучей, которые после прелом-

ления в линзе L пройдут через края действующей диафрагмы D . Изображение D' действующей диафрагмы D в пространстве предметов называется входным зрачком системы. Таким образом, для определения максимально возможного отверстия пучка, проходящего через систему, необходимо соединить центр предмета с краями входного зрачка.

Изображение действующей диафрагмы D в пространстве изображений называется выходным зрачком системы; в рассмотренном примере сама диафрагма D одновременно будет являться и выходным зрачком, так как между ней и плоскостью изображения O' никаких линз не расположено.

Угол, образованный лучом, соединяющим центр предмета O с краем входного зрачка D' и оптической осью, называется апертурным углом (u). Синус этого угла ($\sin u$) называется числовой апертурой системы. Яркость изображения, даваемого оптической системой, зависит от величины числовой апертуры, точнее, пропорциональна квадрату апертуры; поэтому квадрат апертуры иногда называют светосилой прибора.

Если предмет расположен на „бесконечно далеком“ расстоянии, то апертурный угол со стороны предмета равен нулю ($u=0$); в этом случае количество света, проходящего через систему, определяется апертурным углом со стороны изображения — выходной апертурой пучка.

В фотографических объективах апертура характеризуется отношением $\frac{D}{f'}$, где D — диаметр входного зрачка, f' — фокусное расстояние объектива. Это отношение носит название относительного отверстия.

Освещенность изображения, даваемого объективом, оказывается пропорциональной квадрату относительного отверстия $\left(\frac{D}{f'}\right)^2$, поэтому последнее иногда называют светосилой объектива. Если на оправе объектива фотоаппарата написано „ $F=250$ мм, $1:4,5$ “, то это значит, что фокусное расстояние объектива 250 мм и что оно в 4,5 раза больше диаметра входного зрачка. Чем больше относительное отверстие, тем „светосильнее“ объектив, т. е. тем ярче даваемое им изображение. Теоретический предел принципиально возможных относительных отверстий $1:0,5$, к чему приближаются объективы микроскопов.

Светосила зрительных труб характеризуется величиной диаметра выходного зрачка; условно принято называть светосилой трубы квадрат диаметра выходного зрачка, выраженного в миллиметрах. Заметим, что если диаметр выходного зрачка трубы больше диаметра зрачка глаза, то последний, срезая крайние лучи, уменьшает светосилу прибора. В зрительных трубах, предназначенных для наблюдения в сумерках, когда зрачок глаза расширен, диаметр выходного зрачка трубы должен быть не менее 7 мм, т. е. светосила трубы должна быть не менее 49.

Если иногда и делают выходной зрачок трубы значительно больше зрачка глаза, то преследуют этим не повышение светосилы, а удобство пользования трубой (например, танковый прицел, прицел Альдиса для пулеметов).

Положение зрачков в некоторых типах оптических систем. В фотографических объективах (см. IV, гл. 12, § 2) апертурная диафрагма почти всегда расположена внутри объектива; ее изображение через первую половину служит входным зрачком, изображение через вторую половину объектива — выходным зрачком. Если объектив по конструкции строго симметричен, то оба зрачка равны по величине и, следовательно, расположены в главных плоскостях объектива. Например, в старинной конструкции симметричного фотографического объектива, известного под названием „апланат Штейнгеля“ (рис. 98), апертурная диафрагма Q_1Q_2 находится между обеими частями системы на равных расстояниях от них. Входной зрачок — мнимое увеличенное изображение диафрагмы, даваемое первой половиной объектива; выходной зрачок $P_1'P_2'$ — изображение той же диафрагмы, даваемое второй половиной объектива. Так как $P_1P_2=P_1'P_2'$, т. е. линейное увеличение в сопряженных плоскостях равно $+1$, то эти плоскости являются главными.

В большинстве зрительных труб (см. т. II, VI, гл. 16, § 4) или в призмённых биноклях входным зрачком служит оправа самого объектива; выходным зрачком — изображение отверстия объектива через всю последующую оптику системы. Выходной зрачок всегда находится за окуляром, обычно на расстоянии 10—15 мм для обыкновенных систем, на 20—25 мм — для систем, предназначенных к применению в противогасах, и на 70—80 мм — в винтовочных прицелах.

В системах, впереди которых имеется неподвижная или поворачивающаяся призма, последние обычно и служат входным зрачком.

В заключение заметим, что ограничение пучков в системах приводит к тому, что яркость изображения, даваемого приборами, оказывается наибольшей в центре, т. е. в области, расположенной в непосредственной близости к оптической оси; точки предмета, расположенные достаточно далеко от оптической оси, изображаются системой менее ярко, вследствие того, что некоторая часть световых лучей, посылаемых этими точками в систему, срезается оправками линз или иными диафрагмами прибора. Это падение освещенности изображения от центра к краю поля зрения происходит не резко, а постепенно.

Такое ослабление света вследствие ограничения пучков лучей, проходящих через систему, носит название виньетирования.

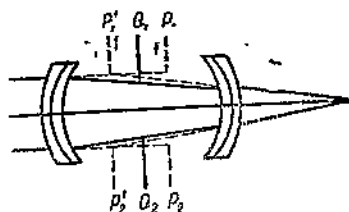


Рис. 98

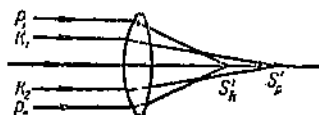


Рис. 99а

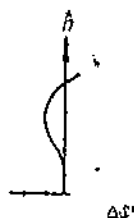


Рис. 99б

В визуальных системах иногда допускается очень большое виньетирование пучков на краю поля зрения. В фотографических объективах оно обычно не превышает 50%, а в широкоугольных объективах — 70—75%, т. е. лишь 25% лучей пучка пропускаются системой и участвуют в образовании изображения; повышенные виньетирования на границах поля обычно приводит к тому, что фотопластинка на краях оказывается недоэкспонированной.

§ 8. Погрешности изображений в оптических системах

Установленные выше законы изображения применимы к идеальным оптическим системам; к последним приближаются системы, имеющие малые отверстия (диафрагмы); при этом предполагается, что изображаемый объект расположен вблизи оптической оси и имеет также малые размеры. Законы, полученные при таких ограничениях (область параксиальной оптики), применимы к реальным системам лишь в первом приближении. Реальная система, например, изображает точечный объект не в виде точки, а в виде некоторого размытого пятна (фигуры рассеяния), размеры которого могут быть сравнительно велики; изображение плоскости, перпендикулярной к оптической оси системы, оказывается вообще не плоским, а искривленным в большей или меньшей степени; прямая линия изображается в виде линии искривленной и т. д. Такие недостатки оптических систем называются аберрациями.

Различают аберрации осевые, т. е. аберрации изображения точек, расположенных на оптической оси прибора, и полевые, или аберрации изображения точек, расположенных в пределах некоторого поля зрения.

Качество изображения объекта лучами строго определенной длины волны (монокроматическим светом) зависит от совершенства коррекции монокроматических аберраций (как осевых, так и полевых). Изображение объекта в белом свете (являющемся синтезом лучей различных цветов) может

оказаться окрашенным (хроматичным), что будет зависеть от величины и характера исправления так называемых хроматических aberrаций оптической системы.

Сферическая aberrация. Гомоцентрический пучок лучей, вышедших из точки, расположенной на оптической оси системы, не остается гомоцентрическим. Установленные выше формулы Ньютона (5,16) или Гаусса (5,20), определяющие положение изображения при заданном положении предмета, относились к случаям, когда лучи гомоцентрического пучка образовывали малые углы с оптической осью (параксиальные лучи); если же угол между крайними лучами гомоцентрического пучка и оптической осью велик, то точки пересечения оси различными лучами пучка, после выхода лучей из системы, окажутся расположенными на различных расстояниях от системы (рис. 99). Это явление носит название сферической aberrации. На рисунке показано преломление конуса параксиальных лучей P_1P_2 , собирающихся в точке S_p' на оси системы и конуса крайних лучей K_1K_2 , пересекающих ось в точке S_k' ; расстояние $S_k'S_p'$ характеризует продольную сферическую aberrацию. Если крайний луч по выходе из системы пересекает оптическую ось в точке, расположенной ближе к системе, чем точка пересечения оси параксиальным лучом, то система называется недонисправленной в отношении сферической aberrации; в противоположном случае система называется переисправленной. У всех простых положительных (собирающих) линз сферическая aberrация, как показывает расчет, остается всегда недонисправленной; обратно, у отрицательных (рассеивающих) линз она переисправлена, т. е. крайние лучи пересекают оптическую ось в точке, расположенной дальше от второй поверхности линзы, чем точка пересечения оси лучами параксиальными. Очевидно, чтобы получить оптическую систему с исправленной сферической aberrацией, необходимо ее комбинировать из положительных и отрицательных линз.

Сферическая aberrация часто представляется графически. По оси абсцисс откладываются величины продольной сферической aberrации, а по оси ординат — высоты точек преломления лучей. На рис. 99б изображена кривая сферической aberrации, обычная для скорректированных (исправленных) систем. Кривая лишь один раз пересекает ось ординат, это значит, что лишь для одного из лучей пучка продольная сферическая aberrация равна нулю, т. е. этот луч пересекает оптическую ось в той же точке, в которой пересекает ее луч параксиальный; у всех остальных лучей пучка имеется остаточная сферическая aberrация.

Кроме понятия о продольной сферической aberrации, иногда еще пользуются понятием о поперечной сферической aberrации. Пусть некоторый луч, вышедший из оптической системы, образует угол u' с оптической осью и пересекает эту ось на расстоянии $s_k's_p' = \Delta s'$ от точки s_p' пересечения оси параксиальным лучом, т. е. имеет продольную сферическую aberrацию $\Delta s'$; этот луч пересекает плоскость, проходящую через точку s_p' и расположенную перпендикулярно оптической оси (так называемую плоскость Гаусса) на некотором расстоянии от оси $\Delta z'$; величина $\Delta z'$ называется поперечной сферической aberrацией. Между величинами $\Delta s'$ и $\Delta z'$ существует простая зависимость:

$$\Delta z' = \Delta s' \operatorname{tg} u'.$$

Комма; условие синусов. Если оптическая система исправлена в отношении сферической aberrации, то это еще не значит, что система будет давать хорошее изображение из точек, расположенных вблизи оптической оси. Для того, чтобы система давала совершенное изображение элемента поверхности, расположенного вблизи оси, необходимо соблюдение так называемого „условия синусов“, выражающегося уравнением

$$n l \sin \alpha = n' l' \sin \alpha', \quad (8,1)$$

где l — длина изображаемого отрезка (рис. 100); l' — его изображение; α — угол с осью, образуемой произвольным лучом, проведенным из точки пересечения оси

с плоскостью предмета; α' — такой же угол с оптической осью, образуемый лучом, вышедшим из системы; n и n' — показатели преломления сред, в которых расположены предмет и изображение.

При $n = n'$ последнее равенство можно написать в виде

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'}, \quad (8,2)$$

т. е. поперечное увеличение должно быть равно отношению синусов углов с осью двух сопряженных лучей осевого пучка (рис. 100).

Как было доказано физиком-оптиком Аббе, хорошее исправление сферической aberrации системы и одновременное выполнение „условия синусов“ обеспечивают совершенное изображение не только точки, расположенной на оси системы, но и точек, расположенных вблизи оси.

Пара сопряженных точек, для которых исправлена сферическая aberrация и соблюден закон синусов, называется апланатической парой. Невыполнимость условия синусов влечет за собой появление aberrации кома.

Комой в широком смысле называют асимметрию пучка лучей, вышедших из точки предмета вне оси, по отношению к главному лучу пучка, т. е. лучу, прошедшему через середину входного зрачка (рис. 100). На рисунке представлен такой случай асимметрии. Главный луч пучка MP пересекает плоскость изобра-

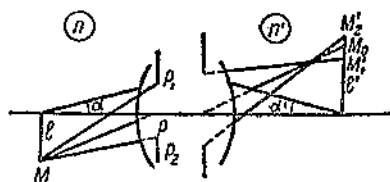


Рис. 100

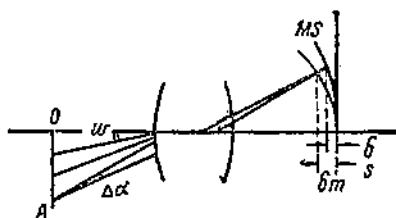


Рис. 101

жения в точке M_0' , в то время как краевые лучи того же пучка, выходящего из точки M , т. е. лучи MP_1 и MP_2 , пересекают ту же плоскость в точках M_1' и M_2' , расположенных несимметрично относительно точки M_0' , т. е. не на равных расстояниях от последней. Изображение точки получается при этом в виде пятна рассеяния, не симметричного относительно точки M_0' .

Наряду со сферической aberrацией, кома исправляется у всех объективов, даже если их поле зрения невелико (объективы зрительных труб, объективы микроскопов, астрономические объективы и т. д.). Об исправлении комы в фотографических объективах см. ниже, IV, гл. 12, § 7.

Астигматизм и кривизна поверхности изображения. Если угол поля зрения достаточно велик, то исправление aberrации комы оказывается недостаточным для получения совершенного изображения точек, расположенных вне оптической оси системы. В этом случае пучки лучей пространства изображений могут обладать так называемым астигматизмом. Возьмем по два луча, идущих от каждой точки плоского предмета A (рис. 101) под малым углом $\Delta\alpha$ друг к другу. Расчет показывает, что изображения этих точек располагаются не в плоской, а по некоторой искривленной поверхности, которая называется меридиональным изображением плоскости A , поскольку изображающие ее пучки лучей лежат в меридиональной плоскости, совпадающей с плоскостью чертежа. Если же взять луч, идущий из точки A близко к первому лучу, но расположенный в плоскости, перпендикулярной к меридиональной плоскости, то изображение каждой точки плоскости A пучком таких лучей оказывается не совпадающим с меридиональным изображением. Такое изображение называется сагиттальным.

Поверхность сагиттального изображения плоского объекта оказывается также искривленной и не совпадающей с меридиональной поверхностью изображения.

Явление расхождения меридионального изображения с сагиттальным называется астигматизмом. Астигматизм стремятся, по возможности, устранить при расчете оптической системы. Форму и расположение меридиональной и сагиттальной поверхностей изображения как друг относительно друга, так и относительно плоскости Гаусса (т. е. плоскости изображения, даваемого идеальной системой) можно изменять путем определенных изменений конструктивных элементов системы (радиусов линз, их толщин и показателей преломления стекол).

Для характеристики астигматизма строят кривые (графики), откладывая по оси ординат углы ω входа лучей в систему (углы поля зрения), а по оси абсцисс — отклонения меридиональных и сагиттальных изображений соответствующих точек от гауссовой плоскости изображения. Вид этих кривых может быть самый разнообразный.

На рис. (102а) представлены астигматические кривые системы, у которой исправлен астигматизм, но не устранено искривление меридиональной и сагиттальной поверхностей изображения, т. е. так называемая кривизна поверхности изображения. Если в системе не удастся устранить эту кривизну, одновременно исправив астигматизм, то иногда стараются путем подбора радиусов, толщин линз и воздушных промежутков между ними расположить кривые сагиттального и меридионального изображения симметрично относительно плоскости Гаусса (рис. 102 б).

Часто при расчете систем с достаточно большим углом зрения предъявляют требование, чтобы поверхность изображения была плоской и в то же время астигматизм системы был по возможности уменьшен; астигматические кривые для этого случая коррекции представлены на рис. 102 в. Современные фотографические объективы, хорошо исправленные в отношении астигматизма (анастигматы), как, например, универсальные аэрофотообъективы, имеют поле зрения, превышающее $50-70^\circ$, и дают плоское изображение.

Дисторсия. Реальные оптические системы часто дают изображение плоского объекта в виде фигуры, не подобной, в строго геометрическом смысле, самой



Рис. 102а

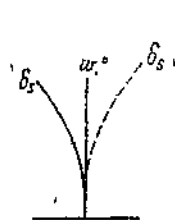


Рис. 102б

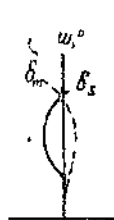


Рис. 102в



Рис. 103

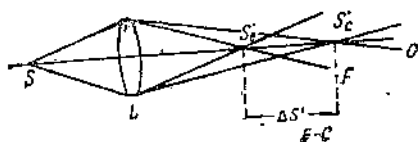


Рис. 104

фигуре объекта. Это является следствием того, что линейное увеличение β системы не остается постоянным при изображении отрезков различной длины, расположенных в плоскости объекта. Форма изображения оказывается искаженной относительно фигуры предмета. Это явление называется дисторсией. Увеличение β может при этом убывать или возрастать по мере удаления от центра к краям изображения. В первом случае фигура в форме квадрата (рис. 103 а) изобразится в виде бочкообразного четырехугольника (рис. 103 б); во втором случае — в виде подушкообразного четырехугольника (рис. 103 в). Соответственно принято называть дисторсию бочкообразной или подушкообразной. Во многих случаях наличие дисторсии в системе не является существенной помехой, снижающей эксплуатационные качества прибора; например, дисторсия может быть допущена в наблюдательных приборах. В тех случаях, когда на основании измерений расстояний между отдельными деталями изображения строят точные карты объектов (например, в геодезической практике), необходимо особо тщательное исправление объектива в отношении дисторсии.

Величина дисторсии обычно выражается в процентах:

$$\Delta\% = \frac{l' - l_0'}{l_0'} 100\%, \quad (8,3)$$

где l' — величина изображения отрезка l ; l_0' — величина изображения того же отрезка в том случае, если бы дисторсия отсутствовала. Величина Δ обычно колеблется от десятых долей процента (у картографических и репродукционных систем) до нескольких процентов (наблюдательные приборы).

Хроматические aberrации. Выше были рассмотрены погрешности изображений, являющиеся следствием наличия в системе различного вида монохроматических aberrаций. Однако система, скорректированная для лучей некоторого определенного цвета, может оказаться исправленной недостаточно совершенно для лучей других цветов. Белый пучок лучей, как известно (см. I, гл. 1, § 5), представляет смещение лучей различных цветов; поступая в систему, такой пучок может давать окрашенное (хроматичное) изображение.

Пусть из точки S (рис. 104), лежащей на оси линзы L , выходит белый пучок лучей. После преломления пучка через линзу будет иметь место рассмотренное выше (гл. 1) явление дисперсии света. Именно, так как показатель преломления стекла для лучей различных цветов различен, изображения точки S через линзу L лучами различных цветов окажутся расположенными на разных расстояниях от линзы L . Преломляющее действие линзы в отношении, например, синих лучей больше, чем в отношении красных. В результате изображение S'_F точки S в синем цвете будет расположено ближе к линзе, чем изображение S'_C той же точки в красном свете. На экране, поставленном в произвольной точке отрезка $S'_F S'_C$, получим в качестве изображения точки S — окрашенный кружок рассеяния.

Расстояние $S'_F S'_C$ характеризует так называемую продольную хроматическую aberrацию системы. Очевидно, величину этой aberrации можно в случае простой линзы определить, воспользовавшись формулой (4,6). Вычислив расстояние s'_F изображения от линзы для синих лучей и расстояния s'_C — для красных лучей, определим хроматическую aberrацию как разность

$$\Delta s'_{F-C} = s'_F - s'_C. \quad (8,4)$$

Можно доказать, что величина этой aberrации зависит от фокусного расстояния линзы, расстояния от изображения до линзы s' , и дисперсии стекла, т. е. разности показателей преломления для двух рассматриваемых цветов $n_D - n_C$, и выражается формулой

$$\Delta s'_{F-C} = - \frac{s'^2}{f' \cdot v}, \quad (8,5)$$

где v — так называемая относительная дисперсия стекла, следующим образом связанная с дисперсией стекла и показателем преломления:

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (8,6)$$

Хроматическая aberrация считается не исправленной, или отрицательной, если лучи, соответствующие цветам более коротких длин волн (например, синие лучи), пересекают оптическую ось в точке, расположенной ближе к линзе, чем точка пересечения той же оси световыми лучами больших длин волн (например, красными); в противном случае система называется хроматически переисправленной.

Второй разновидностью хроматических aberrаций является хроматическая разность увеличений, или хроматическая разность величин изображений. Наличие этой aberrации приводит к тому, что величины изображений оказываются

различными для лучей различных цветов, что также является следствием зависимости показателей преломления стекол от цвета лучей. Контур изображения оказываются при этом окрашенными, окруженными узкой цветной каймой. Хроматизм исправляется путем соответствующего расчета не только геометрических элементов системы (радиусов линз, их толщины и т. д.), но и выбором сортов стекол, в частности подбором их дисперсий.

Вторичный спектр. Оптическая система, в которой достигнуто соединение в общем фокусе двух лучей каких-либо длин волны (например, цветов F' и C), называется ахроматизованной для этих цветов спектра. Лучи остальных цветов пересекают при этом оптическую ось в различных точках. Остаток хроматической aberrации, имеющейся при этом, носит название вторичного спектра.

Величину вторичного спектра можно наглядно представить графически, если по оси ординат отложить длины волн, соответствующие различным спектральным цветам, по оси абсцисс — расстояния цветных фокусов от некоторой произвольно выбранной точки на оптической оси, например от вершины последней поверхности линзы.

В зависимости от того, для каких двух цветов была ахроматизована система, получим кривые второго спектра различного характера. Первая кривая I на рис. 105 соответствует случаю совмещения фокусов лучей F и C , т. е. совмещению фокусов синего (длина волны $\lambda = 486,1 \text{ м}\mu$) и красного ($\lambda = 656,3 \text{ м}\mu$) цветов; такое исправление хроматической aberrации достигается у большинства приборов, предназначенных для наблюдения глазом, и носит название визуальной коррекции. Кривая II относится к случаю совмещения лучей G' ($\lambda = 434,1 \text{ м}\mu$) и D ($\lambda = 589,3 \text{ м}\mu$), т. е. фиолетового и желтого; такая коррекция задается у большинства систем, предназначенных для фотографирования (фотографическая коррекция) (подробнее см. IV, гл. 12, § 7).

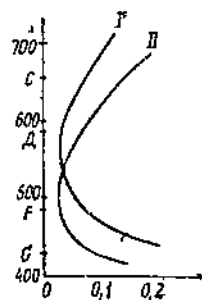


Рис. 105

Путем специального выбора особых сортов стекол (так называемых курцфлинт) иногда удается уменьшить расстояния между фокусами различных цветов, уменьшая тем самым вторичный спектр системы. Такого рода системы носят название апохроматов; они обладают практически исправленным хроматизмом положения для трех цветов спектра.

§ 9. О расчете оптических систем

Рассчитать оптическую систему — это значит определить конструктивные элементы ее, понимая под последними радиусы кривизны преломляющих поверхностей линз, материал, из которого они должны быть изготовлены, расстояния, отделяющие линзы друг от друга, диаметры линз и диафрагм и т. д. Определение этих элементов находится в зависимости от тех требований, которые предъявляются к оптической системе. В зависимости от назначения системы эти требования могут носить весьма разнообразный характер.

Прежде всего, система должна отвечать определенным, заранее устанавливаемым оптическим характеристикам; к ним относятся увеличение, угол поля зрения, относительное отверстие; последнее в случае зрительных труб характеризуется диаметром выходного зрачка.

В ряде случаев (прицелы, перископы) особое значение имеют внешние характеристики системы: ее длина, поперечные размеры, вес. Часто (например, в приборах, применяемых в противогазовых масках) особую важность приобретает расстояние выходного зрачка от последней поверхности окуляра.

Всем оптическим системам, независимо от их конструкции, как мы видели выше, присущи в большей или меньшей степени недостатки, относящиеся к качеству изображения, даваемого системой. Это изображение нерезко, окрашено, форма предметов неправильно передана и т. д. Эти недостатки могут быть све-

дены к минимуму путем специального расчета конструктивных элементов системы.

Расчет системы можно разделить на две части: расчет ее внешних элементов, или габаритов, и собственно расчет, или коррекция аберраций системы. Однако эти две стадии расчета взаимно связаны в том отношении, что удачный выбор элементов, относящихся к габаритам прибора (фокусные расстояния линз, их относительные отверстия), в большой степени предпрещает возможность коррекции аберраций системы в последующей стадии расчета.

Расчет габаритов системы. Обычно в технические условия на расчет габарита входят определенные задания на увеличение, поле зрения, светосилу, длину прибора, максимальный диаметр линз, размеры измерительной сетки и т. д.

Расчет может быть иллюстрирован на следующем примере простой зрительной трубы.

Задано: увеличение $\gamma=24$ (изображение повернутое), поле зрения $1^\circ 30'$, диаметр зрачка выхода $d_{\text{вых}}$ 2 мм, длина трубы 525 мм, толщина сетки 2 мм.

Зная диаметр выходного зрачка и увеличение, определяем диаметр входного зрачка, совпадающего с отверстием оправы объектива:

$$D_{\text{вх}} = \gamma \cdot d_{\text{вых}} = 24 \cdot 2 = 48 \text{ мм.}$$

Из свойств телескопической системы и по рис. 93 имеем

$$f'_{\text{об}} + f'_{\text{ок}} = 525;$$

$$\frac{f'_{\text{об}}}{f'_{\text{ок}}} = +24.$$

Отсюда

$$f'_{\text{об}} = 504; f'_{\text{ок}} = 21 \text{ мм.}$$

Относительное отверстие объектива равно

$$\frac{D_{\text{вх}}}{f'_{\text{об}}} = \frac{48}{504} \approx 1:10.$$

Диаметр отверстия окуляра определяется из рис. 106:

$$D_{\text{ок}} = 2(f'_{\text{об}} + f'_{\text{ок}}) \operatorname{tg} 45' = 13,75 \text{ мм.}$$

Диаметр сетки, расположенной в фокальной плоскости объектива, определится из соотношения (рис. 106):

$$D_{\text{сетки}} = 2f'_{\text{об}} \operatorname{tg} \omega = 2 \cdot 504 \cdot \operatorname{tg} 45' = 13 \text{ мм.}$$

Удлинение хода луча в стекле сетки находим из формулы (3,6), приняв $n=1,5$:

$$\Delta s' = \frac{n-1}{n} d = 0,67 \text{ мм,}$$

т. е. для дальнейшего расчета системы следует брать длину трубы равной

$$525 + 0,67 = 525,67 \text{ мм.}$$

Угол поля зрения со стороны окуляра („кажущееся поле зрения“) определяем из формулы

$$\operatorname{tg} \omega' = \gamma \operatorname{tg} \omega = 24 \cdot \operatorname{tg} 45' = 0,315,$$

$$\omega' = 17^\circ 30', 2\omega' = 35^\circ.$$

Расстояние от окуляра до зрачка выхода системы находим по формуле (5,20), как изображение зрачка входа после окуляра:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{-525} = \frac{1}{21}; s' = 21,9 \text{ мм.}$$

Коррекция простейших оптических систем. Разработкой оптической схемы прибора и определением его габаритов ограничивается предварительный расчет системы. Задача последующей стадии расчета заключается в определении конструктивных элементов оптических деталей системы (радиусов кривизны поверхностей линз, их толщин, показателей преломления и дисперсий стекол и т. д.), при которых остаточные aberrации оказываются минимально возможными. При этом естественна задача конструктора-вычислителя: корригировать систему, по возможности, избегая усложнения оптики ее компонентов. Решается задача коррекции aberrаций системы в целом, при этом не обязательно, чтобы каждый из элементов системы был корригирован самостоятельно и независимо от характера коррекции остальных элементов; почти всегда расчет системы выполняется таким образом, что остаточные aberrации отдельных ее деталей (например, объектива, окуляра, оборачивающей системы и т. д.) взаимно компенсируют друг друга.

Простейшая оптическая деталь — линза — дает весьма ограниченные возможности оптику-вычислителю. Примером может служить расчет очковых линз. Наиболее совершенными в настоящее время считаются очковые линзы, рассчитанные по идее Чернинга. У этих линз исправлен астигматизм: фокусы сагиттальных и меридиональных пучков совпадают для довольно широкого поля зрения; выходной зрачок при этом оказывается совмещенным с центром вращения глазного яблока (см. III, гл. 7) и расположенным на расстоянии приблизительно $l = 25$ мм от линзы. При заданном показателе преломления стекла n и заданной оптической силе линзы в диоптриях D (см. выше, § 6), радиусы кривизны поверхностей линзы определяются из следующей формулы Чернинга: *

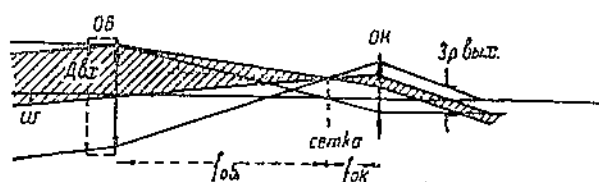


Рис. 106

где r_1 — кривизна первой преломляющей поверхности линзы; $\lambda = \frac{1}{l}$ (l — выражено в метрах).

Например, при $n = 1,5$ и $l = 25$ мм $= 0,025$ м очки силой в 2 диоптрии ($D = -2$) должны иметь следующие радиусы кривизны:

$$r_1 = 70 \text{ мм}; r_2 = 54,7 \text{ мм.}$$

Конечно, другие aberrации (например, сферическая) при этом не исправляются.

Сферическую aberrацию можно определить по обычной формуле для простых линз:

$$\delta s' = -\frac{h_1^2}{2f'} \left[\frac{n+2}{n} (f'p)^2 - \frac{2n+1}{n-1} f'p + \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \right], \quad (9,2)$$

где h_1 — половина диаметра зрачка входа, а f' — фокусное расстояние линзы. Заметим, что эта формула справедлива для случая бесконечно удаленного предмета. В рассмотренном выше примере сферическая aberrация при зрачке в 5 мм оказывается равной

$$\delta s' = +1,16 \text{ мм.}$$

* См. Тудоровский [5], стр. 484.

Так как линзе в 2 диоптрии соответствует фокусное расстояние 500 мм, то относительное отверстие, при котором работает линза, будет

$$\frac{2h_1}{f'} = \frac{5}{500} = 1:100.$$

Следовательно диаметр кружка рассеяния, соответствующий продольной аберрации в 1,16 мм, будет ничтожно мал:

$$\delta z' = \delta s' \cdot \frac{2h_1}{f'} = 1,16 \cdot \frac{1}{100} = 0,0116 \text{ мм.}$$

Знак продольной сферической аберрации у отрицательных линз оказывается всегда положительным, что указывает на то, что их сферическая аберрация переисправлена; обратное имеем в случае положительных линз.

Объективы из двух склеенных линз. Такого рода системы находят чрезвычайно широкое применение почти во всех телескопических приборах (бинокли, прицелы, перископы, стереотрубы и т. д.).

Комбинация из двух склеенных линз — положительной линзы и отрицательной, имеющих одинаковые радиусы склеиваемых поверхностей, позволяет при наперед заданной паре стекол (крона и флинта) корригировать сферическую и хроматическую аберрации системы. Если же сорта стекол не оговорены, то, путем специального подбора их показателей преломления и дисперсий, оказывается возможным, кроме перечисленных двух аберраций, достигнуть исправления также и комы.

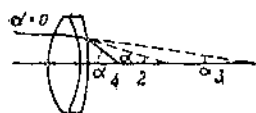


Рис. 107

Предполагается, что толщины линз равны нулю. При заданной паре стекол, т. е. заданных n_2 и ν_2 для первой линзы и n_3 и ν_3 — для второй линзы и заданном фокусном расстоянии f' объектива, последний вполне определяется двумя параметрами, например радиусами r_1 и r_2 первой и второй поверхностей, так как радиус r_3 третьей поверхности определяется из условия, что фокусное расстояние системы должно равняться f' .

Однако вместо упомянутых двух параметров при расчете оказывается более удобным принять следующие два параметра: φ_1 — приведенную оптическую силу первой линзы (равную обратному значению ее фокусного расстояния, умноженному на f' всего объектива) и параметр Q — являющийся некоторой функцией углов α_2 и α_3 параксиального луча с оптической осью (рис. 107) после его преломления через первую и вторую поверхности линзы, вычисленных при условии, что $\alpha_1 = 0$, т. е. до преломления луч направлен параллельно оптической оси, а по выходе из объектива $\alpha_4 = +1$.

Зависимость Q от a имеет следующий вид:

$$Q = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_3}}.$$

Величинами φ_1 и Q задаются таким образом, чтобы сферическая и хроматическая аберрации объектива оказались исправленными. Первая из этих аберраций пропорциональна некоторой величине P , выражающейся следующим образом через параметры φ_1 и Q :

$$P = aQ^3 + bQ + c, \quad (9,3)$$

где

$$a = 1 + 2 \frac{\varphi_1}{n_2} + 2 \frac{\varphi_2}{n_3}; \quad b = \frac{3}{n_2 - 1} \varphi_1^2 - \frac{3}{n_3 - 1} \varphi_2^2 - 2\varphi_2;$$

$$c = \frac{n_2}{(n_2 - 1)^2} \varphi_1^3 + \frac{n_3}{(n_3 - 1)^2} \varphi_2^3 + \frac{n_3}{(n_3 - 1)} \varphi_2^2,$$

где для краткости положено $\varphi_2 = 1 - \varphi_1$.

Хроматическая aberrация определяется оптическими силами линз φ_1 и φ_2 :

$$s'_F - s'_C = -f'^2 \left(\frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} \right), \quad (9,4)$$

где v_1 и v_2 — показатели дисперсии стекол, а φ_1 и φ_2 — приведенные оптические силы линз.

Для случая исправленной хроматической aberrации ($s'_F - s'_C = 0$) имеем

$$\frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0.$$

Выразив φ_2 через φ_1 ($\varphi_2 = 1 - \varphi_1$), получим

$$\varphi_1 = \frac{v_2}{v_1 - v_2}. \quad (9,5)$$

Таким образом, при выбранной паре стекол, оптические силы линз φ_1 и φ_2 оказываются определенными. Задавая далее в пространстве (9,3) $P = 0$, решаем квадратное уравнение относительно Q . Из двух корней пригодным всегда является тот, который имеет наименьшее абсолютное значение.

Зная Q и φ_1 , вычисляем радиусы поверхностей по формулам:

$$r_1 = \frac{f'}{Q + \frac{n_2}{n_2 - 1} \varphi_1}, \quad r_2 = \frac{f'}{Q + \varphi_1}, \quad r_3 = \frac{f'}{Q + 1 - \frac{n_2}{n_2 - 1} \varphi_1}. \quad (9,6)$$

Полученная система проверяется точным тригонометрическим расчетом хода нескольких лучей, определяющих сферическую и хроматическую aberrации. Предварительно вычисляются толщины линз из расчета, чтобы толщина линзы в наиболее тонком месте (в центре или на краю) была не меньше $1/8 - 1/10$ от величины диаметра линзы.

Если полученные результаты тригонометрических расчетов окажутся неудовлетворительными, необходимо несколько изменить величины φ_1 и Q , имея в виду, что первый из них влияет на хроматизм системы, а второй — на сферическую aberrацию.

Пример. Требуется рассчитать двухлинзовый склеенный объектив, имеющий фокусное расстояние $f' = 430$ мм из следующих стекол: $n_2 = 1,5729$; $v_2 = 57,9$; $n_3 = 1,6213$; $v_3 = 36,1$.

Из (9,5) имеем: $\varphi_1 = 2,657$; $\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -1,657$.

Вычислив коэффициенты a , b , c и подставив в уравнение (9,3), получим

$$P = 2,334Q^2 + 27,02Q + 77,95.$$

Приняв $P = 0$ и решив квадратное уравнение, находим:

$$Q_1 = -5,45 \text{ и } Q = -6,12.$$

Выбрав первый из корней уравнения и подставив его значение в равенство (9,6), имеем

$$r_1 = 233,4 \text{ мм}; \quad r_2 = -153,8 \text{ мм}; \quad r_3 = -3345 \text{ мм}.$$

Объективы из двух несклеенных линз. Если диаметры линз превышают 60—80 мм, то вследствие натяжений в стеклах, появляющихся в результате их склейки, от склейки линз приходится отказываться. В этом случае отпадает условие равенства радиусов кривизны склеиваемых поверхностей. Освобождающийся дополнительный параметр может быть использован для исправления aberrации кома при любой наперед заданной паре стекол.

Принимая за параметры кривизны первой и третьей поверхностей $\rho_1 = \frac{1}{r_1}$ и $\rho_3 = \frac{1}{r_3}$ и приведенную оптическую силу первой линзы φ_1 , определяем попрежнему оптическую силу второй линзы из условия

$$\varphi_2 = 1 - \varphi_1.$$

Полагая, что толщины линз и расстояния между ними равны нулю, имеем следующие выражения для хроматической и сферической аберрации и комы:

$$s'_F - s'_C = -f^2 \left(\frac{\varphi_1}{v_2} + \frac{\varphi_2}{v_4} \right); \quad (9,7)$$

$$P = \left(\frac{n_2}{n_2 - 1} \right)^2 \varphi_1^3 - \frac{2n_2 + 1}{n_2 - 1} \varphi_1^2 \rho_1 + \frac{2 + n_2}{n_2} \varphi_1 \rho_1^2 + \left(\frac{n_4}{n_4 - 1} \right)^2 \varphi_2^3 + \\ + \frac{3n_4 + 1}{n_4 - 1} \varphi_1 \varphi_2^2 + \frac{3n_4 + 2}{n_4} \varphi_1^2 \varphi_2 - \left(\frac{2n_4 + 1}{n_4 - 1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_4 + 1)}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 \right) \rho_3 + \\ + \frac{2 + n_4}{n_4} \varphi_2 \rho_3^2; \quad (9,8)$$

$$W = \frac{n_2}{n_2 - 1} \varphi_1^2 + \frac{n_4}{n_4 - 1} \varphi_2^2 + \frac{2n_4 + 1}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 - \frac{n_2 + 1}{n_2} \varphi_1 \rho_1 + \frac{n_4 + 1}{n_4} \varphi_2 \rho_3, \quad (9,9)$$

где W — величина, пропорциональная аберрации кома; n_2 и n_4 — показатели преломления стекол первой и второй линзы.

Для получения системы, исправленной в отношении указанных трех аберраций, полагаем

$$s'_F - s'_C = P = W = 0.$$

Определив φ_1 из условия хроматизма (равенство (9,7)); воспользовавшись далее условием (9,9) для выражения ρ_3 через ρ_1 и исключив в равенстве (9,8) параметр ρ_3 , решаем квадратное уравнение относительно ρ_1 . Получающиеся два решения подвергаются контрольному тригонометрическому расчету, на основе которого производится выбор одного из них.

Пример. Рассчитать объектив с фокусным расстоянием $f' = 1000$ мм. Стекла заданы: $n_2 = 1,5170$, $v_1 = 63,7$; $n_4 = 1,65085$; $v_2 = 33,8$. Объектив должен быть исправлен в отношении хроматической и сферической аберрации и комы.

Из уравнения хроматизма имеем

$$\varphi_1 = \frac{v_4}{v_2 - v_4} = 2,130; \quad \varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -1,130.$$

Подставив численные значения φ_1 , φ_2 , n_2 и n_4 в равенства (9,8) и (9,9), получим

$$P = 4,989 \rho_1^2 - 35,41 \rho_1 - 2,50 \rho_3^2 + 7,023 \rho_3 + 77,25 = 0, \\ W = -3,535 \rho_1 + 1,815 \rho_3 + 10,284 = 0.$$

Решив совместно эти два уравнения, находим

$$\rho_1 = 1,649 \text{ и } 5,711.$$

Второй корень отбрасываем, так как он приводит к слишком малым радиусам кривизны.

Значение ρ_3 находим из второго численного уравнения:

$$\rho_3 = -2,453.$$

Кривизны остальных поверхностей ρ_2 и ρ_4 получаются из условия, что оптические силы линз известны:

$$p_2 - p_1 = -\frac{\varphi_1}{n_2 - 1}; \quad p_4 - p_3 = -\frac{\varphi_2}{n_4 - 1}.$$

$$p_2 = -2,4711; \quad p_4 = -0,7163.$$

Отсюда

$$r_1 = \frac{f''}{p_1} = 606,4 \text{ мм}; \quad r_2 = -404,7; \quad r_3 = -407,7; \quad r_4 = -1396.$$

Замечания об оценке качества изображения оптических систем. В зависимости от назначения оптической системы, устанавливаются определенные требования к качеству изображения.

При оценке качества изображения телескопических систем, т. е. оценке остаточных aberrаций с точки зрения их допустимости, обычно исходят из разрешающей силы нормального глаза в условиях работы прибора.

При хорошей освещенности разрешающая способность глаза достигает 1'; это значит, что глаз различает две точки, видимые под углом в одну минуту. В условиях пониженной освещенности (сумеречное освещение, ночное наблюдение) разрешающая способность глаза в несколько раз понижается. Соответственно понижаются требования к качеству коррекции, например, ночных наблюдательных труб. Важнейшее их свойство — наличие высокой светосилы, т. е. большого выходного зрачка; однако выполнение последнего подчас делается возможным именно благодаря пониженным требованиям к качеству коррекции системы.

Почти во всех телескопических приборах изображение в центре поля зрения оказывается лучшим, чем на краю поля. Изображение чрезвычайно быстро ухудшается при увеличении угла поля зрения, и лишь существенное усложнение оптики прибора иногда позволяет улучшить коррекцию системы. Обычно здесь приходится искать компромиссное решение, подчас поступаясь совершенством коррекции в пользу конструктивной простоты.

Обычно сферическая и хроматическая aberrации в телескопических системах оказываются в пределах 1—2', т. е. такова непараллельность пучков, выходящих из окуляра; aberrации наклонных пучков, поступающих в систему из точек предмета, расположенных на краю поля зрения, достигают 20—30' при астигматизме системы в 4—6 диоптрий. В случае же ночных наблюдательных труб эти aberrации в 2—3 раза превышают названные величины.

Впрочем, при оценке результатов расчета необходимо учитывать общее строение пучка: может оказаться допустимым и значительное отклонение от параллельности пучков, выходящих из окуляра, если эти отклонения приходится лишь на небольшие участки входного зрачка системы. Может оказаться также допустимой и кривизна поля изображения (в 4—6 и больше диоптрий), так как нормальный глаз в этих пределах сможет реагировать лишь изменением аккомодации.

Не останавливаясь на требованиях, предъявляемых к качеству коррекции других оптических систем (фотографических, микроскопических и т. д.), укажем, что эти требования также зависят от назначения системы. Например, в случае фотографических объективов* допустимые aberrации определяются теми условиями, в которых будет производиться съемка, и величинами деталей, подлежащих рассмотрению, свойствами применяемого фотографического материала (его разрешающей способностью), последующей обработкой снимка, в частности подвергается ли снимок дальнейшему увеличению и т. д. Все это налагает определенные условия и требования к качеству коррекции оптической системы. Нахождение рационального решения в каждом отдельном случае является задачей оптика-конструктора.

* Об aberrациях фотографических объективов см. ниже, IV, гл. 12, § 7.

Раздел II

НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИЕМЫ И ПРИБОРЫ

Глава 3

ОПТИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

А. Технологический процесс изготовления оптического стекла. § 1. Состав стекла и его влияние на оптические постоянные. § 2. О химической устойчивости стекол. § 3. Основные этапы производства оптического стекла и его обработки: а) сырые материалы и стеклоприпас, б) варка оптического стекла, в) замечания о вязкости и кристаллизационной способности стекол, г) горячая обработка оптического стекла, д) отжиг оптического стекла. § 4. Влияние на показатель преломления температуры и тепловой обработки. § 5. Холодная обработка стекла. § 6. Цветное стекло. § 7. Налеты и чистка оптических деталей. § 8. Просветление оптики. § 9. Изготовление сеток. § 10. Склейка оптических деталей. § 11. Серебрение и алюминирование.

Б. Технические условия на оптическое стекло. § 1. Оптические постоянные стекла. § 2. Оптическая однородность стекла: а) плавные неоднородности, б) свили, в) пузыри. § 3. Поглощение света в стекле. § 4. Двойное лучепреломление в стеклах. § 5. Термические и механические свойства стекла.

Высокие требования, предъявляемые к точности оптических приборов, заставляют особо строго подходить к материалам, применяемым для их постройки. От этих материалов не только требуется, чтобы они могли быть обработаны соответственно высшим классам точности, но и чтобы приданная им в результате обработки форма сохранялась во все время службы прибора.

Особенно сложные требования предъявляются к тому материалу, из которого делаются специфические оптические детали — линзы, призмы, пластинки, клинья, сетки и т. п. Помимо высокой устойчивости, от этих материалов требуются особые оптические свойства и притом в большом разнообразии. Для изготовления оптических деталей необходимы материалы различных показателей преломления и дисперсий, а также материалы различной прозрачности для различных лучей.

Основным материалом, применяемым для изготовления оптических деталей, служит оптическое стекло. Химический состав и строение оптического стекла в общем случае очень сложные.

Стекло прозрачно и может быть изготовлено очень однородным, причем показатель преломления и дисперсия его могут быть изменены в довольно широких пределах путем соответствующего изменения состава. Кроме того, стекло достаточно стойко и в механическом отношении и химически. Эти обстоятельства делают его незаменимым материалом для оптических деталей.

История развития производства оптического стекла идет параллельно с историей оптического приборостроения. Начало производства первого размещанного стекла совпадает с началом производства достаточно крупных оптических приборов. Разработка большого количества разнообразных сортов стекла, осуществленная немецкой фирмой Шотт, была проведена по инициативе профессора Аббе, творца современной оптотехники, технического руководителя фирмы Цейсс, автора большого количества разнообразных оптических приборов. И до настоящего времени дальнейшее развитие приборостроения иногда затрудняется и необходимостью изыскания новых сортов оптического стекла. В связи с этим ведутся поиски новых типов стекла, а также изучаются кристаллические вещества и пласт-

массы, правда, пока еще уступающие по основным свойствам так называемым оптическим стеклам.

В дальнейшем мы останавливаемся подробнее на двух пунктах, касающихся оптического стекла: на технологии его изготовления и на технических условиях, предъявляемых у нас в Союзе к ходовому стеклу. Первая группа вопросов в основном составляет содержание отдела А, вторая — отдела Б; технические условия на химическую стойкость стекла и на сырые материалы для варки стекла разбираются также в разделе А.

А. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

§ 1. Состав стекла и его влияние на оптические постоянные

Основной составляющей частью подавляющего большинства стекол является кремнезем SiO_2 . Стекло из чистого плавленого кремнезема, так называемое кварцевое стекло, обладающее рядом весьма ценных качеств (прозрачность в ультрафиолетовой части спектра, высокая термическая и химическая стойкость), может быть изготовлено только при весьма высокой (порядка 1900°) температуре. Для того чтобы снизить температуру плавления кремнезема, к нему добавляют различные окислы, чаще всего окись натрия и окись кальция.

Стекло, содержащее, например, около 65% кремнезема и 35% окиси натрия, может быть сварено при значительно более низкой, чем кварцевое стекло, температуре, при 1400° . Однако это стекло не устойчиво по отношению к атмосферным агентам — воде и углекислоте. Поверхность такого стекла быстро разрушается, теряет свойственный стеклу блеск, стекло становится непрозрачным. Для практических целей такое стекло не пригодно. Для увеличения устойчивости стекла в него добавляют окись кальция (CaO).

Стекло, содержащее 75% SiO_2 , 15% Na_2O и 10% CaO , оказывается более или менее легкоплавким (температура варки 1450°) и достаточно устойчивым. Обычные технические стекла — посудное, бутылочное — являются в основном кремне-натриево-известковыми стеклами. В состав стекол часто вводят окись калия, окись магния, окись алюминия. Действие окиси калия подобно действию окиси натрия. Окись магния и окись алюминия действуют подобно окиси кальция, упрочняя стекла, делая их химически более устойчивыми.

Оптические свойства известково-натриево-силикатных стекол могут быть характеризованы следующими величинами:

$$n_D = 1,50—1,55 \text{ и } \nu = 53—61.$$

Стекла такого типа называются кронами.

Для производства оптических систем необходимо иметь стекла с весьма разнообразными оптическими постоянными. Однако с помощью SiO_2 , Na_2O и CaO добиться такого разнообразия невозможно. Введение в состав стекла окиси свинца (PbO) резко изменяет показатель преломления и дисперсию стекла, увеличивая их.

До Шотта в состав оптических стекол вводили обычно кремнезем, окиси натрия, кальция, калия и свинца, причем количества этих окислов варьировали в малых пределах.

Если за характеристику оптического стекла взять по Аббе показатель прелом-

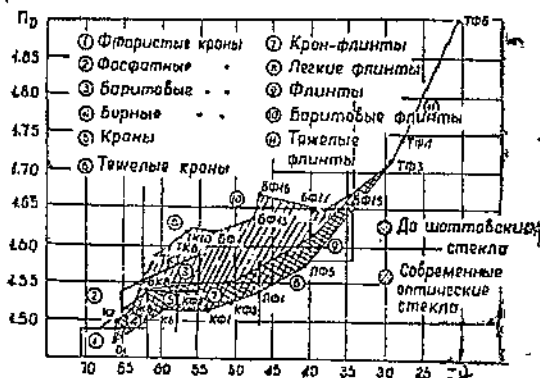


Рис. 108. Диаграмма Аббе

ления n_D и коэффициент $v = \frac{n_D - 1^*}{n_F - n_C}$ и разместить оптические дошотовские стекла на диаграмме $n_D - v$ (на рис. 108 n_D отложено вдоль оси ординат, v — по оси абсцисс), то эти стекла окажутся расположенными в узкой области диаграммы. Аббе показал, что для улучшения качества оптических систем необходимо создать новые стекла с равнообразными оптическими постоянными.

Шотт претворил в жизнь идею Аббе; он показал, что для изготовления стекол с оптическими постоянными, отличными от постоянных для существующих стекол, необходимо ввести в состав стекла новые компоненты, которыми до того времени не пользовались, и варьировать компоненты стекла в более смелых отношениях.

В настоящее время в состав оптических стекол вводят весьма разнообразные окислы: окись бария (BaO), борный ангидрид (B_2O_3), трехокись сурьмы (Sb_2O_3), окись цинка (ZnO), окись магния (MgO), окись алюминия (Al_2O_3), фтор (F), фосфорный ангидрид (P_2O_5) и др. Действие этих окислов на оптические постоянные стекол может быть характеризовано с помощью той же диаграммы Аббе (рис. 108).

Стекла, содержащие лишь незначительное количество BaO или PbO (до 30%) относятся к кронам; на диаграмме Аббе они занимают область, лежащую в пределах $n_D = 1,50—1,55$ и $v = 55—70$.

Различают фосфатные кроны, в состав которых в качестве главного стеклообразующего окисла входят кислородные соединения фосфора — фосфорный ангидрид, соли мета- и орто-фосфорной кислоты (на диаграмме Аббе они занимают область, ограниченную $n_D = 1,50—1,60$ и $v = 63—71$), и боросиликатные кроны, содержащие, наряду с кремнеземом, более или менее (больше 30%) значительные количества борного ангидрида (на диаграмме Аббе эти стекла лежат в пределах $n_D = 1,50—1,53$ и $v = 58—65$). Наименьшими значениями n_D среди оптических стекол обладают фтористые кроны, располагающиеся на диаграмме в области $n_D = 1,49$ и $v = 62—71$. Основным компонентом этих стекол являются соли фтористоводородной кислоты (HF).

Стекла, содержащие окись бария в количестве от 3 до 30%, на диаграмме занимают область $n_D = 1,54—1,58$ и $v = 64,0—55,0$, это так называемые баритовые кроны (БК). При содержании окиси бария больше 30% стекла располагаются в пределах $n_D = 1,56—1,66$ и $v = 62,0—55,0$, это тяжелые кроны (ТК).

Стекла, в состав которых входит окись свинца в количестве от 15 до 40%, лежат в пределах $n_D = 1,54—1,58$ и $v = 40,0—47,5$. Это — легкие флинты (ЛФ). При меньшем содержании окиси свинца (от 3 до 15%) стекла имеют характеристику $n_D = 1,50—1,55$ и $v = 47—58$, эти стекла называют крон-флинтами (КФ).

При содержании PbO от 40 до 50% оптические постоянные стекол лежат в пределах $n_D = 1,58—1,65$ и $v = 40—35$. Эти стекла называют флинтами (Ф). Стекла с еще большим содержанием PbO (больше 50%), с еще большим n_D и дисперсией ($n_D > 1,65$ и $v < 34$) называют тяжелыми и очень тяжелыми флинтами (ТФ).

Если в состав стекла одновременно входят окись свинца и окись бария в количестве больше 30%, такие стекла называют баритовыми флинтами (БФ), на диаграмме Аббе эти стекла располагаются в области $n_D = 1,52—1,67$ и $v = 35—58$.

Область промышленно освоенных стекол на рис. 108 обозначена косой штриховкой.

В последнее время как за границей, так и в СССР разработана рецептура новых стекол, оптические постоянные которых выходят за пределы промышленных стекол.

Расширение области оптических стекол оказалось возможным благодаря введению в состав стекла новых компонентов — окислов редких и редко-земельных

* Здесь n_D , n_F и n_C соответственно показатели преломления для линий D ($\lambda = 5893 \text{ Å}$) и линий F и C ($\lambda = 4861 \text{ Å}$ и 6563 Å) — см. I, гл. 1, § 9.

Таблица 8

Составы и характеристики ходовых оптических стекол

Тип стекла	Обозначение	Содержание окислов в стекле (в %)										Химическая устойчивость			Удельный вес	Твердость по компариментальной				
		Оптические показатели		SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	PbO	ZnO	Al ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃			As ₂ O ₃	категория	метод эксперимент. испыт.	минерал. проб. в сухих
		n _D	коэфф. преломления																	
Силикатный крон . . .	К	1,5147	60,6	71,0	—	7,8	18,6	10,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,48	—
" " " " " " " "	"	1,5181	59,0	66,5	1,1	7,8	13,7	5,4	—	—	—	3,8	1,5	—	—	—	—	10	2,55	0,8
Боросиликатный крон	К	1,5163	60,4	68,9	11,1	10,4	6,5	—	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	52	2,53	1,0
" " " " " " " "	"	1,5142	63,9	69,7	10,7	10,3	6,7	—	—	—	—	2,1	—	—	—	—	—	44	2,50	—
Легкий флинт	ЛФ	1,5180	45,9	61,0	—	4,5	8,0	—	—	—	26,3	—	—	—	—	—	—	20	2,94	0,1
" " " " " " " "	"	1,5783	41,7	52,9	1,4	—	9,6	—	—	—	35,7	—	—	—	—	—	—	—	3,20	0,7
Флинт	Ф	1,6129	36,9	47,6	—	—	6,4	—	—	—	45,7	—	—	—	—	—	—	45	3,38	0,6
" " " " " " " "	"	1,6169	36,5	47,0	—	—	6,3	—	—	—	46,4	—	—	—	—	—	—	25	3,60	0,6
" " " " " " " "	"	1,6199	36,3	46,5	—	—	6,3	—	—	—	47,0	—	—	—	—	—	—	15	3,60	0,6
Тяжелый флинт	ТФ	1,6475	33,9	42,4	—	—	5,7	—	—	—	51,7	—	—	—	—	—	—	1	3,86	0,6
" " " " " " " "	"	1,7172	29,5	33,8	—	—	4,5	—	—	—	61,4	—	—	—	—	—	—	15	4,44	0,5
" " " " " " " "	"	1,7550	27,5	31,6	—	—	2,8	—	—	—	65,3	—	—	—	—	—	—	<0,01	4,79	0,4
Баритовый крон . . .	БК	1,5302	60,5	63,1	3,2	3,1	10,4	—	14,7	—	—	5,2	—	—	—	—	—	<50	2,56	—
" " " " " " " "	"	1,5688	56,0	49,5	4,8	1,2	7,5	—	21,5	2,6	12,5	—	—	—	—	—	—	4	3,11	0,7
Тяжелый крон . . .	ТК	1,5726	57,5	50,2	3,3	—	6,1	—	30,2	—	9,5	—	—	—	—	—	—	4	3,21	0,7
Тяжел. барит. крон .	ТК	1,6126	58,6	32,7	13,2	—	—	—	45,9	—	3,5	3,1	—	—	—	—	—	<0,01	3,58	0,6
" " " " " " " "	"	1,5891	61,2	36,3	15,9	—	—	—	41,4	—	—	4,8	—	—	—	—	—	<0,01	3,32	—
Крон-флинт	КФ	1,5262	51,0	67,5	—	15,4	—	—	—	—	12,3	4,6	—	—	—	—	—	9	2,73	0,8
Фтористый крон . . .	"	1,470	67,0	53,3	16,2	—	16,2	F	—	—	—	—	8,8	—	—	—	—	—	—	—
Фосфористый крон .	"	1,516	70,0	—	3,0	—	12,0	P ₂ O ₅ 70,5	4,0	—	—	—	10,8	—	—	—	—	—	—	—
" " " " " " " "	"	1,558	67,0	—	3,0	—	—	P ₂ O ₅ 59,5	—	28,0	—	—	8,0	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 9

Сорт стекла	О п т и ч е с к и е п о с т о я н н ы е									
	показатель преломле- ния	средняя дисперсия	коэффи- циент дис- персии	ч а с т н ы е д и с п е р с и и			о т н о с и т е л ь н ы е ч а с т н ы е д и с п е р с и и			
				n_D'	$n_D - n_C$	$n_F - n_D$	$n_D' - n_F$	$\frac{n_D - n_C}{n_F - n_C}$	$\frac{n_D' - n_F}{n_F - n_C}$	
	n_D	$n_F - n_C$	γ	n_D'	$n_D - n_C$	$n_F - n_D$	$n_D' - n_F$	$\frac{n_D - n_C}{n_F - n_C}$	$\frac{n_D' - n_F}{n_F - n_C}$	
К р о н ы										
K1	1,4982	0,00765	65,1	0,00958	0,00230	0,00535	0,00423	0,301	0,699	
K2	1,5004	758	66,0	0952	228	530	422	301	699	
K3	1,5100	805	63,4	1016	240	565	451	298	702	
K4	1,5102	861	59,1	1100	255	609	491	295	705	
K5	1,5110	795	64,3	1001	237	558	443	298	702	
K6	1,5111	845	60,5	1072	251	594	478	297	703	
K7	1,5142	804	64,0	1014	240	564	450	299	701	
K8	1,5163	806	64,1	1016	240	566	450	298	702	
K9	1,5181	879	58,9	1118	260	619	499	296	704	
K12	1,5238	884	59,3	1124	261	623	501	295	705	
K10	1,5263	876	60,1	1114	259	617	497	296	704	
K11	1,5331	918	58,1	1170	271	647	523	295	705	
Баритовые кроны										
БК2	1,5147	0,00849	60,6	0,01080	0,00250	0,00599	0,00481	0,294	0,706	
БК3	1,5183	0859	60,3	1090	255	604	486	297	703	
БК4	1,5302	0877	60,5	1112	260	617	495	296	704	
БК5	1,5399	0905	59,7	1151	268	637	514	296	704	
БК6	1,5399	0905	59,7	1151	268	637	514	296	704	
БК7	1,5414	0916	59,1	1168	270	646	522	295	705	
БК8	1,5467	0871	62,8	1112	259	612	500	297	703	
БК9	1,5646	1012	55,8	1294	299	713	581	295	705	
БК10	1,5688	1015	56,0	1296	300	715	581	296	704	
Крон-флинты										
КФ1	1,5145	0942	54,6	0,01205	0,00277	0,00665	0,00540	0,294	0,706	
КФ2	1,5189	0905	57,3	1151	268	637	514	296	704	
КФ3	1,5262	1032	51,0	1328	302	730	598	293	707	

Продолжение таблицы 9

Сорт стекла	О п т и ч е с к и е п о с т о я н н ы е										
	показатель преломле- ния	средняя дисперсия	коэффи- циент ди- сперсии	ч а с т н ы е д и с п е р с и и			о т н о с и т е л ь н ы е ч а с т н ы е д и с п е р с и и				
				n_D'	$n_D - n_C$	$n_F - n_D$	$n_D' - n_F$	$\frac{n_D' - n_D}{n_F - n_C}$	$\frac{n_D' - n_F}{n_F - n_C}$		
Баритовые флинт	БФ1	1,5250	0,00956	54,9	0,01230	0,00280	0,00676	0,00554	0,293	0,707	0,580
	БФ2	1,5274	0897	58,8	1153	264	0633	0520	294	706	580
	БФ3	1,5335	1034	51,6	1331	303	0731	0600	293	707	580
	БФ4	1,5473	1021	53,6	1314	298	0723	0591	292	708	579
	БФ5	1,5484	1046	52,4	1347	305	0741	0306	292	708	579
	БФ6	1,5696	1152	49,4	1492	334	0818	0674	290	710	585
	БФ7	1,5795	1076	53,9	1382	315	0761	0621	293	707	577
	БФ8	1,5826	1254	46,5	1631	364	0890	0741	290	710	591
	БФ9	1,5889	1108	53,2	1425	324	0784	0641	292	708	579
	БФ10	1,6055	1379	43,9	1802	398	0981	0821	289	711	595
	БФ11	1,6222	1171	53,1	1505	342	0829	0676	292	708	577
	БФ12	1,6259	1601	39,1	2111	457	1144	0967	285	715	604
	БФ13	1,6395	1325	48,3	1718	385	0940	0778	291	709	587
	БФ14	1,6512	1699	38,3	2244	485	1214	1030	285	715	606
	БФ15	1,6644	1862	35,7	2474	529	1333	1141	284	715	613
	БФ16	1,6701	1416	47,3	1840	412	1004	0836	291	709	590
	Легкие флинт	ЛФ1	1,5406	0,01145	47,2	0,01466	0,00333	0,00812	0,00674	0,291	0,709
ЛФ2		1,5480	1195	45,9	1556	345	0850	706	289	711	591
ЛФ3		1,5608	1199	46,8	1557	348	0851	705	290	710	589
ЛФ4		1,5730	1343	42,7	1758	387	0956	802	288	712	597
ЛФ5		1,5749	1392	41,3	1826	400	0992	834	287	713	599
ЛФ6		1,5783	1387	41,7	1817	399	0988	829	288	712	598
ЛФ7		1,5783	1407	41,1	1848	401	1006	842	285	715	598
Тяжелые кроны	ТК1	1,5638	0,00928	60,8	0,01178	0,00275	0,00653	0,00525	0,296	0,704	0,566
	ТК2	1,5724	0996	57,5	1271	294	702	569	295	705	571

Содержание
на странице
290 стр

Продолжение таблицы 9

Сорт стекла		О п т и ч е с к и е п о с т о я н н ы е										
		показатель преломле- ния	средняя дисперсия	коэффи- циент ди- сперсии	ч а с т н ы е д и с п е р с и и				о т н о с и т е л ь н ы е ч а с т н ы е д и с п е р с и и			
					n _D	n _F —n _C	n _D —n _C	n _F —n _D	n _{G'} —n _F	n _D —n _C n _F —n _C	n _F —n _D n _F —n _C	n _{G'} —n _F n _F —n _C
Тяжелые кроны	TK3	1,5891	0962	61,2	1219	286	676	543	297	703	564	
	TK4	1,6111	1095	55,8	1400	322	778	627	294	706	573	
	TK5	1,6126	1046	58,6	1330	309	737	593	295	705	567	
	TK6	1,6126	1050	58,3	1336	309	741	595	294	706	567	
	TK7	1,6137	1090	56,3	1394	321	769	625	294	706	573	
	TK8	1,6140	1114	55,1	1427	327	787	640	294	706	575	
	TK9	1,6171	1142	54,0	1466	335	807	659	293	707	577	
	TK10	1,6227	1095	56,9	1400	321	774	626	293	707	572	
	TK11	1,6577	1285	51,2	1653	376	909	744	293	707	579	
	Флинты	Ф1	1,6128	0,01659	36,9	0,02194	0,00474	0,01185	0,01009	0,286	0,714	0,608
		Ф2	1,6164	1684	36,6	2229	480	1204	1025	285	715	609
Ф3		1,6199	1706	36,3	2256	488	1218	1038	286	714	608	
Ф4		1,6242	1738	35,9	2302	496	1242	1060	285	715	610	
Ф5		1,6257	1756	35,6	2327	500	1256	1071	285	715	610	
Тяжелые флинты	ТФ1	1,6475	0,01912	33,9	0,02546	0,00542	0,01370	0,01176	0,283	0,717	0,615	
	ТФ2	1,6725	2087	32,2	2786	590	1497	1289	283	717	618	
	ТФ3	1,7172	2431	29,5	3266	683	1748	1518	281	719	624	
	ТФ4	1,7398	2628	28,2	3543	738	1890	1653	281	719	629	
	ТФ5	1,7550	2743	27,5	3705	768	1975	1730	280	720	631	
	ТФ6	1,9000	4286	21,0								
Особые сорта	О1	1,4686	0,00707	66,3	0,00888	0,00212	0,00495	0,00393	0,300	0,700	0,556	
	О2	1,5294	1022	51,8	1309	301	721	588	295	705	575	
	О3	1,5810	1404	41,4	1812	405	999	813	288	712	579	
	О4	1,5889	1211	48,6	1571	351	860	711	290	710	587	

элементов: тантана, тантала, церия, тория, титана и др. Так, например, борнолантановые стекла имеют весьма высокий показатель преломления при малой дисперсии, эти стекла резко выпадают из общей системы обычных оптических стекол (рис. 109).

В табл. 8 приводятся составы некоторых ходовых промышленных стекол, а в табл. 9 и 10 — их оптические постоянные (см. ниже Б, § 1).

Таблица 10

Показатель преломления n_D

$\lambda, \text{Å}$	Сорт	КФ1	ЛФ2	КФ3	ЛФ7	ТК1	ТК7	ТФ1
9806,6 (Fe)	—	—	1,535935	—	—	1,555267	—	—
9508,7 (Fe)	1,507017	—	1,536445	—	—	1,555735	1,603640	—
8989,14 (Fe)	1,507870	—	1,537425	—	1,566341	1,556589	1,604592	—
8630,17 (Fe)	1,508517	—	1,538188	1,517483	1,567234	1,557234	1,605318	1,632577
7685,00 (A')	1,510507	—	1,540547	1,519597	1,569891	1,559228	1,607559	1,636042
6562,79 (C)	1,513797	—	1,544545	1,523094	1,544509	1,562509	1,611291	1,642119
5893,00 (D)	1,516602	—	1,548014	1,526097	1,578556	1,564220	1,614488	1,647538
4861,33 (F)	1,523353	—	1,556532	1,533383	1,588608	1,571732	1,622170	1,661212
4358,34 (g)	1,528598	—	1,563326	1,539119	1,596703	1,576752	1,628118	1,672453
4046,56 (h)	1,533030	—	1,569101	1,543939	1,603684	1,580908	1,633076	1,682278
3650,15 (Hg)	1,540641	—	1,579801	1,552301	1,616105	1,587983	1,641570	1,700167
3399,34 (Fe)	1,547221	—	1,588425	1,559635	1,627400	1,593992	1,648818	1,716896
3271,00 (Fe)	1,551356	—	—	1,564274	—	—	—	—

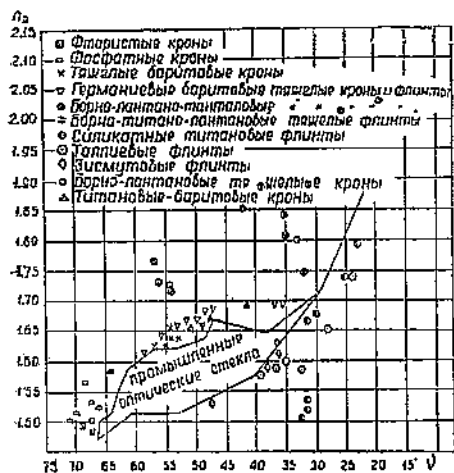


Рис. 109. Диаграмма n_D — u экспериментальных стекол

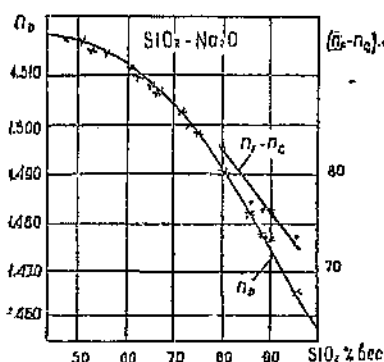


Рис. 110. Показатели преломления n_D и общая дисперсия $n_F - n_C$ кремненатриевых стекол

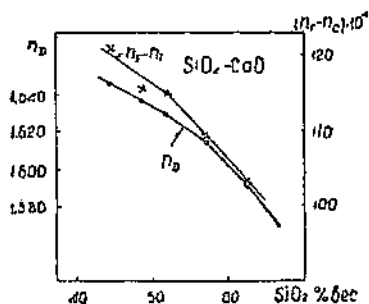


Рис. 111. Показатели преломления n_D и общая дисперсия $n_F - n_C$ кремнекальциевых стекол

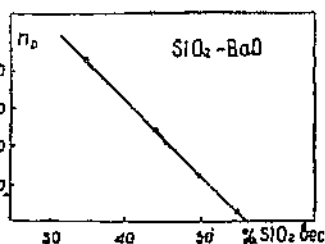


Рис. 112. Показатели преломления n_D кремнебариевых стекол

Влияние отдельных окислов на показатель преломления и дисперсию стекла исследовалось на простейших стеклообразных системах $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2\text{—BaO}$, $\text{SiO}_2\text{—PbO}$, $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—BaO}$, $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O—PbO}$ и т. д. На рис. 110—116 приводятся зависимости n_D и $n_F\text{—}n_C$ от состава стекла, выраженного в весовых

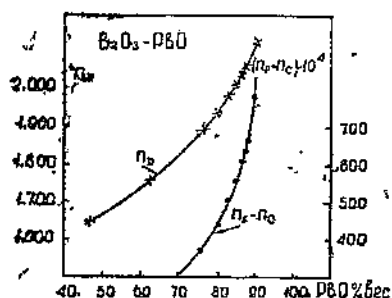


Рис. 113. Показатели преломления n_D и частные дисперсии $n_F\text{—}n_C$ боросвинцовых стекол

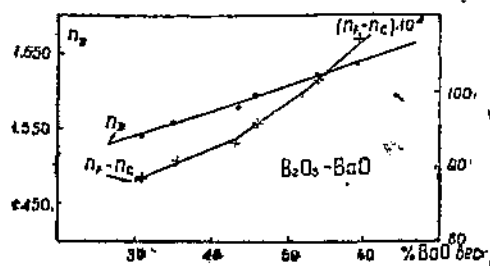


Рис. 114. Показатели преломления n_D и частные дисперсии $n_F\text{—}n_C$ борноборных стекол

процентах. Из этих рисунков видно, что окись свинца наиболее сильно увеличивает показатель преломления и дисперсию стекол, далее по величине влияния на n_D и $n_F\text{—}n_C$ идет BaO.

В простейших системах окислы калия и натрия также увеличивают n_D и $n_F\text{—}n_C$, но действие их выражено слабее.

Количественно влияние наиболее употребительных в оптическом стекловарении окислов на оптические постоянные стекол может быть охарактеризовано следующим образом.

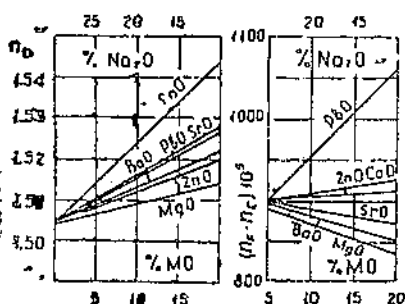


Рис. 115. Левый рисунок — изменение показателя преломления стекла, содержащего 70% SiO_2 + 30% Na_2O , при замене в нем Na_2O на окислы CaO, SrO, PbO, BaO, ZnO и MgO. Правый рисунок — изменение общей дисперсии в тех же стеклах

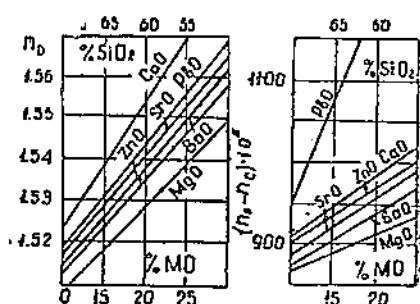


Рис. 116. Левый рисунок — изменение показателя преломления стекол, содержащих 20% Na_2O , при замене в них SiO_2 на окислы CaO, PbO, SrO, BaO, ZnO и MgO. Правый рисунок — изменение общей дисперсии в тех же стеклах

Увеличивают показатель преломления и наиболее интенсивно: PbO , Sb_2O_3 , TiO_2 , BaO , CdO , ZnO и CaO .

Уменьшают показатель преломления и наиболее интенсивно: SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 .

Различное, в зависимости от состава стекла, влияние на показатель преломления оказывают окислы: BeO , MgO , Na_2O , K_2O .

Увеличивают общую дисперсию и наиболее интенсивно окислы: Sb_2O_3 , PbO , TiO_2 , CdO , BaO , CaO .

Уменьшают общую дисперсию и наиболее сильно: Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 .

Часто уменьшают общую дисперсию: Na_2O , K_2O , BeO .

Однако количественное влияние отдельных окислов на оптические свойства стекол зависит не только от природы окисла, но и от состава того стекла, в кото-

рое вносится этот окисел. Так, например, введение 3%-ной добавки борного ангидрида (B_2O_3) в тяжелый баритовый крон (ТК5) вызывает понижение n_D на 6 единиц четвертого десятичного знака и уменьшение общей дисперсии на

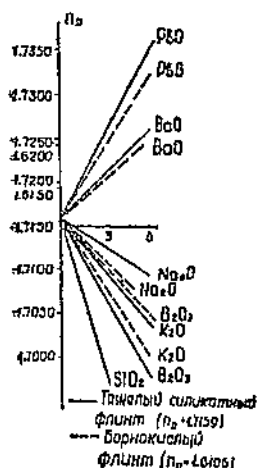


Рис. 117. Изменение показателя преломления n_D тяжелого силикатного флинта (—) и борнокислого флинта (---) под влиянием 3 и 6% добавок различных окислов

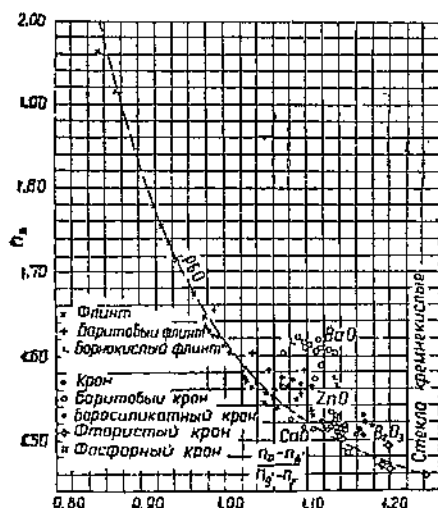


Рис. 119. Изменение отношения частных дисперсий для красной и синей частей спектра $\frac{n_D - n_A}{n_F - n_F}$ в зависимости от n_D для различных типов стекол

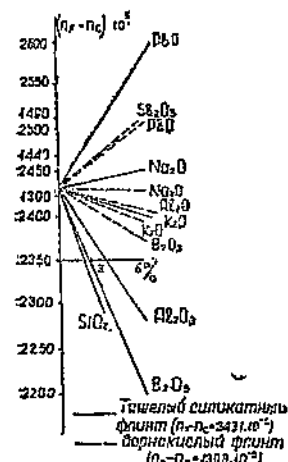


Рис. 118. Изменение общей дисперсии $n_F - n_C$ тяжелого силикатного флинта (—) и борнокислого флинта (---) под влиянием 3 и 6% добавок различных окислов

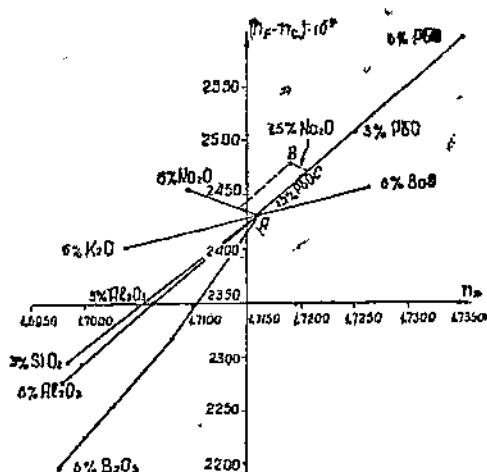


Рис. 120. Изменение показателя преломления n_D и общей дисперсии тяжелого флинта под влиянием 3 и 6% добавок различных окислов

7 единиц пятого знака, та же добавка борного ангидрида в борносвинцовое стекло вызывает уменьшение n_D на 56 единиц четвертого десятичного знака и уменьшение общей дисперсии на 31 единицу пятого знака; добавка 3%- трехоксида сурьмы (Sb_2O_3) в тяжелый баритовый крон увеличивает n_D на 91 единицу четвертого

знака и общую дисперсию на 55 единиц пятого знака, та же добавка трехокси сурьмы в борносвинцовое стекло увеличивает n_D только на 74 единицы четвертого знака и общую дисперсию на 46 единиц (см. также рис. 117 и 118).

Необходимо иметь в виду, что отдельные окислы влияют не только на величину полной дисперсии стекла, но и на величину их частных дисперсий в различных областях спектра. На рис. 119 проводится зависимость отношения частных дисперсий красной и синей частей $\frac{n_D - n_{A'}}{n_G - n_F}$ от n_D . На этом графике отчетливо

видно действие окиси свинца, увеличивающей дисперсию синей части по сравнению с красной, и влияние борной кислоты, увеличивающей, наоборот, дисперсию красной части спектра.

Влияние небольших (до 10%) добавок различных окислов на n_D и $n_F - n_C$ пропорционально количеству вносимого окисла. При дальнейшем увеличении содержания окисла изменение как n_D , так и $n_F - n_C$ происходит не пропорционально (рис. 110, 111). Однако, если не задаваться большой точностью в оценке n_D , можно, как это показано многими исследователями, весьма простыми формулами рассчитать значение n_D по составу. Так, Жилар и Любрюль* предложили уравнение для расчета n_D по составу стекла с точностью до 0,002—0,005:

$$n_D = (A_1 x_1 + B_1 x_1^2) + (A_2 x_2 + B_2 x_2^2) + \dots, \quad (1,1)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 — удельные коэффициенты преломления для различных окислов; x_1, x_2, x_3 и т. д. — количества окислов, входящих в стекло, в процентах. В табл. 11 приводятся значения коэффициентов A и B для ряда окислов.

Таблица 11

Расчет n_D по составу по формуле

$$n_D = (A_1 x_1 + B_1 x_1^2) + (A_2 x_2 + B_2 x_2^2) + \dots,$$

где x_1, x_2 и т. д. — весовые % различных компонентов, входящих в стекло.

Окисел	Значения n_D	Пределы применимости	Ошибка (в %)
SiO ₂	0,01458 x	0—100	—
TiO ₂	0,0200 x	0—10	0,08
Al ₂ O ₃	0,01510 x	0—20	0,2
B ₂ O ₃	0,01725 $x - 50 \cdot 10^{-6} x^2$	0—40	1,5
BeO	0,01860 $x - 80 \cdot 10^{-6} x^2$	0—16	0,5
MgO	0,01700 x	0—15	0,4
CaO	0,01785 x	0—40	0,5
BaO	0,01690 x	0—50	0,5
PbO	0,01760 x	0—40	1,0
	0,01760 $x + 140 \cdot 10^{-6} (x - 40)^2$	40—80	1,0
ZnO	0,01675 x	0—18	0,1
Na ₂ O	{ 0,01618 x 0,01646 $x - 14 \cdot 10^{-6} x^2$	{ 0—20 20—55	{ 0,2 0,2
K ₂ O	{ 0,01575 x 0,01575 x 0,01575 $x + 130 \cdot 10^{-6} (x - 20)^2$	{ 0—40 0—20 20—60	{ 0,5 без PbO 1,0 с PbO 1,0 с PbO

Интересную формулу для расчета показателя преломления стекол дает Л. И. Демкина:

$$n \frac{1}{m_c} = \frac{a}{m_1} n_1 + \frac{b}{m_2} n_2 + \frac{c}{m_3} n_3 + \dots \quad (1,2)$$

Здесь m_c ... эффективный молекулярный вес стекла, рассчитываемый по формуле

$$\frac{1}{m_c} = \frac{a_1}{m_1} + \frac{b}{m_2} + \frac{c}{m_3} + \dots \quad (1,3)$$

* Journ. Soc. Glass. Techn., № 873, 476, 1937.

В формуле Демкиной каждый окисел характеризуется двумя коэффициентами — m и n , из которых первый может рассматриваться как эффективный молекулярный вес окисла в стекле, а второй — как молекулярная рефракция окисла; a , b , c — содержание окислов в стекле, выраженное в весовых процентах.

Известны и другие эмпирические формулы для расчета показателя преломления простейших стекол (формулы Педдля, Тиллотсона, Файка и Финна, Кнаппа и др.).

Вышеприведенные способы расчетов оптических постоянных стекол, в зависимости от их состава, являются чисто эмпирическими. Ими можно с успехом пользоваться в том случае, когда, во-первых, не встречается необходимости в точных данных или, во-вторых, когда рассчитывается влияние весьма небольшой добавки того или иного окисла. Так, например, в процессе варки флинтос приходится исправлять оптические постоянные. Для этого можно пользоваться или расчетными формулами типа Жилара и Любрюля или же диаграммами, аналогичными той, что дается на рис. 120.

На этом рисунке указано, как изменяется n_D и $n_F - n_C$ при введении в тяжелый флинт ТФЗ 3% или 6%-ной добавок некоторых окислов. С помощью такой диаграммы легко произвести нужное исправление оптических постоянных стекол.

Если, например, проба стекла, взятая во время варки, при измерении дает n_D и $n_F - n_C$, отличные от требуемых для этого сорта, тогда производят исправление плавки; для этого находят графически, по правилу параллелограмма, нужные количества исправляющих компонентов, которые и вносятся в расплавленное стекло.

Пример (рис. 120). Вместо требуемых констант, отвечающих точке B , пробы дают константы точки A . Строим параллелограм вдоль прямых, отвечающих добавкам PbO и Na_2O . По величине отрезков BC и AC определяем требуемое количество добавки: в данном случае необходимо увеличить в стекле содержание Na_2O на 1,5% и увеличить PbO тоже на 1,5%.

Изменение показателя преломления вещества с изменением его состава объясняется, во-первых, изменением плотности d вещества и, во-вторых, деформацией электронных оболочек атомов, из которых построено вещество. Способность вещества преломлять лучистую энергию часто выражают как молекулярную рефракцию R , которую рассчитывают по формуле:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{d} = R, \quad (1,4)$$

где n — показатель преломления вещества.

d — его плотность.

M — молекулярный вес.

Молекулярная рефракция может рассматриваться как сумма рефракций атомов, входящих в молекулу вещества. Изменение величины атомной рефракции характеризует собою способность к деформации атомов вещества.

Деформация атомов определяется размерами их, прочностью их структуры и характером межатомных связей. Структура силикатных стекол, согласно рентгеноскопическим исследованиям силикатных систем, представляет собою непрерывную неправильную решетку, построенную из связанных между собою тетраэдров SiO_4 и ионов других металлов (Na , Ca , K , Pb и т. д.).

В силикатном тетраэдре SiO_4 ион кремния расположен в центре, вершины тетраэдра заняты ионами кислорода. Два соседние атома кремния связаны между собою только через ион кислорода (рис. 121).

Согласно этой структурной схеме молекулярная рефракция стекол может быть рассчитана из атомных рефракций следующим образом. Пусть стекло имеет состав: $xSiO_2 \cdot yNa_2O \cdot zCaO$, причем $x > y + z$. В структуре стекла такого состава различаем атомы Si , Na , Ca и атомы кислорода двух родов — атомы O , связанные обеими валентностями с атомами кремния, и атомы кислорода, которые одной валентностью связаны с кремнием, другой же — с атомами Na или Ca . Так как величина деформации атома зависит от характера связи, а она различна у связей $Si-O-Si$, $Na-O-Si$ или $Ca-O-Si$, будет различна и атомная рефракция соответствующих кислородных атомов. Поэтому молекулярная рефракция нашего стекла выразится так:

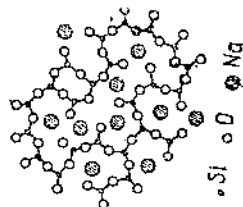


Рис. 121. Схема строения натриево-кремнеземного стекла по Варрену

$$R_{\text{стекла}} = xR_{Si} + yR_{Na} + zR_{Ca} + 2yR_{ONaSi} + 2zR_{OCAi} + [2x - (y + z)] R_{OSi}$$

R_{Si}	—	атомная рефракция кремния
R_{Na}	—	натрия.
R_{Ca}	—	кальция.
R_{OSi}	—	кислорода, связанного обеими валентностями с атомом кремния.
R_{OSiNa}	—	кислорода, связанного одной валентностью с атомом кремния, другой — с атомом натрия.
R_{OSiCa}	—	кислорода, связанного одной валентностью с атомами кремния, другой — с атомом кальция.

$R_{\text{стекла}}$ — молекулярная рефракция стекла.

Таким образом, зная состав стекла и его структурные особенности, можно рассчитать его молекулярную рефракцию и далее показатель преломления по формуле (1,4).

Подобные подсчеты делались многими исследователями, однако недостаточность еще знаний о структуре стекла не позволяет в настоящее время производить подобный расчет с требуемой точностью.

§ 2. О химической устойчивости стекол

В эксплуатации и в технологии изготовления стекла приходится считаться, помимо оптических постоянных, с другими хотя и косвенными, но столь же важными свойствами. К таким прежде всего относится химическая устойчивость стекла, т. е. способность стекла противостоять действию атмосферных и вообще внешних агентов — действию воды и ее паров, углекислоты, кислот, щелочей, растворов солей и т. д.

Стекло, помещенное во влажную атмосферу, иногда покрывается с поверхности капельным налетом — сетью мелких капель, отчетливо наблюдаемых в виде светящихся точек на темном фоне при боковом освещении образца стекла. Иногда в результате разрушения стекла на его поверхности появляется белесоватый налет, часто причудливой формы, представляющий собою продукт взаимодействия стекла с влагой воздуха. Очень часто химически нестойкие стекла покрываются тонкой прозрачной пленкой, окрашенной цветами побежалости.

Если поверхность детали расположена в фокальной плоскости окуляра (например, шкалы, сетки и т. д.), следы разрушения стекла будут накладываться на изображение, наблюдаемое в прибор. На деталях, находящихся вне фокальной плоскости, следы разрушения могут быть наблюдаемы в виде более или менее темных пятен без резких очертаний. Чем дальше расположена деталь от фокальной плоскости, тем слабее пятно.

По нормам, существующим в оптической промышленности, появление на полированной поверхности оптической детали видимых следов разрушения недопустимо.

Характер разрушения стекла при воздействии на него воды или растворов различных электролитов определяется составом самого стекла и природой действующего агента. Поэтому химическую устойчивость стекла можно рассматривать не вообще, а по отношению к тому или иному агенту. Практически удобно различать действие воды, растворов кислот, растворов щелочей и солей.

Действие воды. Взаимодействие воды и стекла может протекать двояко.

1. Стекло в целом может растворяться водою подобно тому, как растворяются в воде сахар или соль, правда, с несравненно меньшей скоростью. Этот случай взаимодействия очень редок и наблюдается только для некоторых сортов фосфатных и боратных стекол.

2. Разрушение силикатных стекол водою протекает иначе. При действии на силикатное стекло водою силикаты стекла гидролизуются, образовавшиеся в результате гидролиза растворимые соли щелочных металлов уносятся водою. На поверхности стекла остается нерастворимая пленка кремниевой кислоты и нерастворимых силикатов. Лежащие за этой пленкой слои стекла, в свою очередь, разрушаются, но так как процессы диффузии через пленку замедлены, то замедляется и дальнейший процесс разрушения стекла. Ход разрушения стекла во времени представлен на графике рис. 122.

Таким образом, стекло оказывается защищенным от дальнейшего разрушения химически устойчивой кремнеземной пленкой.

Действие растворов кислот. Действие на стекло водных растворов кислот и особенно слабых кислот подобно действию воды, но проявляется более интенсивно.

Действие на силикатное стекло щелочных растворов иное, чем действие воды и кислот. В водном щелочном растворе силикатное стекло растворяется без образования кремнеземной пленки, подобно растворению водно боратных и фосфатных стекол. Такое взаимодействие обусловлено тем, что сама защитная пленка кремнезема на поверхности стекла растворяется щелочами.

Водные растворы солей оказывают различное влияние на силикатные стекла. Наиболее интенсивно действуют водные растворы солей щелочных и щелочно-земельных металлов — растворы NaCl , KCl , MgCl_2 , MgSO_4 и т. д. Обычно поверхность исследуемого образца стекла после часового пребывания в растворах солей покрывается непрозрачной белесоватой пленкой — налетом. Особенно интенсивно в этом отношении действие растворов магниевых и кальциевых солей. Есть основание считать, что налет образован силикатами магния и кальция, появившимися на поверхности стекла в результате взаимодействия силикатов щелочных металлов с растворимыми солями магния и кальция.

Для количественной оценки химической устойчивости стекол разработано несколько методов. Стандартными методами в оптической промышленности приняты:

1. Метод ГОИ, характеризующий химическую устойчивость стекла временем в часах, необходимым для разрушения стекла на глубину в $1250 \text{ \AA}$ под действием 0,5%-ного водного раствора уксусной кислоты при температуре 80°C .

2. Усовершенствованный метод Теплоя, характеризующий химическую устойчивость временем в часах, необходимым для разрушения стекла на глубину $1000 \text{ \AA}$ под влиянием санинормальной соляной кислоты при 25°C .

3. Метод химической устойчивости стекла по отношению к влажной атмосфере. Этим методом устойчивость определяется временем в сутках, потребным для образования на поверхности стекла капельного нежирового налета, видимого в микроскоп при 80-кратном увеличении. Образец выдерживается в 100%-ной относительной влажности при $20-25^\circ \text{C}$.

Зависимость химической устойчивости стекол от их состава. По химической устойчивости к водным растворам слабых кислот стекла делятся на следующие категории:

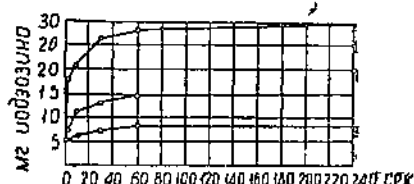


Рис. 122. Разрушение стекла водно в зависимости от продолжительности действия. По оси абсцисс — время в секундах, по оси ординат — величина, пропорциональная количеству разрушенного стекла

Таблица 12

Категория химической устойчивости по отношению к растворам слабых кислот	Показатель устойчивости (в часах)	
	метод ГОИ; время, потребное на образование пленки в $1250 \text{ \AA}$ (в часах)	метод Теплоя; время, потребное на образование пленки в $1000 \text{ \AA}$ (в часах)
1	Больше 20	Больше 20
2	20—5	20—10
3	5—1	10—4
4	1—0,1	4—1
5	0,1 и меньше	1 и меньше

По действию влажной атмосферы силикатные оптические стекла делятся на следующие группы:

Таблица 13

Группа	Время (в сутках) потребное для образования видимого налета	Характеристика
А	Больше 90	Не склонные к налето-образованию
Б	От 90 до 30	Склонные
В	30 и меньше	Налетоопасные

По химическому составу оптические стекла распределяются среди указанных категорий химической стойкости следующим образом; к первым двум категориям, т. е. к наиболее устойчивым стеклам, относятся кроны, легкие баритовые кроны и флинт; к четвертой и пятой категориям, т. е. к неустойчивым стеклам, относятся баритовые флинты, тяжелые кроны и тяжелые флинты; промежуточные стекла третьей категории очень немногочисленны: к ним относятся некоторые кроны, баритовые кроны и тяжелые кроны (табл. 8).

При конструировании оптических приборов рекомендуется наружные оптические детали изготовлять из стекол первых двух категорий по химической устойчивости.

§ 3. Основные этапы производства оптического стекла и его обработки

Указанные выше важнейшие свойства оптического стекла определяют технологию его изготовления.

В производстве оптического стекла различают следующие стадии:

1. Подготовка горшков и мешалок для варки стекла, подготовка сырых материалов, составление и перемешивание шихты.
2. Стадия варки стекла, т. е. сплавление шихты в стеклообразный расплав, осветление расплава, освобождение от пузырей и гомогенизация его.
3. Студка готового стекла.
4. Разделка стекла, т. е. изготовление из бесформенных кусков стекла заготовок для будущих оптических деталей.
5. Изготовление оптических деталей.

а) Сырые материалы и стеклоприпас

Как уже указывалось выше, состав оптического стекла определяет его оптические константы, а так как требования относительно оптических качеств стекла весьма велики, то велики и требования относительно состава его. Это заставляет при изготовлении оптического стекла пользоваться особо чистыми сырыми материалами и высококачественным стеклоприпасом. Ниже приводим краткую характеристику некоторых сырых материалов, применяемых в оптическом стекловарении.

Кремнезем. Кремнезем вводится в шихту в виде кварцевого песка, который должен содержать не меньше 99,6% SiO_2 . Наиболее вредной для оптического стекла примесью в песке являются окислы железа и хрома (см. ниже § 6) и окись титана. Содержание Fe_2O_3 должно быть не больше 0,02%, содержание TiO_2 не больше 0,05%. Природные кварцевые пески подвергаются специальному обогащению: промывке водой, а иногда и магнитной сепарации с целью устранения примесей железа. Таким путем для некоторых песков удастся снизить содержание железа от 0,5—0,3 до 0,02—0,025%.

Для облегчения процесса варки стекла следует пользоваться песком крупностью зерна 0,15—0,35 мм. Слишком мелкие фракции песка склонны к распылению и затрудняют получение однородной шихтной массы. Также неудобны и большие зерна, замедляющие скорость провара шихты.

Борный ангидрид. Вводится в стекло в виде борной кислоты (H_3BO_3) или буры ($Na_2B_4O_7$). Борная кислота при нагревании теряет воду и переходит в борный ангидрид.

Фосфорный ангидрид (P_2O_5) вводится в стекло либо в виде ортофосфорной кислоты (H_3PO_4), либо в виде солей $(NH_4)_2H_2PO_4$.

Окись натрия (Na_2O) вводится в стекло в виде кальцинированной соды (Na_2CO_3), иногда в виде буры или азотно-кислого натрия ($NaNO_3$).

Окись калия (K_2O) вводится в виде поташа (K_2CO_3) или селитры (KNO_3).

Окись кальция — в виде углекислых солей кальция ($CaCO_3$) природного происхождения, наиболее чистых — известняка, мрамора или мела.

Окись магния (MgO) и окись цинка (ZnO) вводятся в стекло как таковые или в виде углекислых солей.

Окись свинца (PbO) вводится либо через глет (PbO), либо через сурик (Pb_3O_4).

Для окиси бария (BaO) используют углекислый барий ($BaCO_3$) или нитрат бария $[Ba(NO_3)_2]$.

Для введения окиси алюминия применяют либо гидрат окиси алюминия $[Al(OH)_3]$ или чистые сорта природного каолина ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$).

Для введения фтора употребляют кислую фтористокислую соль (HF). В стекле остается лишь часть введенного фтора, так как около 20—30% его улетучивается в виде фтористого водорода (HF) или фтористого кремния (SiF_4).

В табл. 14 приведены технические условия на сырые материалы оптического стекловарения.

Таблица 14

Технические условия на сырые материалы оптического стекловарения

Материал	В сухом веществе (в %)					
	основного вещества не меньше	Fe_2O_3	Cl	SO_3	нераств. остаток	влажность
		не больше				
SiO_2	99,0	0,035	—	—	—	4,0
$B(OH)_3$	99,5	Следы	0,01	0,05	1,5	0,4
Na_2CO_3	99,0	Следы	0,5	0,05	0,5	3,0
K_2CO_3	96,0	0,02	0,5	0,5	0,5	3,0
KNO_3	99,8	0,01	0,01	—	—	0,1
$CaCO_3$	99,0	0,03	0,03	0,05	1,0	—
$MgCO_3$	99,0	0,02	0,01	0,2	0,2	0,2
$BaCO_3$	99,0	0,01	0,03	0,05	0,2	1,0
$Ba(NO_3)_2$	99,8	Следы	0,03	0,03	0,2	1,0
Pb_3O_4	98,0	Следы	—	Следы	0,1	—
ZnO	99,8	Следы	Следы	Следы	—	0,2
Al_2O_3	99,5	0,01	Нет	Нет	0,5	2,0
Sb_2O_3	99,8	0,01	—	—	—	0,1
As_2O_3	99,9	—	—	—	—	—

Некоторые сырые материалы (мрамор, мел, каолин и т. п.) предварительно измельчаются. Процессы измельчения необходимо вести так, чтобы в помол не попадали опасные примеси железа, поэтому все дробящие части механизмов делают не железными и чугунными, а применяют каменные бегуны, мельницы с фарфоровыми или гальковыми шарами.

После подготовки сырых материалов и анализа их составляется шихта. Шихта рассчитывается с учетом возможных изменений в составе стекла во время его варки (улетучиваются отдельные компоненты при высокой температуре,

растворяются стенки горшка и т. д.). Для этого пользуются специальными таблицами с эмпирически установленными коэффициентами. Навеска составляющих шихты берется с точностью в $0,01\%$. После дозировки производят тщательное смешение шихты. Перемешивание ведут в механическом смесителе — большом барабане, вращающемся вокруг оси, расположенной по диагонали наибольшего сечения барабана. Внутренние стенки барабана облицовываются деревом.

б) Варка оптического стекла

Варку оптического стекла ведут в больших горшках емкостью от 170 до 500 л. Материалом для стекловаренных горшков служит высокосортная огнеупорная глина. Требования, предъявляемые к огнеупору в оптическом стекловарении, сводятся к высокой химической устойчивости материала по отношению к действию расплавленного стекла, к высокой термической устойчивости, т. е. способности противостоять резким изменениям температуры, к значительной механической прочности при высоких температурах.

Глина, употребляемая в оптическом стекловарении, не должна содержать больших количеств окислов железа (не больше $1-2\%$), могущих попадать в стекло в результате растворения стенок горшка и повышать светопоглощение (см. дальше) стекла. Кроме того, глина должна удовлетворять определенным требованиям в отношении пластичности.

При обжиге глина обладает способностью давать значительную усадку (линейная усадка около 18%). Последняя в процессе обжига изделия может вести к его деформации и разрывам. Чтобы избежать этого, в глину вносят шамот, т. е. ту же глину, предварительно обожженную до температуры 1200° . Горшечную массу, из которой лепят горшки, готовят следующим образом. Растертые в порошок глина и шамот в отношении $40-45\%$ к $60-55\%$ тщательно перемешиваются и затворяются с 20% воды. Из полученного теста лепят обычно вручную, «в натир», горшки. Изготовленные горшки длительно (в течение $1,5-2$ месяцев) и осторожно высушивают до воздушно-сухого состояния.

В последнее время ведутся работы по внедрению механических способов лепки, трамбования и пакатки горшков, а также по изготовлению горшков литьем в гипсовые формы. Метод трамбования и механической пакатки горшков ускоряет время изготовления горшка (до 15 дней) и позволяет изготавливать горшки из значительно более сухой массы (около 7% влажности), что сокращает время последующей сушки горшка и уменьшает деформацию и разрывы горшков в период их сушки.

Непосредственно перед варкой стекла производится обжиг горшка. Во время обжига горшка происходит спекание глины, связывающей кусочки шамота, стенки горшка приобретают механическую прочность и становятся химически устойчивыми.

Обжиг идет в две стадии: предварительный — в калинице до температуры 900° (рис. 123) и окончательный — в стекловаренной печи до температуры $1400-1450^\circ$. Для того, чтобы обжигаемый горшок не треснул, обжиг следует вести осторожно, соблюдая определенный режим. Медленный и осторожный обжиг ведут в области температуры 100° , когда горшок отдает механически связанную гигроскопическую воду, и в области $500-700^\circ$, т. е. при температурах разрушения каолинита — основной составной части глины. Процесс обжига в калинице 400-литрового горшка длится от 4 до 6 суток.

После того как горшок обожжен до 900° в калинице, его, не охлаждая, перевозят в стекловаренную печь с температурой около 1000° (рис. 124). Температуру печи поднимают до $1400-1450^\circ$. Выдерживают горшок при этой температуре некоторое время (около 1 часа). На этом заканчивается процесс обжига, или, как говорят, выводки горшка. Теперь температуру печи снижают до той температуры, при которой ведется засыпка в горшок шихты данного сорта стекла.

Предварительно производят «обмазку» горшка стеклом. Для этого в горшок забрасывают стеклянный бой* того же сорта стекла. Стекло в горшке плавится и покрывает дно и частичной стенки горшка и тем самым защищает свежие стенки горшка от разрушительного действия легкоплавких щелочных компонентов шихты.

* Бракованное стекло того же сорта предыдущих плавов.

Затем специальным ковшом в несколько приемов с часовыми или полуторачасовыми промежутками вносят в горшок шихту. Процесс засыпки шихты длится 4—12 час., в зависимости от сорта стекла.

По окончании засыпки температуру печи поднимают и приступают к мешке стекла. Провар шихты начинается непосредственно после ее внесения в горшок и далее продолжается вплоть до полной гомогенизации стекломассы.

Сразу после внесения в печь начинают плавиться наиболее легкоплавкие компоненты шихты — карбонаты щелочных металлов, окись свинца, борный ангидрид; они, оплавляясь, обволакивают отдельные частицы кремнезема и вступают с ними в химическое взаимодействие. В результате этих реакций происходит постепенное растворение кремнезема, одновременно с этим в стекломассе начинают выделяться пузыри углекислоты как продукта реакции кремнезема с карбонатами или кислотами (в случае содержания в шихте нитратов и сурика).

В первые периоды провара стекломасса представляет собою полустекловатую непрозрачную вязкую массу, пронизанную более или менее крупными пузырями и отдельными зернами кремнезема. Для увеличения скорости провара шихты температуру печи поднимают. Это ускоряет реакцию стеклообразования, снижает вязкость уже

расплавленной) составной части шихты, увеличивает скорость диффузии и тем самым ускоряет провар стекломассы. Провар заканчивается в зависимости от состава шихты в течение 5—9 час. Перемешивание расплава в процессе провара способствует более быстрому завершению реакций стеклообразования и обеспечивает совершенно необходимую однородность стекломассы. В производстве обычного, не оптического, стекла расплавленную стекломассу либо вовсе не перемешивают, либо применяют несовершенные способы мешки, так называемое бурление (в расплав на специальном крюке вводят деревянную чурку, картофель и тому подобные вещества, газообразные продукты распада которых в виде обильных пузырей пронизы-

Для мешки оптического стекла пользуются специальными мешалками. Раньше мешку стекла производили шмотным пальцем, отвесно опущенным в горшок идвигающимся в стекле по кругу, параллельно стенкам горшка. Палец приводился в движение специальной мешальной машиной. Скорость движения пальца до 30 об/мин.

В последнее время Государственным Оптическим институтом был предложен и опробован новый более совершенный прием* перемешивания стекла лопастной мешалкой, вращающейся вокруг своей оси в центре горшка. При таком способе мешки можно задать значительно более высокие скорости вращения мешалки (до 100—150 об/мин), в результате чего можно получать более однородное стекло.

Одновременно с гомогенизацией производится и освобождение расплава от пузырей. Процесс обезпузыривания стекла идет частично за счет гидростатиче-

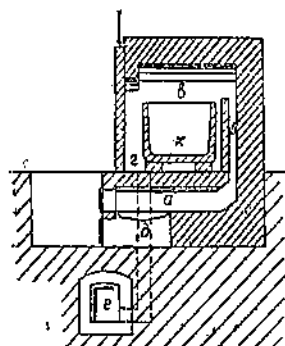


Рис. 123. Дровяная печь для отжига горшков — каленица:

а — толка; б — вертикальный
щелевидный канал, по кото-
рому продукты торения по-
ступают в рабочее простран-
ство а; к — горшок

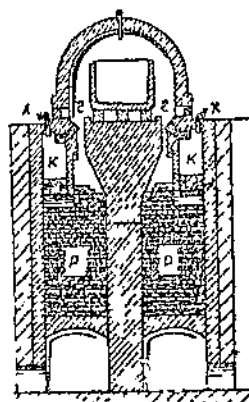


Рис. 124. Стекловаренная нефтяная капельниковая печь:

х — воронки, через которые подается нефть; р — регенераторы, служащие для подогрева воздуха, поступающего в печи; к — камеры, где происходит газификация нефти; з — горелки.

* К. С. Евстропьев и М. М. Скорняков, Журн. опт. мех. пром., № 2, стр. 14, 1939.

ского всплывания пузырей на поверхность расплава, частично же за счет растворения в стекле содержащихся в пузыре газов.

К оптическому стеклу предъявляются весьма высокие требования относительно беспузырности его (см. ниже Б, § 2).

В процессе обычной варки многие сорта оптического стекла очень медленно освобождаются от пузырей, а некоторые сорта (например, баритовые кроны) склонны в процессе варки к выделению мельчайших пузырей (диаметром около 0,1—0,2 мм) — так называемая „мошка“, удаление которой из расплава происходит чрезвычайно трудно.

Известно, что добавка в шихту или расплавленную стекломассу некоторых веществ способствует обеспузыриванию расплава; такими веществами, или, как говорят, осветлителями, являются мышьяковистый ангидрид (As_2O_3), трехокись сурьмы (Sb_2O_3), хлориды и сульфаты щелочных металлов ($NaCl$, Na_2SO_4), калиевые и баритовые селитры (KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$). Эти вещества под влиянием высокой температуры способны либо полностью испаряться, либо разлагаться с выделением газообразных продуктов. В результате этого осветлители вызывают перераспределение парциальных давлений газов в стекле, способствуют более быстрому росту мелких пузырей и облегчают их гидростатическое всплывание. Количество осветлителей, вносимое в шихту, невелико и обычно не превышает 0,5—1,0% (см. табл. 8, столбцы 14 и 15).

В период гомогенизации и осветления время от времени из расплава отбирают пробы и по количеству пузырей в пробе и по величине пузыря определяют степень завершения процесса гомогенизации и осветления.

При высокой температуре в процессе варки стекла происходит улетучивание с поверхности стекломассы легколетучих компонентов ее — окиси свинца, борного ангидрида, щелочей и др. Это ведет к заметному изменению состава стекла и, следовательно, к изменению его оптических свойств. Если летучая компонента сильно влияет на показатель преломления и дисперсию стекла, как, например, окись свинца, тогда приходится во время варки стекла производить контрольные измерения показателя и исправлять варку.

Исправление показателя преломления производится обычно путем добавки в расплав рассчитанного количества исправляющего стекольного боя со строго известным показателем и дисперсией.

Если показатель преломления плавки ниже требуемого по каталогу, в расплав добавляют рассчитанное количество стекольного боя с большим показателем, например флинт и тяжелые кроны исправляют тяжелыми флинтами*. Наоборот, если показатель преломления плавки выше требуемой, добавляют бой с меньшим показателем; так, для исправления тяжелых кронов и флинтов пользуются крон-флинтами.

После внесения добавки стекло тщательно перемешивают в течение 4—6 час. Спустя два часа после добавки вновь берут контрольные пробы.

После окончания осветления температуру печи снижают. Постепенно уменьшают скорость перемешивания стекла, сводя ее к нулю. После того как вязкость расплава достигает консистенции густой патоки, горшок со стеклом вывозят из печи и медленно студят.

Медленное охлаждение стекла совершенно необходимо для получения достаточно отожденного стекла. Если расплавленное стекло быстро охладить до твердого состояния, получается закаленное стекло, легко трескающееся при нанесении на нем царапин, при ударе, при незначительном нагревании, а часто и самопроизвольно растрескивающееся на отдельные куски. Оптические постоянные такого стекла отличны от оптических постоянных медленно охлажденных стекол. Только при медленном охлаждении стекла, или, правильнее, при медленном прохождении области температур, в которой стекло переходит из вязкого в хрупко-твердое состояние (450—600°), можно получить стекло с нормальными механическими свойствами. Процесс медленного охлаждения стекла называют отжигом (см. дальше).

* Часто в качестве исправляющей добавки пользуются суриком.

Для того, чтобы стекло медленнее охлаждалось, горшок покрывают кожухом без дна и верха (высокий железный пояс) и засыпают песком. Студка стекла продолжается около 5 дней. При охлаждении стекло и горшок трескаются.

При ударе по остывшему горшку кувалдой стекло распадается на несколько больших кусков неправильной формы весом от 30 до 80 кг и на более мелкие куски.

в) Замечания о вязкости и кристаллизационной способности стекол

В процессе варки и студки стекла большое значение имеют два важных свойства расплавленной стекломассы — вязкость и кристаллизационная способность ее.

При сообщении скорости некоторому слою внутри жидкости вместе с ним начинают увлекаться и соседние слои. Скорость движения последних постепенно уменьшается по мере удаления от слоя, которому сообщено первоначальное движение. Силу, приводящую в движение соседние слои, называют внутренним трением, или вязкостью жидкости. Эта сила f между двумя соседними параллельными слоями пропорциональна площади s соприкосновения слоев и градиенту скорости $\frac{dv}{dx}$,

т. е.

$$f = \eta s \frac{dv}{dx}.$$

Коэффициент пропорциональности η называют коэффициентом внутреннего трения жидкости. Единицей для измерения вязкости служит пуаз. Для воды величина вязкости при температуре 20° С равна 0,01 пуаз.

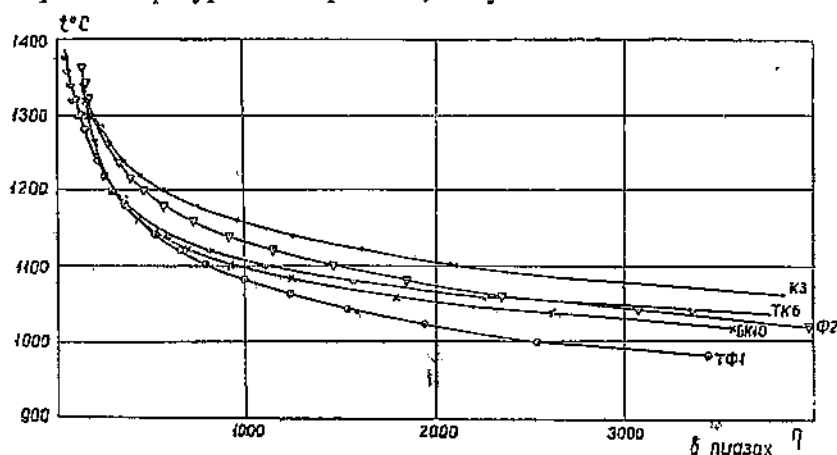


Рис. 125. Изменение вязкости стекол с температурой:

К — крон; Ф — флинт; ТК — тяжелый крон; БК — баритовый крон; ТФ — тяжелый флинт

Вязкость расплавленного стекла в тысячи раз больше вязкости воды. Поэтому все процессы в расплавленной стекломассе, связанные с перемещением ее отдельных частиц, с диффузией, будут протекать в тысячи раз медленнее, чем то происходило бы в водных растворах или в расплавах с малой вязкостью. К этим процессам относятся: 1) растворение компонентов стекольной шихты, т. е. провар стекла, 2) гомогенизация стекломассы, 3) освобождение ее от пузырей, 4) пресовка стекла, 5) отжиг его, и т. д.

При понижении температуры вязкость стекла постепенно возрастает, и к моменту вывоза горшка из печи она достигает величины 10^4 пуаз. При дальнейшем понижении температуры стекло постепенно переходит в твердое состояние и при вязкости, большей 10^{13} пуаз, приобретает хрупкие свойства. Температура, при которой вязкость стекла равна 10^{13} пуаз, является температурой отжига стекла.

Определенные процессы технологии оптического стекла протекают при определенных значениях вязкости.

Так, например, очистка стекла от пузырей, мешка его и гомогенизация протекают интенсивно, если вязкость стекла не выше 100 пуаз.

Вывоз стекла из печи ведется, как уже сказано, при вязкости 10^4 пуаз, прессовку и моллирование (см. дальше) стекла ведут при вязкости $4 \cdot 10^8$ пуаз, отжиг —



Рис. 126. Расстекловывание, в поверхностном слое горшка



Рис. 127. Расстекловывание в виде сферолитов

при вязкости 10^{13} пуаз. Но вязкость стекломассы⁷ и температурный ход вязкости зависят от состава стекла. Поэтому для различных сортов стекол указанные выше процессы очистки, вывоза, отжига стекла ведутся при различных температурах.

Наиболее легкоплавкими в этом отношении являются тяжелые флинты, баритовые кроны, тяжелые кроны; более вязкими оказываются обычные флинты и кроны (рис. 125).

Кристаллизационная способность стекол. Как известно, при охлаждении расплавленных солей последние кристаллизуются, в расплаве выделяются более или менее правильно оформленные кристаллы. Процесс кристаллизации протекает при определенной температуре. При охлаждении стеклообразного расплава последний густеет, вязкость его постепенно возрастает по мере понижения температуры; расплав, не кристаллизуясь, переходит в твердое состояние.

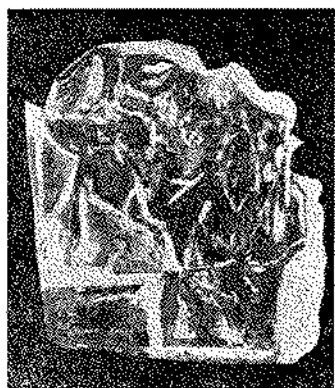


Рис. 128. Поверхностное расстекловывание при отжиге стекла

Однако иногда в процессе охлаждения и особенно при медленном охлаждении стеклообразного расплава в нем либо возникают отдельные кристаллы, либо отдельные закристаллизовавшиеся участки, либо все стекло закристаллизовывается полностью. Кристаллизация является пороком стекла. На рис. 126—130 приводятся различные типы кристаллизации стекол. Как видно из этих рисунков, характер кристаллизации весьма разнообразен. Кристаллизационная способность и характер кристаллизации определяются составом стекла и режимом охлаждения расплава.

В оптических стеклах, богатых кремнеземом, полная кристаллизация вызывается обычно выделением кремнекислоты. Полная кристаллизация встречается также и у фтористых кронов. Частичная кристаллизация появляется обычно в процессе моллирования или тонкого отжига и наблюдается обычно на поверхности в виде более или менее толстой корки.

Единичные скопления кристаллов шарообразной формы — сферолиты — в оптических стеклах бывают реже и наблюдаются обычно в баритовых флинтах и кронах.

г) Горячая обработка оптического стекла

Получающиеся при развалке горшка бесформенные куски стекла подвергаются первой браковке: большие куски разбивают и из них отбирают куски бесвильные, беспузырные, не содержащие посторонних включений. Хорошего стекла при этой первой браковке отбирается от 50 до 70%. В последнее время, благодаря

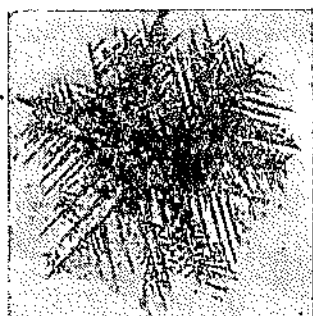


Рис. 129. Большие кристаллы разновидности кремнезема — тридимита

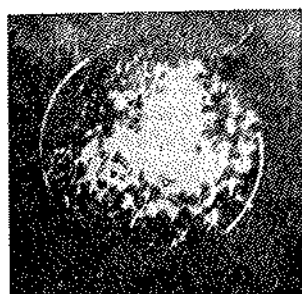


Рис. 130. Заготовка линзы, расстекловывавшаяся при повторном нагревании

введению усовершенствованной скоростной мешки стекла, процент выхода годного стекла возрос, в среднем, до 80—90%.

Так как из бесформенных кусков стекла невыгодно, из-за больших отходов, вырезать отдельные заготовки, стекло предварительно молдируется. Этот процесс заключается в том, что куски стекла вновь нагревают до температуры размягчения и прессуют стекло в специальных формах (рис. 131). В результате получают куски в виде правильных прямоугольных параллелепипедов или тонких 10—12-мм блинов-плюшек. Смоллированное или отплющенное стекло шлифуется и споллировывается с двух противоположных сторон и вновь бракуется на свили и пузыри.

Затем отобранное стекло поступает в разметку и нарезку заготовок. Заготовки обдираются под требуемый размер, а плющенное стекло поступает на прессование. Прессование имеет целью придать заготовке грубую форму будущей детали (линзы, призмы). Перед прессовкой плюшки разрезаются на куски определенного веса (вес будущей необработанной детали). Нарезанные кусочки разогреваются в печи до размягчения и затем в горячем виде прессуются на специальных станках (рис. 132).

Наконец, заготовки стекла в виде прямоугольных кусков и прессовки поступают на отжиг.

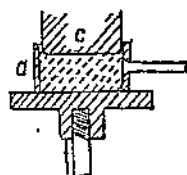


Рис. 131. Моллирование стекла в форме:

a — форма; c — лунсон

д) Отжиг оптического стекла

Последней операцией, которой подвергается готовая прессовка или заготовка, является отжиг. В отжиге стекло нагревается до температуры несколько более низкой, чем температура размягчения, и выдерживается при этой температуре отжига. При этом происходит выравнивание имеющихся в стекле неоднородностей и натяжений, вызванных неравномерностью предыдущих тепловых обработок. Время выдерживания тем больше, чем больше отжигаемое стекло. Для мелких прессовок оно может не превышать часа, для больших астродисков оно достигает 2—3 месяцев. Температура отжига для разных сортов стекла колеблется в пределах от 450 до 650°. После выдерживания стекло медленно охлаждается так, чтобы градиенты температуры, неизбежно возникающие в стекле при охлаждении, были

очень малы и не вызвали появления заметных неоднородностей. Поэтому чем крупнее изделие, тем медленнее приходится его охлаждать.

Отжиг оптического стекла производится в специальных электропечах, отличающихся весьма однородной температурой, и является весьма ответственной частью технологического процесса. Главным видом брака по отжигу является неоднородность.

§ 4. Влияние на показатель преломления температуры и тепловой обработки

При нагревании стекла в пределах до 100°C показатель преломления его возрастает по линейному закону. При дальнейшем нагревании увеличение показателя преломления сопровождается рядом аномалий. Это — небольшие незакономерные изменения показателя преломления, измеряемые единицами 5-го знака и наблюдающиеся в определенных сортах стекла в некоторых узких интервалах температур; наблю-

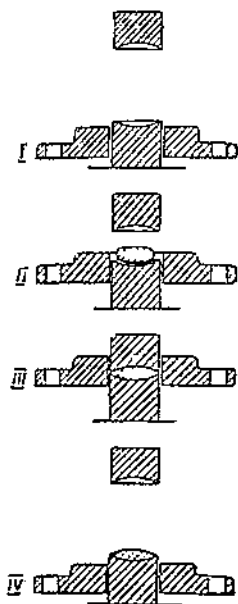
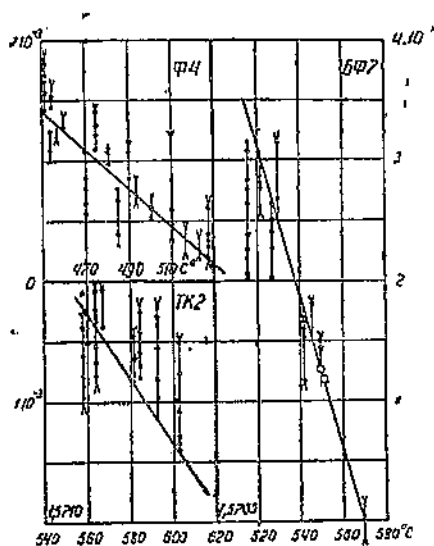


Рис. 132. Схема прессования линзы;
I, II, III, IV — последовательные стадии работы



всему отжигаемому куску стекла, то в разных участках оно будет стремиться к различным показателям преломления и после отжига окажется оптически неоднородным.

§ 5. Холодная обработка стекла

Отжигом оканчивается высокотемпературная обработка стекла. Последующая обработка производится при комнатных и близких к комнатным температурах и составляет область холодной обработки стекла. Ею занимаются оптико-механические заводы. Целью холодной обработки стекла является придание заготовке оптического стекла точной формы и размеров оптической детали и сборки из таких деталей определенных узлов оптического прибора (объектив, окуляр).

Оптическое стекло в виде заготовок (прямоугольных кусков) или прессовок проходит на оптико-механическом заводе следующие стадии обработки: распиловка (для заготовок), обдирка под размер, шлифовка, полировка, контроль, чистка, склейка оптической детали, просветление, сборка узла прибора и самого прибора.

Распиловку заготовок производят алмазной пилой. Последняя представляет собою железный диск, края которого имеют насечку, в эту насечку запрессовывается алмазная пыль. Зерна алмаза, выступающие из насечки, создают режущую кромку пилы. При работе диск приводится во вращение со скоростью около 800 об/мин. Под вращающийся диск подается заготовка стекла.

После распиловки нарезанные куски размечаются и режутся роликовым резцом; углы нарезок грубо обламывают щипцами и после этого края заготовок тоже грубо обдирают по кругу. Для этого склеивают несколько заготовок столбиком и получаемый валик обдирают в правильный цилиндр. После этого столбик расклеивают и противоположные поверхности заготовок обдирают под размер. Обдирка ведется на обдирочных станках вручную.



Рис. 135. Чашка и гриб для крепления шлифуемых линзовых заготовок

По окончании обдирки приступают к шлифовке, которая производится на многошпиндельных шлифовальных станках-автоматах (рис. 134).

Схематически процесс работы шлифовального станка сводится к следующему. Подлежащий обработке образец стекла крепится на шайбе или специальной державке. Шайба или державка стороною, на которой закреплено стекло, накладывается на шлифовальник, смоченный взвесью абразива в воде, и поджимается к шлифовальнику грузом.

Шлифовальник приводится в быстрое вращательное движение. Державка со стеклом при этом специальной системой рычагов получает дополнительное качательное движение в плоскости шлифовальника. При относительном движении шлифовальника и образца абразив закалывает и обдирает обрабатываемую поверхность стекла.

Линзовые (неплоские) заготовки блокируются клеем-замаской (обычно смесь воска с канифолью в отношении 1:6) на специальных чугунных или латунных приспособлениях, имеющих форму гриба (выпуклые линзы) или чашки (вогнутые линзы). При этом радиус кривизны будущих линз задается кривизною гриба или чашки (рис. 135).

Грубую обдирку блока ведут песком или карборундом на чугунных шлифо-

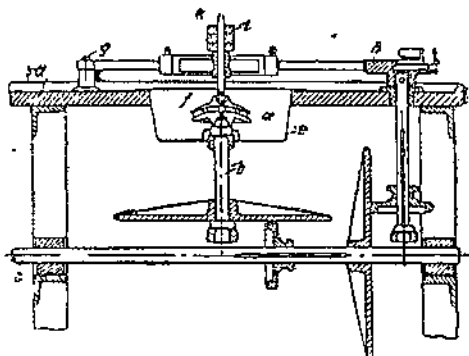


Рис. 134. Схема шлифовально-полировального станка:

а — выпуклый шлифовальник (гриб); *б* — ось; *в* — чашка, свободно соединена с осью *к*; *г* — груз; *д* — эксцентрик; *е* — рычаг, свободно откидывающийся вверх; *ж* — груз; движение рычага производится через эксцентрик *з*; *и* — ось, на которой вращается шлифовальник

шальниках, форма которых соответствует форме державки — чашки или гриба. При шлифовке плоскостей пользуются плоскими шлифовальными шайбами.

Шлифовку производят наждаками различной крупности зерен, вначале шлифуют крупным наждаком, потом переходят к более мелкому, заканчивают шлифовку наиболее мелким наждаком. При шлифовке наждаками пользуются обычно латунными шлифовальниками. По окончании шлифовки блок с образцами промывается, тогда приступают к полировке.

Полировка производится на таких же станках-автоматах, на смоляных (смола — смесь канифоли и вара, нанесенная на металлический шлифовальник соответствующей формы) полировальниках. Абразивом при полировке служит обычно тонкий порошок крокуса (прокаленная красная окись железа). После окончания полировки детали снимаются с державки, переворачиваются и вновь наклеиваются для обработки противоположной стороны линзы.

Скорость шлифовки и полировки стекла зависит от размеров изделия, сорта стекла, доброкачественности абразива, температуры и других факторов.

Скорость шлифовки стекол определяется прежде всего твердостью их. Можно характеризовать твердость стекла скоростью шлифовки его (табл. 8, последний столбец). Известно, что при прочих равных условиях скорость шлифования уменьшается при увеличении в стекле содержания кремнезема, и, наоборот, скорость шлифования возрастает при увеличении содержания в стекле окислов бора, бария и свинца.

Если скорость шлифования крона (сорт К8) принять за единицу, тогда для других оптических стекол будем иметь следующий ряд:

Кроны	1 — 1,25
Баритовые кроны	1,7 — 2,0
Баритовые флинты	2,0 — 2,2
Легкие флинты	2,0 — 2,2
Тяжелые кроны	2,2 — 2,4
Флинты	2,4 — 2,5
Тяжелые флинты	2,5 — 2,9

Процессы резания и шлифовки стекла не могут рассматриваться как чисто механические, в них значительную роль играют химические процессы: процессы взаимодействия воды со свежееобразующейся поверхностью стекла в трещинах и изломах.

С этой точки зрения процессы резания и шлифовки могут быть представлены следующим образом. Поверхность стекла в области свежей царапины или трещины взаимодействует с водой, в результате чего создается пленка набухшего стекла (гель кремневой кислоты), имеющая больший объем, чем объем стекла, из которого она образовалась. В результате в трещине создаются расклинивающие усилия, увеличивающие глубину ее и таким образом способствующие разрушению поверхности стекла. Такую же важную роль играют химические процессы при полировке стекла.

Согласно теории академика И. В. Гребенщикова, на свежей поверхности стекла создается пленка коллоидной кремневой кислоты, в процессе полировки абразив (крокус) сдирает эту пленку, вскрытая свежая поверхность стекла взаимодействует с водой, в результате чего вновь образуется пленка кремнекислоты, она вновь сдирается полировальником и т. д.

Обработка оптических деталей представляет собою область точной механики. Достаточно сказать, что рабочий-оптик должен оценивать величину в 0,00002 мм, т. е. величину примерно в 500 раз меньшую той, с которой обычно имеет дело механик, работающий с механическими измерителями.

Процессы холодной обработки стекла требуют особой тщательности и аккуратности при их выполнении. Малейшие случайные загрязнения абразивов, смешение различных номеров наждаков, пыль — совершенно недопустимы в оптическом цехе, так как наличие указанных загрязнений неминуемо ведет к образованию царапин и заколов на обрабатываемой поверхности детали, — к браку.

Состояние поверхности полированной оптической детали, точность, с которой она получена в отношении заданного радиуса кривизны, определяет собою и качество будущего прибора. Поэтому процессы холодной обработки стекла являются ответственной операцией в оптическом производстве. Понятно, что вопросам контроля здесь уделяется особое внимание.

Поступившая в контрольный пункт деталь просматривается в отношении качества полировки — отсутствия царапин, недополировки, точек, пятен [и т. д.]

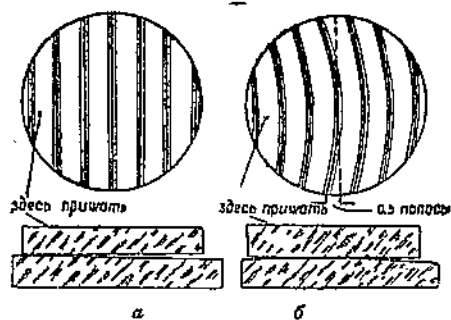


Рис. 136. Испытание качества полированной поверхности пробным стеклом



Рис. 137. Испытание качества полированной поверхности пробным стеклом

Далее определяется качество поверхности детали в смысле заданного радиуса кривизны и отступлений от сферы или плоскости.

Расчет оптической системы требует, чтобы радиусы кривизны поверхностей изготавливались с точностью до 0,1%. Контрольные измерения делаются с помощью пробных эталонных стекол или на сферометрах.

Проверка пробным стеклом производится следующим образом. На контролируруемую, тщательно очищенную от пыли поверхность накладывается такое же чистое пробное стекло, один конец стекла придавливается пальцем к детали и по интерференционной картине созданного воздушного клина (рис. 136) определяется качество поверхности.

Если интерференционную картину рассматривать в однородном зеленом свете (ртутная лампа, через зеленый светофильтр), в таком случае расстояние между соседними темными полосами интерференции будет соответствовать разности в толщине клина в этих точках в 0,25 μ . Если полосы интерференции будут представлять группу параллельных прямых, это значит, что между пробным стеклом и промеряемым имеется ровный клин, и, следовательно, промеряемая поверхность представляет собою плоскость (рис. 136 а).

Если, как это видно на рис. 136 б, интерференционные полосы изогнуты в виде дуги, то промеряемая поверхность будет бугор или яма. При этом, если полосы обращены выпуклостью к тому месту пробного стекла, на которое был сделан нажим пальцем, то в центре имеется яма; если полосы обращены к месту нажима вогнутостью, — в центре бугор.

Величину ямы и бугра определяют крутизной полос. Например, на рис. 136 б видно, что между центром и краем интерференционной картины имеется разность в половину полосы. Следовательно, величина клина в центре меньше на 0,125 μ (см. выше), чем по краю стекла, — значит в центре бугор высотой 0,125 μ .

На рис. 137 видно, как с помощью пробного стекла выявляются и более сложные недостатки поверхности.

Здесь были рассмотрены случаи контроля плоскополированной поверхности. Контроль сферических поверхностей эталонными стеклами производится таким же образом.

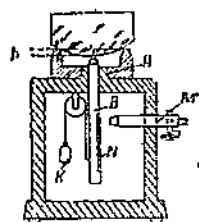


Рис. 138. Схема кольцевого сферометра Бамберга

На рис. 138 дается схема кольцевого сферометра Бамберга. Исследуемый образец x накладывается на кольцо A . Стержень B с помощью груза K опирается в исследуемое стекло с определенной силой. С помощью шкалы N и короткофокусного микроскопа M определяется положение стержня B . При измерении радиуса кривизны стекла первый отсчет производится по плоскому стеклу, второй — по измеряемому. Из разности находят высоту h сегмента линзы (рис. 138) и далее радиус кривизны по формуле

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2},$$

где r — кольцо сферометра.

При измерении призм ответственное значение имеет точность изготовления углов и отсутствие пирамидальности призмы. Контрольные измерения углов и пирамидальности производятся на гониометрах или, что проще, методом сравнения изготовленного угла с калибровочным эталонным углом, с помощью автоколлимационной трубы.

Центрировка. Отшлифованные и прополированные линзы должны быть отцентрированы, чем достигается совмещение линий центров обеих ограничивающих сферических поверхностей линзы (оптической оси линзы) с центральной линией относительно краев линзы.

Для этого линза наклеивается смолой на трубку, сидящую на оси шпинделя так, чтобы оптическая ось линзы совпала с осью вращения шпинделя. Для достижения этого поступают следующим образом. Приводят шпиндель с линзой во вращение и наблюдают за отраженным от внешней поверхности линзы изображением какого-либо отчетливо видимого предмета (например, освещенного окна). При совпадении оптической оси линзы с осью вращения шпинделя изображение остается неподвижным.

В противном случае слегка подогревают трубку, на которой сидит линза, до размягчения замазки и осторожно исправляют положение линзы. Установив правильно линзу, края ее подшлифовывают; таким путем осуществляется центрировка линзы.

§ 6. Цветное стекло

Окраска стекла обусловлена наличием в стекле красящих компонентов, присутствующих в стекле, как правило, в сравнительно небольших концентрациях (0,07—4%).

Красящие компоненты могут находиться в стекле либо молекулярно растворенными, либо в коллоидном состоянии, т. е. в виде отдельных частиц, построенных из большого числа простых атомов или молекул.

К первым относятся окислы или соли некоторых тяжелых металлов — меди, кобальта, никеля, железа, хрома, марганца, урана, ванадия, титана, вольфрама, молибдена и т. д. К группе коллоидно окрашенных стекол принадлежат золотой и медный рубины, окрашенные большим количеством ничтожно малых частиц золота и меди; серебряные желтые стекла, окрашенные мельчайшими частицами серебра; селеновый рубин, окрашенный коллоидными селенистым и сернистым кадмием.

Производство цветных оптических стекол технологически мало отличается от производства простого оптического стекла. Красители вносятся в шихту и тщательно перемешиваются с остальными ингредиентами. Шихта подвергается нормальному процессу варки. Стекла, окрашенные коллоидными красителями, в процессе варки не приобретают должной окраски, а, будучи более или менее быстро охлаждены, оказываются вообще бесцветными. Для того, чтобы они получили необходимую окраску, их приходится вновь нагревать до определенной температуры и выдерживать при этой температуре. Этот процесс называют наводкой.

Окраска стекла определяется природой красителя и составом основного стекла. В подавляющем большинстве случаев в качестве основного стекла используются известково-натриево-силикатные стекла.

Таблица 15

Химический состав некоторых окрашенных стекол (в весовых %)

Окраска стекла	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	BaO	ZnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Sb ₂ O ₃	CuO	NiO	CaS		Se	S	SnO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CoO	Область применения
															в шихте	Сu							
Медный рубин	73,0	—	—	—	—	10,5	—	—	16,5	—	—	—	—	—	0,25	—	—	—	0,5	—	—	—	Сигнальное стекло
Селеновый рубин	66,7	—	—	—	12,0	2,1	0,2	0,5	15,5	2,0	—	—	—	—	—	> 2	> 0,5	—	—	—	—	—	"
" "	66,3	13,7	—	—	11,1	0,3	0,2	—	7,8	—	—	—	—	—	—	"	"	—	0,2	—	—	—	Линзы Френеля
" "	50	2	—	—	25	—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	"	"	—	—	—	—	—	Светофильтры для оптических приборов
" "	60,5	2,0	—	—	12,7	—	—	12,7	9,7	—	—	0,1	—	—	—	1,7	0,6	—	—	—	—	—	Светофильтры
Светлокрасное кад- мий-селеновое	72,6	—	—	—	10,1	—	—	4,8	12,5	—	—	—	—	—	—	> 2	> 0,5	—	—	—	—	—	Сигнальное декора- тивное
Желтое стекло	62,0	3,9	—	—	—	14,5	—	17,2	1,8	—	—	—	—	—	—	"	"	—	—	—	—	—	Фотографические светофильтры
" "	63,5	—	3,3	17,0	—	0,5	—	1,0	14,7	—	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—	Линзы Френеля
Зеленое стекло	72,5	—	0,9	—	—	5,5	—	—	16,0	—	3,5	—	1,2	—	—	—	—	—	—	0,5	—	—	Линзы Френеля
" "	72,0	—	—	—	—	10,0	—	0,5	15,5	—	—	—	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Сигнальное
Светлозеленое тепло- защитное	70,0	8,0	—	3,0	9,0	—	—	—	6,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25	—	1,35	—	Светофильтры для инфракрасных лучей
Синее стекло	68	23	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	NaCl	0,2	
Фиолетовое стекло . .	72	4	—	—	—	4	—	16	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	

Ниже дается цветовая характеристика для некоторых наиболее употребительных красителей.

Соединения кобальта. В стеклах кобальт присутствует в виде закисной формы CoO . Стекла, окрашенные кобальтом, хорошо пропускают фиолетовые и синие лучи, а также крайние красные, и имеют синий или фиолетовый цвет (см. кривую поглощения на рис. 139). Кобальтовое стекло используется в качестве синих светофильтров, а также и для декоративных целей.

Соединения никеля. В стекле никель присутствует в виде закисных соединений (NiO). Кривые поглощения никелевых соединений весьма сильно зависят от

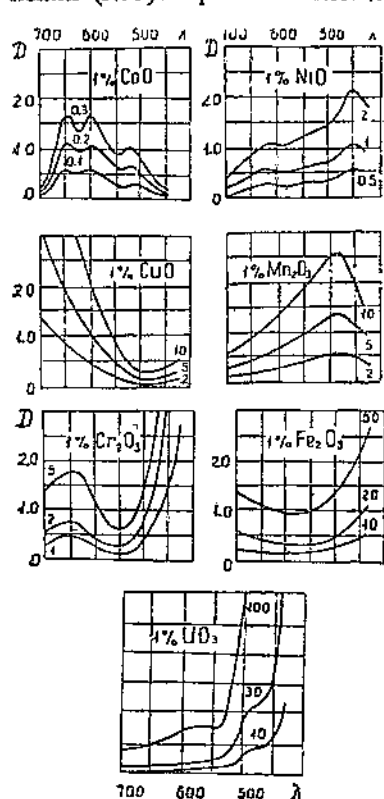


Рис. 139. Кривые оптической плотности (D) (см. I, гл. 4, § 1) стекла состава SiO_2 —71,2%, CaO —12,5%, Na_2O —16,0%, окрашенного 1% различных красителей. Толщина образцов дана в мм возле каждой кривой

состава стекла. Никелевые стекла сильно поглощают в инфракрасной части спектра (рис. 139) и, напротив, слабо в ультрафиолетовой. Закись никеля применяется для изготовления фиолетовых стекол, темных светофильтров, пропускающих ультрафиолетовую область спектра, и светофильтров для сварщиков, поглощающих тепловые лучи.

Соединения меди. Медь в стеклах существует в виде закисных и окисных соединений. Стекла, содержащие только закись, бесцветны; стекла с окисью меди окрашены в голубой или зеленый цвет. Окись меди является хорошим поглотителем красных лучей. Она применяется при производстве голубых и зеленых сигнальных стекол, фильтров „дневного света“, приближающих спектральную кривую излучения ламп накаливания к спектральной кривой дневного света (рис. 139).

Соединения марганца. В стеклах марганца присутствует в виде окиси марганца Mn_2O_3 , окрашивающей стекла в фиолетово-пурпурный цвет, или в виде закиси MnO , стекла почти не окрашивающей. Марганцевые стекла обладают большой прозрачностью для инфракрасных лучей. При большом содержании марганца стекла оказываются почти непрозрачными для видимой части спектра (рис. 139).

Соединения хрома существуют в стекле в виде окиси и окрашивают стекло в зеленый цвет. Стекла, содержащие хром, благодаря большому поглощению ими фиолетовых и ультрафиолетовых лучей, применяются для изготовления защитных очков (рис. 139).

Соединения железа существуют в стекле в закисной FeO и окисной (Fe_2O_3) формах; обычно присутствуют обе формы. Окись железа окрашивает стекло в коричнево-желтый (рис. 139), закись — в голубоватый цвет. Закись железа в стекле весьма сильно поглощает инфракрасные лучи. Окись железа их не поглощает. Окись железа интенсивно поглощает ультрафиолетовые лучи, наоборот, закись железа такие лучи поглощает слабо.

Стекла, содержащие закись железа, благодаря их прозрачности в видимой части спектра и большому поглощению инфракрасной части, используются в качестве теплозащитных светофильтров.

Окись урана UO_3 окрашивает стекло в желтый цвет с яркозеленой флюоресценцией. Уран применяется для изготовления флюоресцирующих экранов и для изготовления фильтров, поглощающих ультрафиолетовые лучи (рис. 139).

Среди стекол, окрашенных коллоидными красителями, следует упомянуть красный медный рубин. Стекло, содержащее элементарную медь, при быстром

охлаждении оказывается обычно бесцветным. Красное окрашивание появляется лишь при повторном нагревании стекла до температуры, близкой к размягчению. Коллоидная медь обладает большой красящей силой; вследствие этого медный рубин редко используется в изделиях со сплошной краской, а применяется, главным образом, как накладное стекло (0,1—0,2 мм). В инфракрасной части спектра медный рубин обладает малым поглощением, ультрафиолетовые лучи поглощает полностью.

Применяется медный рубин для изготовления красных светофильтров — сигнальные огни железнодорожного и водного транспорта.

Другим примером стекол, окрашенных коллоидными красителями, являются селеновый рубин и кадмиевое желтое стекло. Эти стекла получают при введении в шихту стекла селена и сернистого кадмия. Красящим веществом в этих стеклах являются коллоидные частицы, состоящие из CdS и $CdSe$. При этом в зависимости от содержания CdS и $CdSe$ окраска этого состава может меняться от желтой в оранжево-красную и рубиновую.

Процентный состав коллоидных частиц		Цвет стекла
CdS	$CdSe$	
100	0	Желтый
75	25	Оранжевый
40	60	Красный
10	90	Рубиновый

Эти стекла применяются для изготовления красных, оранжевых и желтых светофильтров (см. II, гл. 4, § 4).

Стекла, окрашенные в массу, изменяют свою спектральную характеристику при изменении температуры. Это явление хорошо заметно на стеклах, окрашенных селеном и сернистым кадмием (ЖС, ОС и КС). Стекла указанных марок имеют крутую границу поглощения (см. II, гл. 4, § 7); при изменении температуры на 10° эта граница перемещается примерно на $\Delta\lambda = 2m\mu$, двигаясь при понижении температуры в коротковолновую часть спектра.

В табл. 15 приводятся составы некоторых окрашенных стекол.

§ 7. Налеты и чистка оптических деталей

На поверхности оптических деталей, поступающих в сборочный цех, можно обнаружить загрязнения разнообразного происхождения и формы. Тут могут быть мельчайшие твердые частички — металлические стружки, осыпка с металлических деталей, волоски, кусочки смазки и замазки, жирные следы пальцев и т. д.

Поэтому, прежде чем собирать из деталей прибор, оптику этих деталей необходимо подвергнуть тщательной очистке.

Опыт показал, что только рациональные приемы чистки деталей могут обеспечить требуемую чистоту их.

Особенно опасными загрязнениями являются жиры (смазки, замазки, пот рук, масла и т. п.). Капелька жира, нанесенная на поверхность стекла и далее удаленная с поверхности чистой ваткой или тряпочкой, не оставляет на поверхности стекла видимого загрязнения. Однако спустя несколько часов или дней, а иногда недель и месяцев, под влиянием влаги воздуха часто на поверхности стекла появляются мельчайшие, едва заметные капельки жира. Капли жира со временем увеличиваются в объеме, налет постепенно заражает поверхность стекла. Этот вид загрязнений поверхности стекла называют капельным жировым налетом.

Загрязнение поверхности стекла жиром может происходить в процессе сборки прибора при употреблении смазок (смеси вазелина с минеральными или животными жирами), при зазальцовке линз в оправки, в процессе чистки при пользовании

недостаточно обезжиренными ватой или салфетками; иногда жир может попадать на стекло в результате испарения некоторых составных частей смазок (например, вазелиновое масло) и конденсации их на поверхности стекла.

Единственным способом борьбы с налетами является правильно поставленная чистка оптики. Только полное устранение жира с поверхности детали может гарантировать непоявление жировых налетов в собранном приборе. Жировой налет смывается жидкостями, растворяющими животные и растительные жиры: бензином, спиртом, эфиром, четыреххлористым углеродом, бензолом и т. п.

Чистка оптики — это весьма ответственная операция, требующая неустанного внимания и точного соблюдения технологического процесса. Только тщательно и правильно очищенный прибор может с гарантией выпускаться заводом.

Небрежная чистка всегда чревата возможностью появления во время хранения или эксплуатации прибора налетов на поверхности его оптических деталей.

Чистка производится в специально отведенных помещениях, легко убираемых, где нет пыли. Операция чистки сводится к многократному протиранию поверхности детали ватным тампоном, смоченным смесью петролейного эфира (фракции легкого бензина, кипящие в интервале $40-70^{\circ}\text{C}$) и спирта. Смесь готовится из 80—90% эфира и 20—10% спирта.

При obtiraniy происходит удаление мельчайших пылинок и смывание следов жира с поверхности стекла. Вата для чистки специально обезжиривается. Каждое протирание производится свежим тампоном.

Круглые детали чистятся на моторчике при вращении. Некоторые детали чистятся прополаскиванием в нескольких порциях той же смеси и протираются обезжиренной салфеткой.

О капельных нежировых налетах см. в параграфе о химической стойкости стекла (§ 2).

§ 8. Просветление оптики

Свет, падающий в оптический прибор, частично отражается от поверхности раздела стекло — воздух, частично поглощается стеклом, и только часть света проходит через прибор.

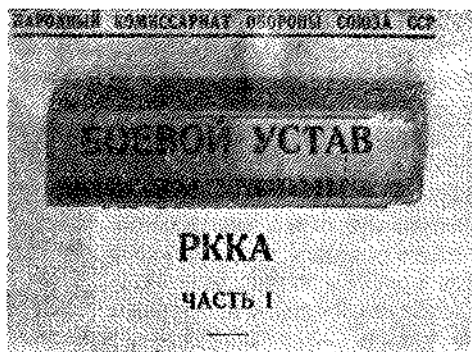
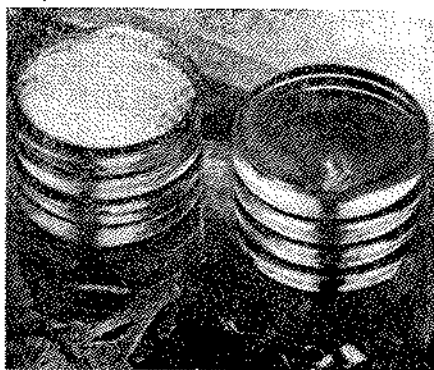


Рис. 140. Влияние снижения коэффициента отражения на пропускание стекол. *а* — две стопки стекол: левая — с обычными поверхностями, правая — с просветленными. *б* — фотография сделана через стопку стекол; поверхности правой части стопки стекол просветлены

Количество света, проходящее через прибор, определяется количеством отражающих поверхностей, составом и качеством стекла, из которого построена оптика прибора.

Как было указано выше (см. I, гл. 1, § 6), существует возможность понижения коэффициента отражения стеклянных поверхностей путем нанесения на поверхности стекла прозрачной пленки с показателем преломления $n_f = \sqrt{n_g}$ (так называемое просветление оптики).

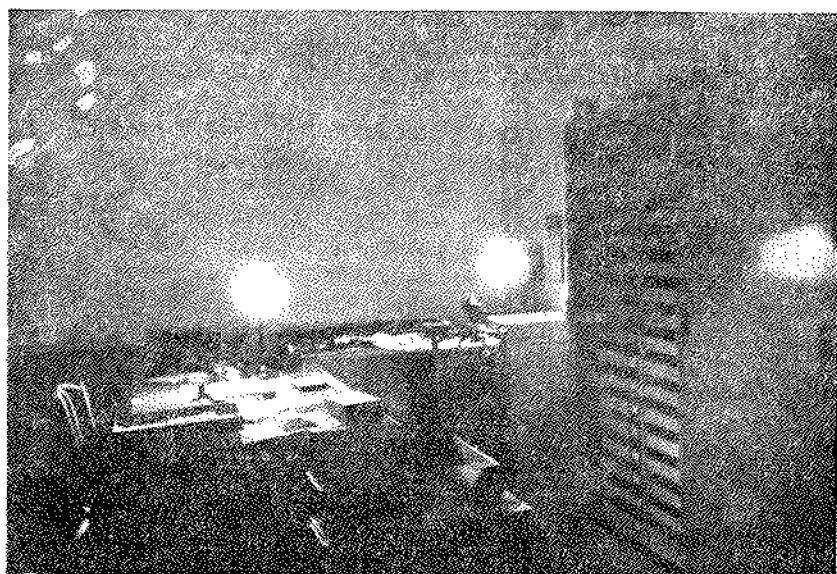
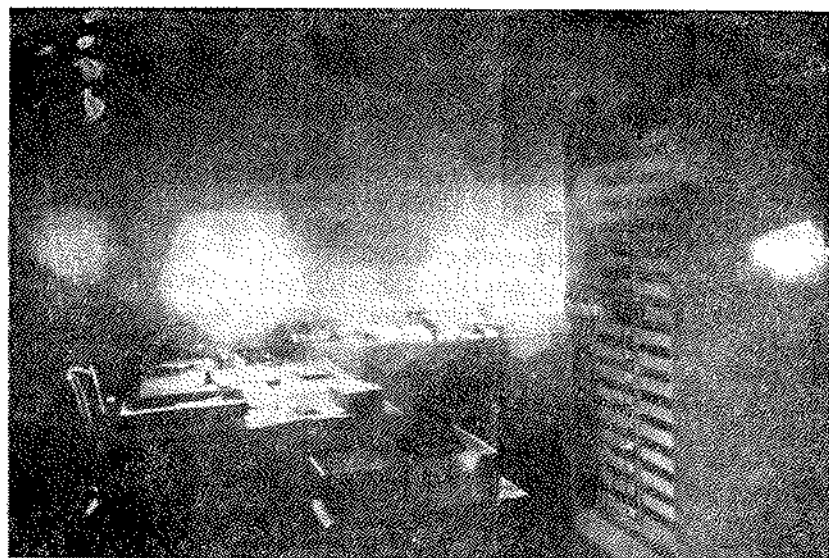


Рис. 141. Противоореальное и контрастирующее действие просветления фотообъектива. Верхняя фотография сделана обычным объективом; нижняя — объективом, линзы которого были просветлены

Практическую ценность снижения коэффициента отражения легко понять по иллюстрациям на рис. 140 и 141. На рис. 140 а сфотографированы две стопки стекол: левая — с обычными поверхностями, правая — с поверхностями со сниженным коэффициентом отражения — с просветленными поверхностями. На рис. 140 б дана фотография через стопку стекол, правые половинки которых были просветлены. На рис. 141 приводятся фотографии, сделанные нижняя обыч-

ным объективом, верхняя — объективом, собранным из линз со сниженными коэффициентами отражения (из просветленных линз).

Из рисунка ясно видно противоореольное и контрастирующее действие просветленного объектива. (О просветлении фотообъективов см. ниже IV, гл. 12, § 3.)

Возможность снижения коэффициента отражения путем нанесения пленок была известна давно, однако широкое практическое применение ее было осуществлено только примерно 10 лет назад благодаря работам академика А. А. Лебедева и, особенно, академика И. В. Гребенщикова.

Согласно теории И. В. Гребенщикова, на поверхности силикатных стекол имеется пленка кремневой кислоты, образовавшаяся в результате взаимодействия стекла с водой или влагой воздуха. (См. выше § 5.) Известно, что показатель преломления такой пленки близок к показателю преломления кварцевого стекла, т. е. имеет величину порядка 1,44—1,46. Показатели преломления стекол всегда больше этой величины. Таким образом, стекло оказывается покрытым пленкой с показателем преломления, меньшим показателя преломления стекла. Если толщину такой пленки сделать равной $\frac{1}{4}$, то, согласно ранее сказанному, значительно снизится коэффициент отражения стекла, и тем больше, чем больше показатель преломления самого стекла.

На основании этого академиком И. В. Гребенщиковым был разработан весьма простой метод снижения коэффициента отражения стекол.

Образование кремнеземной пленки, толщиной в четверть длины волны, по методу И. В. Гребенщикова осуществляется путем обработки стекла 0,5%-ным водным раствором уксусной кислоты. Для различных сортов стекол длительность такой обработки неодинакова. Для одних сортов достаточно пребывания в кислоте в течение нескольких минут, в то время как другие сорта в тех же условиях прорабатываются в течение нескольких дней.

Практически просветление деталей осуществляется по следующей схеме:

1. Подготовка деталей, заключающаяся в обработке их водным щелочным раствором. Эта операция преследует устранения случайной пленки на поверхности детали, образовавшейся при взаимодействии стекла с водой в процессе полировки детали.

2. Обработка детали в 0,5%-ной уксусной кислоте по определенному для каждого сорта стекла режиму (время и температура), с целью получения пленки нужной толщины.

3. Промывка деталей от уксусной кислоты и сушка их.

В результате такой обработки на поверхности стекла создается ирризирующая механически прочная пленка кремнезема, имеющая в отраженном свете фиолетово-коричневую окраску. В табл. 16 указано, как снижаются коэффициенты отражения для основных сортов оптического стекла при обработке их растворами уксусной кислоты.

Другой прием снижения коэффициента отражения стекол, также созданный работами И. В. Гребенщикова с сотрудниками, сводится к нанесению кремнеземной пленки на поверхность детали извне, а не путем разрушения самого стекла.

Для этого на поверхность детали наносится несколько капель 7,5—10%-ного раствора кремнеэтилового эфира (тетраэтоксимоносилана) в спирту. Особым приемом каплю заставляют быстро растечься по поверхности детали ровным тонким слоем. Спирт при этом испаряется, а кремнеэтиловый эфир вступает во взаимодействие с влагой воздуха, гидролизуется, и в результате этой реакции на поверхности стекла остается тонкая пленка кремнезема. Эта пленка прочно сцепляется с поверхностью стекла. Величина снижения коэффициента отражения с помощью такой пленки такая же, как и в случае пленки, образованной разрушением стекла кислотой (табл. 16).

Оба указанных метода получили название химических методов просветления оптики.

Выше указывалось, что эффект снижения тем выше, чем меньше показатель преломления пленки и чем выше показатель преломления стекла. На стеклах с большим показателем преломления кремнеземная пленка оказывает относительно

большее влияние, нежели на стеклах с малым показателем преломления. Пленки с меньшим показателем преломления, чем у кремнезема, могут быть получены путем конденсации на поверхности стекла паров некоторых солей, преимущественно фторидов, обладающих низким показателем преломления.

Таблица 16
Снижение коэффициента отражения стекол химическими методами

Сорт стекла	n_D	Коэффициент отражения (в %)		
		до обработки	после обработки раствором кислоты	после нанесения пленки из 5%-ного спиртового раствора кремнезидового аэра
Кроны				
КЗ	1,5100	4,12	2,5	2,5
К8	1,5163	4,21	2,2	2,1
Баритовые кроны				
БКЗ	1,5183	4,3	2,8	2,3
БК8	1,5467	4,6	2,12	2,1
БК10	1,5688	4,9	1,8	1,9
Баритовые флинт				
БФ7	1,5795	5,04	1,9	1,9
БФ12	1,6259	5,68	1,5	1,5—1,9
Легкие флинт				
ЛФ5	1,5749	4,97	1,73	1,9
ЛФ6	1,5783	5,03	1,8	2,1
Тяжелые кроны				
ТК5	1,6126	5,50	1,4	1,8
ТК8	1,6140	5,29	2,0	1,9
Флинт				
Ф1	1,6128	5,50	1,6	1,6
Ф3	1,6199	5,59	1,7	1,7
Тяжелые флинт				
ТФ1	1,6475	5,98	1,2	1,4
ТФ3	1,7172	6,78	1,1	1,9

Таблица 17
Снижение коэффициента отражения стекол физическим методом (пленки фторидов магния и кальция)

Сорт стекла	n_D	Коэффициент отражения (в %)	
		до обработки	после нанесения пленки фторидов
К8	1,5163	4,21	0,3
БК10	1,5688	4,9	0,1
БФ12	1,6259	5,68	0,3
ЛФ5	1,5749	4,97	0,5
ТК6	1,6126	5,50	0,4
ТФ3	1,7172	6,78	0,1

Нанесение пленки фторидов на поверхность детали производится следующим образом. В безвоздушной среде на очень маленькой вольфрамовой спирали, накаливаемой до температуры около 2000°, испаряют кристаллик фторида магния или кальция. В этом же пространстве помещают обрабатываемую оптическую

деталь. Пары фторида конденсируются на поверхности холодной детали и образуют на ней тонкую пленку.

При толщине пленки в $\lambda/4$ последняя должна быть окрашена в отраженном свете в фиолетово-коричневый цвет. В табл. 17 приводятся данные по снижению коэффициента отражения пленками фторидов магния и кальция. Этот метод снижения коэффициента отражения получил название физического метода просветления оптики.

Пленки солей, полученные испарением, механически непрочны, легко стираются, и в этом отношении они отличаются от прочных кремнеземных пленок.

Поверхности, просветленные физическим методом, нельзя протирать. Поэтому внешние поверхности оптики приборов физическим методом не просветляются. Просветление физическим методом ведется в сборочных цехах непосредственно после чистки деталей. Детали, просветленные с помощью кремнеземной пленки, чистятся нормальным путем (см. выше).

§ 9. Изготовление сеток

Во многих оптических приборах в фокальной плоскости помещается важная оптическая деталь — сетка, которая должна изготавливаться с большой точностью.

Существует несколько способов точного изготовления сеток*: а) механический — с помощью делительных и гравировальных машин, б) фотографический — на специальных фотографических эмульсиях и в) смешанный.

Травленные сетки готовятся следующим образом. На плоскопараллельную пластинку наносится слой воска или лака, устойчивых против действия плавиковой кислоты. Далее на этом слое выгравировывается стальным резцом (на специальных делительных машинах — пантографах) требуемая сетка или шкала. После этого выгравированная часть сетки смачивается с помощью ватного тампона плавиковой кислотой (50—70%-ная фтористо-водородная кислота) или погружается в эту кислоту, или сетка травится в парах фтористого водорода. Травление в кислоте длится несколько секунд. Затем воск смывается бензином. В протравленные штрихи вносятся „запуск“ — краска (свинцовые белила, сажа, окись цинка, серноокислый барий), приготовленная на олифе или жидком стекле.

Так как стеклянная пластинка, на которой нанесена сетка, расположена в фокальной плоскости, к ней предъявляются особые требования в отношении качества стекла и чистоты полировки пластинки. Стекло, применяемое для сеток, не должно содержать пузырей или других видимых дефектов, поверхность стекла должна быть хорошо прополированной, совершенно чистой, стекло должно быть химически устойчивым — не должно лопаться (см. стр. 125).

Необходимо, далее, чтобы стекло хорошо травилось — давало бы ровный, без растравок штрих, в котором прочно держался бы запуск. Оказывается, что этим качествам наиболее удовлетворяют ~~баритовые кроны~~ (стекла БК9 и БК10).

Хорошо протравленная сетка должна иметь ровный, без перерывов, штрих, чистые перекрестия и равномерно внесенный запуск.

§ 10. Склейка оптических деталей

Во всяком оптическом приборе насчитывается несколько линз. Поверхности этих линз отражают значительное количество падающего в прибор света. Если обозначить число отражающих поверхностей прибора через N и показатель преломления стекла через n , тогда прошедший световой поток F рассчитывается по формуле

$$F = \left[\frac{4n}{(n+1)^2} \right]^N;$$

так, например, в приборе из 7 линз, построенных из стекла с $n = 1,5$, через прибор пройдет только 56,5% света.

* Подробнее см. в книге Бурмистрова „Точная фотография“, ГИОП, М. — Л., 1939.

Чтобы уменьшить потери света при отражении, некоторые линзы склеивают между собою или в некоторых исключительных случаях сажают на оптический контакт.

Склейка линз осуществляется пихтовым бальзамом. Пихтовый бальзам представляет собою продукт специальной переработки (растворение в эфире, промывка водой, сушка и уваривание) пихтовой смолы (живицы).

Оптические свойства — показатель преломления, близкий к показателю преломления стекла, прозрачность бальзама и его вязкие свойства позволяют использовать бальзам для склейки оптики. В зависимости от особенностей склеиваемых деталей и условий эксплуатации прибора, пользуются бальзамами различной вязкости (различной степени уварки). Различают твердые — большой вязкости, средние — средней и мягкие — малой вязкости бальзамы. Наиболее часто склейку производят мягкими бальзамами.

Склейку производят следующим образом. Тщательно очищенные линзы нагревают на электрической плитке до 170° . На поверхность отрицательной линзы наносят каплю нагретого до 140° бальзама и немедленно накладывают сверху вторую (положительную) линзу. Нажимают на верхнюю линзу пробкой и круговым движением добиваются равномерного распределения бальзама по всей поверхности склейки, удаляя пузырьки воздуха и излишек бальзама. Слой бальзама между линзами обыкновенно имеет толщину от 0,01 до 0,04 мм.

По окончании склейки линзы отжигают, т. е. выдерживают их (в строго горизонтальном положении) в течение 4—5 часов при температуре $+50$ — $+54^{\circ}$ и затем медленно и равномерно охлаждают. При отжиге устраняются деформации бальзамного слоя, возникшие в процессе склейки.

Склеенная линза должна быть механически прочна при температурах комнатных и выше до $+40$ — $+50^{\circ}$, т. е. должна обладать термостойкостью.

Заделка клееной линзы в оправу не должна вызывать децентрировку линз при их хранении или нагревании до $+50^{\circ}$. Наиболее термически стойкой оказывается склейка тонким слоем бальзама.

Клееная линза должна обладать морозостойкостью, т. е. выдерживать охлаждение без видимых нарушений слоя бальзама. Нередко обнаруживается при охлаждении клееной линзы до -40 — -60° явление расклейки, состоящее в разрушении слоя бальзама, в появлении в нем трещин, пузырей и точек.

Наиболее морозостойкой оказывается склейка опять-таки тонким слоем мягкого бальзама. Благоприятным фактором, влияющим на морозостойкость бальзама, является добавка в него пластификаторов, увеличивающих пластичность бальзама и уменьшающих его хрупкость. В качестве пластификаторов используется льняное, вазелиновое и ореховое масла.

Склеенная линза должна обладать достаточной механической прочностью. Линза под механическим воздействием оправы не должна претерпевать расклейки или ухудшать качество изображения. Расклейка линзы из-за недостаточной механической прочности склейки обнаруживается обычно в виде своеобразного рисунка дубовых листочков (см. рис. 142). Увеличение механической прочности склейки может быть достигнуто уменьшением слоя бальзама.

Помимо пихтового бальзама, в качестве клеящего вещества в последнее время стали применять искусственно синтезированные органические вещества, обладающие способностью во времени изменять свою вязкость от жидкой глицериновой консистенции до прозрачного твердого стекла.

Одним из таких веществ является так называемый бальзамин. Склейка бальзамином обладает рядом преимуществ: высокая механическая прочность, нерастворимость в бензине (вещество, употребляемое при чистке оптики), высокая термостойкость и морозостойкость. Недостаток бальзамина — большое изменение объема

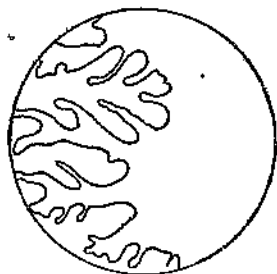


Рис. 142. Расклейка типа дубовых листочков

при затвердевании и связанная с этим деформация внешних поверхностей склеенной линзы.

Кроме пихтового бальзама и бальзамина, в некоторых специальных случаях (например: склейка призм Франка—Риттера, желатиновые светофильтры, поляризаторы и т. п.) пользуются особыми склеивающими веществами (льняное масло, маковое масло, винилит и т. д.).

Склеенная линза проходит следующие стадии контроля:

- 1) на чистоту склейки (отсутствие пылинок, волокон, воздушных пузырьков);
- 2) на чистоту обработанных поверхностей (царапины, точки и т. п.);
- 3) на центричность склейки;
- 4) на качество поверхностей, деформации в слое бальзама или качества изготовления.

§ 11. Серебрение и алюминирование

Во многих оптических приборах для получения отраженных пучков применяют зеркала. При этом наряду с зеркалами, дающими нормальное 90° -ное отражение падающего света, часто применяют так называемые полупрозрачные зеркала с различными коэффициентами отражения.

Для получения равномерного отражения от поверхности стеклянной детали, на последнюю наносят тонкий слой металла (обычно серебра или алюминия). Зеркала могут иметь отражающий слой наружный или внутренний.

В первом случае падающий на зеркало луч отражается металлической поверхностью и сквозь стекло не проходит — стекло играет лишь роль подложки. В зеркалах с внутренней отражающей поверхностью как падающий, так и отраженный лучи проходят сквозь стекло зеркала.

Очевидно, что подготовка стекла для зеркала с наружной отражающей поверхностью проще, чем для зеркала с внутренним отражением, — в первом случае необходимо точно изготовить лишь внешнюю поверхность, ни качество стекла, ни характер обработки остальных поверхностей стекла никакого значения здесь не имеют.

Для зеркала с внутренним отражающим слоем необходимы: 1) стекло оптического качества (без свилей и пузырей) и 2) плоскостность внешней и внутренней сторон зеркала.

Коэффициент отражения серебра немного выше коэффициента отражения алюминия (для Ag — $95,3\%$, для Al — $82,7\%$, для длины волны $\lambda = 589 \text{ м}\mu$). Однако серебряный фильм химически и механически не прочен и во многом уступает в этом отношении алюминиевому фильму. Малейшее прикосновение пальцем к серебряному фильму оставляет на нем незгладные следы. В обычных атмосферных условиях серебряный фильм тускнеет — коэффициент отражения его снижается. Алюминиевый фильм в значительной степени лишен этих недостатков. Кроме того, алюминиевое зеркало лучше выдерживает большие температурные колебания (-150 — $+400^\circ$).

Поэтому зеркало с наружной отражающей поверхностью покрывают алюминием, с внутренней отражающей поверхностью — серебром.

Для получения безукоризненного равномерно отражающего, термически и химически прочного слоя серебра необходимо строгое соблюдение рецептуры и режима серебрения. Перед серебрением серебящиеся поверхности детали должны быть тщательно промыты и обезжирены. Промывание ведется в концентрированной азотной кислоте с последующим промыванием водою, протиркой 20% -ным раствором щелочи и новым ополаскиванием водою. Перед серебрением деталь обрабатывается несколько секунд свежим $0,1\%$ -ным раствором двухлористого олова и вновь промывается. После промывания деталь поступает в серебящий раствор. Последний готовится непосредственно перед серебрением из щелочной аммиачной комплексной соли серебра (растворы азотнокислого серебра + аммиака + едкого калия и раствора инвертированного сахара). Раствор сахара восстанавливает аммиачно-серебряную соль, выделяя металлическое серебро, которое

закрепляется на чистой поверхности стекла. Операцию серебрения повторяют 3—4 раза.

Тонкий ($0,3\text{--}0,5\text{ м}$) слой серебра не является достаточно прочным, легко царапается и подвергается химическому воздействию. Поэтому для упрочнения серебряного фильма на него наносят защитный слой металлической меди. Омеднение производят электролитически. Для этого свежесеребрённую деталь на специальных контактах вносят в кислый 20% -ный раствор медного купороса. Пропускают через раствор ток. Тогда на поверхности серебряного фильма, служащего катодом, выделяется слой меди. Толщина медного слоя $0,8\text{--}1,0\text{ м}$.

После омеднения деталь промывают и сушат. Затем медный фильм покрывают дважды слоем бакелитового лака.

Полученный таким образом серебряный слой оказывается равномерным, непористым (не более 20 пор на 1 дм^2), хорошо защищенным против химического воздействия слоем меди и лака, способным выдерживать достаточные температурные перепады ($-50\text{--}+50^\circ$) и обладает высоким коэффициентом отражения (не менее 80%).

Полупрозрачные серебряные зеркала получают также путем выделения на поверхности стекла серебряного фильма из комплексно-аммиачной соли серебра. Величина коэффициента отражения таких зеркал определяется толщиной серебряного фильма, которая регулируется длительностью процесса серебрения. Тонкий серебряный фильм защищают стеклянной пластинкой, которая приклеивается пихтовым бальзамом или бальзаминном (см. § 10).

Алюминирование производят следующим образом. Деталь, подлежащую алюминированию, тщательно промывают, обеспыливают и помещают под стеклянный колпак. Под колпаком создают вакуум (давление $10^{-4}\text{--}10^{-6}$ мм ртутного столба), а самую деталь при этом нагревают до $300\text{--}400^\circ$. При такой обработке поверхность детали освобождается от окклюдированных газов (обезгаживается), что обеспечивает прочное и равномерное закрепление алюминия. Затем под колпаком в вакууме быстро испаряют алюминий, пары которого конденсируются на поверхности детали в виде равномерного тонкого слоя. Таким образом получают сплошные непрозрачные алюминиевые зеркала.

Для получения полупрозрачного алюминиевого зеркала испарение алюминия необходимо вести медленно, контролируя при этом изменение коэффициента отражения от алюминлируемой поверхности, и в нужный момент заканчивать испарение.

Б. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ОПТИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

Оптическое стекло характеризуется рядом оптических и механических свойств. Первостепенное значение имеют оптические свойства, к первой группе которых относятся так называемые оптические постоянные, а ко второй — поглощение, рассеяние, двойное лучепреломление.

§ 1. Оптические постоянные стекла

Каталог стекол, производимых нашими заводами, содержит 84 сорта стекла, отличающихся по своим оптическим постоянным. Оптические характеристики ряда сортов были приведены выше в табл. 9*. В первом столбце дано наименование сорта, во втором — показатель преломления n_D , в третьем — средняя дисперсия** $n_F - n_C$, где n_F и n_C показатели преломления для волн $\lambda_F = 4861\text{ Å}$ и $\lambda_C = 6563\text{ Å}$; в следующих столбцах приведены частные дисперсии $n_D - n_C$, $n_F - n_D$, $n_{G'}$ — n_F и $n_{G'}$ — n_D , где $n_{G'}$ — показатель преломления для $\lambda_{G'} = 4341\text{ Å}$.

* Стандарт Главного упр. опт.-механ. пром., Ст. 2300005 „Стекло оптическое, классификация и технические условия“, М., 1940.

** См. I, гл. 2, § 3.

Кроме того, в таблице даны: показатель дисперсии или число Аббе $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ и три относительные частные дисперсии: $\frac{n_D - n_C}{n_F - n_C}$, $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$ и $\frac{n_{G'} - n_F}{n_F - n_C}$. Для большей части расчетов этих данных вполне достаточно.

Для более широкого диапазона длин волн в Государственном Оптическом институте измерены с большою точностью дисперсии для 40 сортов стекла.

В табл. 10 были приведены по этим данным показатели преломления для некоторых стекол в интервале от 3800 до 9200 Å, т. е. для фотографической области спектра, в которой стекло прозрачно.

Согласно стандарту, оптическое стекло по своим константам разбивается на ряд категорий. По допускаемым отклонениям показателя преломления n_D стекло разбивается на четыре категории, по допускаемым отклонениям дисперсии $n_F - n_C$ — также на четыре и по дисперсии $n_{G'} - n_D$ — на три категории.

n_D		$n_F - n_C$		$n_{G'} - n_D$	
категория	допускаемые отклонения	категория	допускаемые отклонения	категория	допускаемые отклонения
1	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	1	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	1	$\pm 6 \cdot 10^{-5}$
2	$\pm 7 \cdot 10^{-4}$	2	$\pm 7 \cdot 10^{-5}$	2	$\pm 8 \cdot 10^{-5}$
3	$\pm 10 \cdot 10^{-4}$	3	$\pm 10 \cdot 10^{-5}$	3	$\pm 13 \cdot 10^{-5}$
4	$\pm 20 \cdot 10^{-4}$	4	$\pm 10 \cdot 10^{-5}$		

Стекла первой категории применяются, когда для получения высококачественного прибора требуется, чтобы стекло имело константы, точно соответствующие каталогу. Это нужно не во всех случаях; так, для изготовления призм полного внутреннего отражения может быть взято стекло 4-й категории.

В случае фотообъективов наиболее важными являются синяя и фиолетовая части спектра, в случае же визуальных приборов — желтая и зеленая, поэтому ТУ дают возможность требовать выполнения каталога по дисперсии либо по $n_F - n_C$, либо по $n_{G'} - n_D$.

Стекло высоких категорий по константам требуется для приборов, изготавливаемых в массовом масштабе, так как, имея всегда стекло с одними и теми же постоянными, можно при обработке его пользоваться одним и тем же инструментом. Кроме того, в этом случае нет опасности перепутать детали, изготовленные из разных партий стекла.

В случае изготовления уникальных приборов вопрос об оптических постоянных стекла стоит несколько иначе. В этих случаях к стеклу могут быть предъявлены очень строгие требования и не по каталогу. Так, при изготовлении некоторых фотообъективов применяют следующий прием: к некоторому трудно изготовляемому стеклу, обладающему хорошими качествами, но константами, отличными от каталога, подбирают (иногда специально варят) стекла нескольких других сортов, с константами, отличающимися от каталога на вполне определенные величины.

Соответственно сказанному, различные сорта оптического стекла можно разбить на две группы:

1) Стекла, идущие для изготовления массовой продукции. Эти стекла должны иметь вполне определенные константы, хорошо повторяющиеся от плавки к плавке. Конструкторы оптических приборов должны применять их во всех возможных случаях.

Уменьшение числа этих стекол является важной проблемой оптической промышленности. Оно упрощает работу заводов оптического стекла и позволяет оптико-механическим заводам при наличии сравнительно малономенклатурного склада стекла в более широких пределах варьировать свою продукцию.

2) Стекла для уникальных и опытных приборов. Эти стекла должны вырабатываться в возможно более широком разнообразии. Завод оптического стекла

должен иметь возможность сварить по заказу конструктора стекло с любыми допустимыми современной техникой константами.

В настоящее время эта задача заводами оптического стекла решается тем, что в каталоге помещается большое количество разнообразных сортов стекла. Такое решение обладает тем преимуществом, что дает конструктору большой выбор стекол и точные данные, достаточные для расчетной работы. Недостатком его является введение в каталог большого количества сортов, часто почти не потребляемых. Эти сорта без особого основания попадают в новые приборы массового характера, осложняя как работу ЗОС, так и ОМЗ.

§ 2. Оптическая однородность стекла

Одним из основных качеств оптического стекла является его исключительная однородность. Большое практическое значение имеет однородность партии стекол. Куски стекол, принадлежащие к одной партии, должны быть термически одинаково обработаны и иметь одинаковые оптические постоянные.

Технические условия устанавливают классы однородности партии отдельно по n_D и отдельно по $n_F - n_C$ или $n_D - n_C$. Высший класс однородности по n_D не допускает внутри партии разностей показателя преломления, превышающих $5 \cdot 10^{-6}$. Высший класс, относящийся к дисперсии, допускает разность до $1 \cdot 10^{-6}$. Выполнение этих требований представляет для заводов оптического стекла большие затруднения. Очень трудно получить партию с особо однородным показателем преломления; для этого приходится брать стекло одной плавки и отжигать в особо хороших печах. Получение стекла с однородной дисперсией проще, так как режим отжига на дисперсию практически не влияет, и дело сводится к подбору партии целиком из одной плавки стекла.

Неоднородность куска оптического стекла может выразиться в наличии в стекле: а) плавных изменений показателя преломления, захватывающих большие участки стекла; б) свилей и резко ограниченных областей с отличающимся от среднего показателем преломления и в) посторонних включений — пузырей газа, камней, кусочков непроваренной шихты и т. п.

Разберем эти случаи более подробно.

а) Плавные неоднородности

В них показатель преломления постепенно изменяется обычно в пределах меньших $1 \cdot 10^{-4}$.

Главным источником этого вида неоднородностей являются неправильности, допускаемые во время тепловой обработки — отжига стекла. Этот вид неоднородностей трудно обнаруживается, однако является особенно вредным, так как распространяется на большие участки стекла.

Однородность кусков стекла по отношению к плавным неоднородностям в технических условиях называется оптической однородностью в узком смысле. По этому принципу стекло разбивается на 8 категорий, в зависимости от грубости дефекта. Однородность оценивается по влиянию исследуемого стекла на разрешающую способность системы. Для этого стекло должно быть с двух сторон сполитровано или обложено полированными стеклами (в последнем случае промежутки между стеклами и обкладками заполняются жидкостью близкого показателя преломления). Полированный образец помещают в параллельный пучок между коллиматором и трубкой, в которую рассматривают изображение мира, помещенной в коллиматоре. Неоднородности, имеющиеся в стекле, портят изображение мира. В наиболее ответственных случаях на той же установке рассматривают качество изображения точки.

б) Свили

Свиями называются неоднородности стекла, выраженные либо в виде тонких нитей с отличным от основного стекла показателем преломления, либо как границы между двумя слоями стекла с различными показателями преломления. Свили первого рода (свиля-нити) при рассмотрении их на экране теневой установки

(см. дальше) представляются в виде либо темной нити со светлыми краями (когда показатель преломления свили меньше показателя преломления стекла), либо — светлой нити с темными краями (наблюдается для свилей с большим, чем у окружающего стекла, показателем преломления). Свиле-граница представляется в виде рядом идущих темной и светлой нитей (рис. 143).

Наиболее часто встречаются свили-нити с показателем преломления меньшим, чем у стекла. Это дает повод связывать появление свилей в стекле с растворимостью стенок горшка и мешалок, так как при этом в стекло вносятся избыточные окислы алюминия и кремнезем, всегда снижающие показатель преломления стекла.

Обычно показатель преломления свили отличается от показателя преломления стекла на несколько (2—5) единиц четвертого десятичного знака.

Оптически свиль действует как цилиндрическая линза — отрицательная или положительная. Если в оптической детали имеется свиль-нить, занимающая ничтожный объем стекла, а сама деталь не расположена в фокальной плоскости прибора, то такая свиль не вредна и может быть отнесена к эстетическим недостаткам прибора. Свиле-границы опасны и недопустимы в оптических деталях. Также вредны

свиле, представляющие собою ряд параллельных или более или менее переплетенных свилей-нитей. Такие свили снижают разрешающую силу прибора, т. е. его основное качество.

Вопрос о степени вредности свилей для качества оптических приборов до настоящего времени является спорным. Повидимому, при инди-

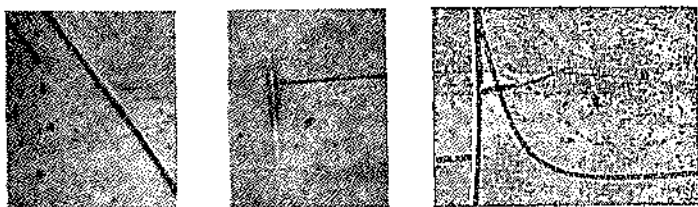


Рис. 143. Виды свилей в оптическом стекле:

а — свиль-нитька с показателем преломления меньшим, чем у стекла; б — свиль-нитька с показателем преломления большим, чем у стекла; в — свиле-граница

видуальном подходе к каждому куску стекла и изготовленной из него детали можно было бы сильно расширить допуски на свилистость стекла.

В последнее время для изготовления крупных деталей, особенно если эти детали идут на изготовление объективов, разрешается брать стекло с крупными свиллями любых размеров, при условии, что их не много и что между ними нет мелких свилей. Технические условия выделили это стекло в особые категории, допускающие одиночные свили, удаленные друг от друга на 1 см.

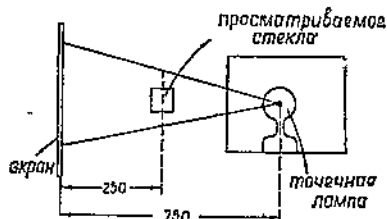


Рис. 144. Схема установки для браковки стекла на свили

к образцу стекла и чем меньше светящаяся точка, тем резче проявляются свили.

Различают свили следующих категорий, — см. табл. 18.

Браковка стекла на свили производится* на специальной установке (рис. 144), состоящей из светящейся точки (точечная лампа или круглое отверстие диаметром в 2 мм, освещенное с задней стороны вольтовой дугой), столика, на котором устанавливается просматриваемое стекло, и экрана, удаленного от светящейся точки на 750 мм. На экране, как уже сказано, свили представляются в виде более или менее резко выраженных нитей с темной или светлой центральной частью, причем, чем ближе экран располагается

* Отделение просмотра стекла на свили от просмотра на однородность определяется значительно большей простотой операции просмотра на свили и историческими причинами: стекло на свили просматривали еще тогда, когда не знали о плавных неоднородностях.

Таблица 18

Условия измерения			Примечание
категория	диаметр светящейся точки (в мм)	расстояние от экрана до заготовки (в мм)	
1	2	120	Испытуемая заготовка на экране свилей не обнаруживает
2	2	250	
3	2	500	
4	4	500	
10	2	120	Допускаются одиночные свили, отстоящие друг от друга на расстоянии не менее 10 мм
20	2	250	
30	2	500	

При браковке исследуемая свиль сопоставляется с нормальной эталонной свилею. Просмотр исследуемого куска стекла может производиться в одном, двух и трех взаимно перпендикулярных направлениях. В соответствии с этим различаются стекла классов В, Б и А.

Наиболее трудными в отношении свилистости сортами будут такие, в состав которых входят легкоплавкие, способные легко взаимодействовать с шамотом компоненты — BaO , PbO , Na_2O и др., а также компоненты, обладающие при высокой температуре значительной летучестью, — B_2O_3 , PbO и др. В обоих случаях, как при растворении стенок горшка, так и при улетучивании, в стекломассе создаются значительные неоднородности. При этом большая скорость образования неоднородностей часто не может быть элиминирована перемешиванием стекломассы.

В соответствии с указанным, к наиболее свилистым сортам относятся тяжелые флинтты, далее идут флинтты, некоторые баритовые кроны и баритовые флинтты.

в) Пузыри

При прохождении света через стекло, содержащее пузыри, последние действуют как сильно отрицательные линзы, частично преломляя свет, частично рассеивая его. Если пузырь расположен в фокальной плоскости окуляра, то он виден как кружок с резко очерченными краями. Если пузырь не находится в фокальной плоскости окуляра, то он обнаруживается в виде теневого пятна без резких границ. Чем больше расстояние пузыря от фокальной плоскости, тем слабее пятно.

Пузырь уменьшает яркость света, прошедшего через прибор. Уменьшение яркости зависит от размеров пузырей и от общего количества их в стекле. Части оптики прибора, расположенные в фокальной плоскости, такие, например, как сетки, шкалы, должны готовиться из стекла, не содержащего пузырей. Здесь пузыри, помимо уменьшения яркости светового потока, мешают наблюдению, прикрывая собой часть поля зрения.

Пузыри в стекле могут быть различных размеров. Однако определенные группы стекол характеризуются некоторым средним значением пузыристости.

Различают сорта малопузырные, с количеством пузырей не выше 100 шт. на 1 кг, и многопузырные, в которых число пузырей доходит до 1500 на 1 кг.

К наиболее пузырным сортам стекол относятся тяжелые флинтты (ТФ), баритовые флинтты (БФ) и тяжелые кроны (ТК). В них наибольшее допустимое число пузырей — 1000 на 1 кг стекла. Кроны (К), баритовые кроны (БК), флинтты (Ф) и легкие флинтты (ЛФ) допускаются с числом пузырей не выше 100 шт. на 1 кг стекла.

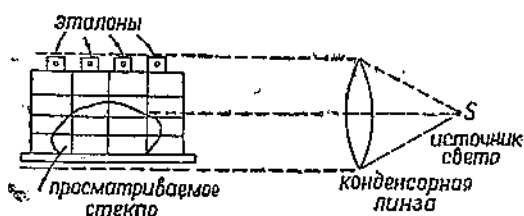


Рис. 145. Схема установки для браковки стекла на пузыри

Таблица 19

Категория	Диаметр наибольшего пузыря (в мм)
1	0,002
2	0,1
3	0,2
4	0,3
5	0,5
6	0,7
7	1,0
8	2,0

По размерам пузырей оптическое стекло делится на 8 категорий (табл. 19).

Просмотр стекла на пузыри ведется следующим образом (рис. 145).

Кусок стекла опускается в кювету с плоскопараллельными стеклянными стенками, которую наполняют жидкостью с показателем преломления, близким к показателю стекла. Таким образом удается просмотреть внутренность куска стекла без полировки его граней. В проходящем свете можно различить лишь пузыри, диаметр которых не меньше 0,1 мм. При боковом же освещении на темном фоне пузыри

диаметром больше 0,1 мм представляются в виде светлых кружков, пузыри меньшего размера также представляются в виде блестящих звездочек. Поэтому кюветку со стеклом рассматривают при боковом освещении в параллельном пучке света на темном фоне. Подсчет пузырей ведется визуально. Допуски в ТУ проработаны отдельно для каждого сорта стекла и учитывают как трудность удаления пузырей при варке данного сорта стекла, так и чувствительность изготавливаемых из него деталей к пузырям. Для очень крупных деталей (призм) даются разные допуски на пузыри для различных частей детали.

Категория стекла по пузырям обычно определяется в самом начале процесса обработки сваренного стекла. Берутся пробы из нескольких мест горшка и под микроскопом промеряется диаметр пузырей. Отдельные крупные пузыри выбраковываются в последующей разбраковке стекла. Количество пузырей в данном куске стекла подсчитывается при освещении куска сильным боковым светом.

§ 3. Поглощение света в стекле

Ко второй группе величин, характеризующих оптические свойства стекла, относится его способность поглощать свет. С точки зрения поглощения света, стекла, применяемые в оптических приборах, разделяются на оптические стекла в узком смысле слова и на цветные стекла (такие, которые обладают неодинаковым поглощением в различных областях видимого спектра); поэтому технические условия различают общее поглощение и цвет стекла.

Оптическое стекло очень прозрачно в видимой части спектра и поглощает ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра. (Для $\lambda = 900 \text{ м}\mu$ — $1800 \text{ м}\mu$ поглощение возрастает, в среднем, от 10 до 85% *.) Поглощение ультрафиолетовой части спектра распространяется в слабой степени и на видимую фиолетовую. В результате получается зеленоватая окраска оптического стекла. Она легко наблюдается на больших массах стекла.

При изготовлении художественных изделий эту не всегда желательную окраску уничтожают введением добавочного красителя, окрашивающего стекло в дополнительный цвет и делающего его серым.

В случае оптического стекла этот способ недопустим, так как связан с увеличением общего поглощения стекла. Однако не может быть допущена также и значительная окраска стекла. Поэтому ТУ разбивают оптические стекла на ряд категорий по окраске (табл. 20).

Наивысшая категория обеспечивает получение практически бесцветного стекла.

Специальные посортные ТУ определяют возможность заводов, указывая категории, в которых может быть регулярно отпускаемо стекло данного сорта.

Таблица 20

Категория	Коэффициент поглощения
1	До 0,008
2	0,008—0,010
3	0,010—0,015
4	0,015—0,020

* Следовательно, оно является „цветным“ в этих невидимых областях спектра.

Все цветные стекла, как указывалось выше, могут быть разбиты на две группы: группу селеново-кадмиевых стекол, окрашенных коллоидными красителями, и группу стекол, окрашенных молекулярными красителями. В то время как стекла, окрашенные молекулярными красителями, имеют сложную кривую поглощения, которую можно охарактеризовать только подробной таблицей чисел, стекла селеново-кадмиевые имеют весьма простую кривую поглощения. Эти стекла разделяют спектр на две части — длинноволновую и коротковолновую. Первую они почти полностью пропускают, вторую — целиком задерживают. Для характеристики поглощения селеново-кадмиевых стекол достаточно знать коэффициент поглощения в прозрачной части E_0 , положение границы, где начинается поглощение $\lambda_{\text{пред}}$, и крутизну K , характеризующую резкость перехода от прозрачной части к непрозрачной.

Технические условия разбивают цветное стекло на ряд категорий, регулирующих чистоту его цвета. В случае селеново-кадмиевых стекол ТУ контролируют величины E_0 , $\lambda_{\text{пред}}$ и K , причем наиболее жесткие категории требуют, чтобы поглощение E_0 не превышало 0,005, а граница поглощения $\lambda_{\text{пред}}$ не отличалась от каталожной больше чем на $\pm 5 \text{ м}\mu$. (Об этих терминах см. ниже, II, гл. 4, § 1.)

§ 4. Двойное лучепреломление стекла

Под влиянием внешних или внутренних натяжений стекло становится двояко лучепреломляющим (см. выше I, гл. 1, § 8).

Измерив двойное лучепреломление, можно определить величину напряжения лишь в том случае, когда известно, что одна из составляющих напряжения равна нулю. Практически такой случай мы имеем, когда просматриваем плитку в торец.

Внутренние напряжения остаются в стекле после неравномерного охлаждения, в хорошо отожженном стекле их остается очень мало. Поэтому отсутствие двойного лучепреломления одно время считалось единственной мерой хорошего качества отжига. Однако, как было указано выше, в результате неправильной термической обработки в стекле появляются плавные оптические неоднородности. Величина их не находится в однозначной зависимости от величины двойного лучепреломления, поэтому в отношении оптического стекла критерием хорошего отжига правильнее считать отсутствие оптических неоднородностей, отсутствия же двойного лучепреломления требовать постольку, поскольку оно характеризует влияние остаточных напряжений на прочность и поведение стекла в дальнейшей механической обработке.

В различных видах технического, посудного и тому подобного стекла допускаются остаточные напряжения, не превышающие $1/20$ напряжений, разрывающих стекло. ТУ на оптическое стекло разбивают его, в зависимости от остаточных напряжений, на 4 категории. К первой категории относятся стекла, двойное лучепреломление которых меньше чем $4 \cdot 10^{-7}$ (в единицах показателя преломления), и к четвертой — имеющие двойное лучепреломление в пределах от 20 до $40 \cdot 10^{-7}$. Учитывая, что в большей части стекол напряжения в 1 кг/см^2 вызывают двойное лучепреломление около $3 \cdot 10^{-7}$, видим, что даже в худшем случае в стекле допускаются напряжения, не превышающие 13 кг/см^2 . Прочность стекла на разрыв порядка 600 кг/см^2 . Таким образом ТУ допускают в оптическом стекле напряжения, не превышающие $1/40$ от разрывающих, а в случае особо высококачественного стекла повышают требования до $1/400$.

Двойное лучепреломление практически не является мерой оптического качества стекла, учитывается скорее как косвенная характеристика его механических свойств. Учитывать двойное лучепреломление стекла следует в случае применения стекла в поляризационных приборах.

§ 5. Термические и механические свойства стекол

Все остальные свойства стекол по сравнению с оптическими являются второстепенными. Температурный коэффициент расширения приходится учитывать при изготовлении некоторых точных конструкций, работающих в широком интервале температур, например при посадке стекол на оптический контакт. Теплоемкость

и теплопроводность применяются при теплотехнических расчетах. Плотность нужно знать для подсчета веса различных конструкций.

Механические свойства стекла мало зависят от состава. Вообще стекло, будучи прочным на раздавливание, довольно непрочное на разрыв и на удар. Соответственно стекло принадлежит к разряду хрупких тел.

При применении стекол в оптических приборах вопроса о механической прочности деталей не ставится, и никогда состав стекла, идущего на изготовление оптических деталей, не выбирается с учетом его механической прочности.

В последнее время заграничные фирмы выпустили на рынок „небьющиеся“ стекла. От обычных стекол они отличаются только тем, что по окончании обработки они подвергаются закалке — разогреву до температуры порядка $500-600^{\circ}\text{C}$ — и быстрому охлаждению — обычно обдуванием воздухом в специальной установке. При этом в стекле возникают большие напряжения. Наружные слои оказываются сжатыми, а внутренние — соответственно растянутыми. Такое стекло в некоторых случаях оказывается более прочным. В частности, оно поддается изгибу и в некоторых специфических условиях лучше противостоит удару молотком.

Причина повышения прочности лежит в том, что для разрыва поверхности такого стекла приходится приложить нагрузку большую, чем та, которая необходима для преодоления сжатия, вызванного закалкой. Однако в тех случаях, когда нагрузка вызывает растяжение внутренних слоев, закаленное стекло оказывается менее прочным, чем незакаленное. Такие случаи бывают при ударах. Это обстоятельство снижает практическую ценность закаленных стекол. Однако главным недостатком этого стекла является чрезвычайная неопределенность его свойств: оно может прекрасно выдерживать очень трудное испытание на изгиб и на следующий день разорваться, лежа на складе.

Нужно сказать, что предложение упрочнить стекло закалкой не ново. В конце прошлого столетия в Германии и во Франции ряд заводов изготовлял посуду из закаленного стекла. В наше время производство закаленного стекла не изобретено, а возобновлено, по нашему мнению, без особого успеха.

Совершенно иначе применяется закаленное стекло в качестве водомерных стекол на паровых котлах. В этом случае в нагретом стекле имеет место возникновение напряжений, обратных имеющимся в закаленном стекле, и стекло в рабочем состоянии оказывается освобожденным от напряжений и, следовательно, более устойчивым, чем в холодном состоянии, когда оно не работало. Такое стекло должно противостоять случайным охлаждениям; наличие небольших закаленных напряжений этому содействует. Однако и в этом случае закалка является подсобным средством повышения прочности, главную же роль играет выбор состава стекла. Водомерные стекла изготовляются из стекол с малым коэффициентом расширения: в то время как обычное стекло имеет коэффициент расширения $3 \cdot 10^{-6}$, стекло пирекс, применяемое для водомерных стекол, имеет коэффициент расширения $1 \cdot 10^{-6}$.

Если при выборе стекла для оптических деталей его прочность во внимание не принимается, то в случае оконных стекол вопрос о прочности стекла является основным.

Механическая прочность стекла возрастает с его толщиной. Тонкое оконное стекло может быть применено лишь для застекления вертикальных окон, толстое зеркальное может вынести значительную нагрузку, по такому окну может пройти человек.

Пулестойкость стекол зависит от его состава и колеблется в пределах $10-15\%$. Закалка стекла весьма мало повышает пулестойкость стекла. Пулестойкость окон определяется их толщиной. Окно толщиной в 10 см не пропускает пули. Однако оно при попадании пули разбивается.

Таким образом, толстое стеклянное окно может один раз защитить от пули. Окно, разбиваясь, не должно разлетаться и давать крупные режущие осколки. Эта задача в значительной степени разрешается применением упругих пластмасс. Известны тонкие стекла триплекс, склеенные пластмассой из еще более тонких

листов. Попавшая пуля пробивает триплекс и дает в нем ряд трещин, но образовавшиеся при этом осколки стекла не разлетаются, а оказываются прикрепленными к пленкам пластмассы.

Склейка пластмассами применяется при изготовлении толстых стекол для танковых окошек. Их собирают из большого числа зеркальных стекол различной толщины. Толщина стекла не пропускает попавшую пулю, а склейка пластмассой предупреждает разлетание образовавшихся при этом осколков. Некоторые из стекол, входящие в состав этих окошек, иногда предварительно закалываются. Сделать окна, не пробиваемые пулей, пока не удастся.

Взрывные волны разбивают оконные стекла. Вопрос об упрочнении оконных стекол и о безосколочном разбивании стекла имеет большое значение. В настоящее время можно предложить только применять листы из пластмассы в качестве прозрачного и безосколочно небьющегося заменителя стекла. Для увеличения прочности стекла имеет смысл уменьшить размеры окон, разделяя большие окна с помощью переплета на мелкие части. Для предотвращения осколков полезно заклеивать стекло плотной тканью, приклеивая ее прочным клеем (растворимым стеклом) или шеллачным лаком.

Глава 4

СВЕТОФИЛЬТРЫ

§ 1. Фотометрические элементы светофильтра. § 2. Классификация светофильтров. § 3. Желатиновые светофильтры. § 4. Светофильтры из стекла, окрашенного в массу. § 5. Светофильтры из окрашенных пластмасс. § 6. Светофильтры для фотографических работ. § 7. Светофильтры для выделения узких участков спектра. § 8. Светофильтры для равномерного (не селективного) ослабления спектра. § 9. Светофильтры для „изменения“ чувствительности приемника или излучения источника света по спектру. § 10. Светофильтры с изменяющейся характеристикой — фотометрические клинья. § 11. Светофильтры для инфракрасной и ультрафиолетовой частей спектра.

В военных оптических приборах и в военной технике вообще широко применяются так называемые светофильтры.

Светофильтром называют обычно плоскопараллельный слой среды с избирательным поглощением в той или иной части спектра, как видимой, так и невидимой.

§ 1. Фотометрические элементы светофильтра

Условимся, что светофильтр, фотометрические зависимости которого мы будем устанавливать, представляет собой оптически пустую (не рассеивающую свет) поглощающую среду, выполненную в виде плоскопараллельной пластинки. В большинстве случаев светофильтры отвечают этим требованиям.

Спектрофотометрическая характеристика светофильтра может быть представлена в виде графика зависимости коэффициента пропускания T_λ (см. I, гл. 1, § 6) от длины волны λ (рис. 146, кривая 1 и 2). Коэффициент пропускания T_λ реального светофильтра может быть измерен на любом визуальном или фотоэлектрическом спектрофотометре или спектрофотографическим методом (см. I, гл. 1, § 11).

Часто при работе со светофильтрами, при расчетах и переходах от одной толщины к другой удобнее пользоваться спектральной характеристикой, выраженной через так называемую оптическую плотность, которая связана с коэффициентом пропускания T_λ выражением

$$D_\lambda = -\lg T_\lambda. \quad (1,1)$$

Таблица перехода от плотности D_λ к коэффициенту пропускания T_λ приведена в конце статьи (табл. 24).

Удобство выражения спектральной характеристики через оптическую плотность $D_\lambda = f(\lambda)$ показано на рис. 146. Кривая 1 представляет собой спектральную характеристику синего стекла в толщине 1,5 мм, выраженную коэффициентом

пропускания T_λ по спектру. Кривая 3 — то же стекло, спектральная характеристика которого выражена через оптическую плотность D_λ . Кривая 2 — синее стекло той же марки, но в толщине 3,0 мм, характеристика в T_λ . Кривая 4 — синее стекло в толщине 3,0 мм, характеристика в D_λ .

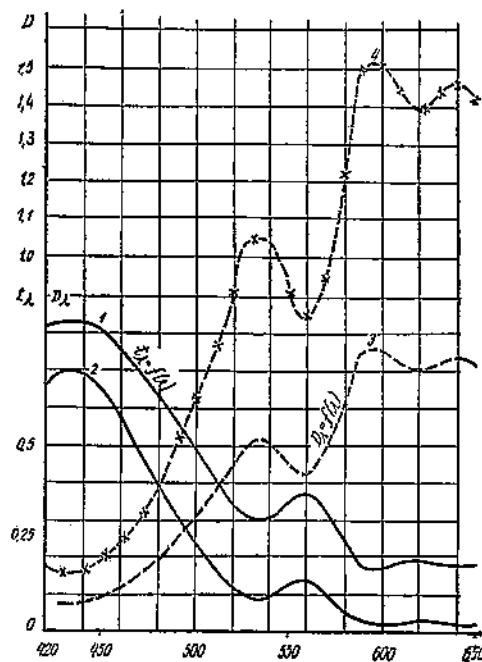


Рис. 146. Кривые пропускания и плотности

Как видно из приведенных выше кривых, при увеличении толщины стекла в два раза ординаты D_λ увеличиваются также в два раза, значения же коэффициентов пропускания T_λ при увеличении толщины стекла в два раза должны быть возведены в соответствующую степень, в данном случае — в квадрат.

Часто при работе со светофильтром нужно знать, в какой степени он ослабляет падающий на него поток лучистой энергии в целом, или, что то же самое, — знать общий (интегральный) коэффициент пропускания светофильтра. Легко видеть, что этот общий или интегральный коэффициент пропускания светофильтра T будет изменяться в зависимости от распределения энергии источника света по спектру E_λ и чувствительности приемника лучистой энергии по спектру V_λ — например глаза, фотографического слоя, фотоэлемента и т. д.

Интегральный коэффициент пропускания может быть вычислен по следующей формуле:

$$T = \frac{F'}{F} = \frac{\int_0^\infty E_\lambda V_\lambda T_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty E_\lambda V_\lambda d\lambda}, \quad (1,2)$$

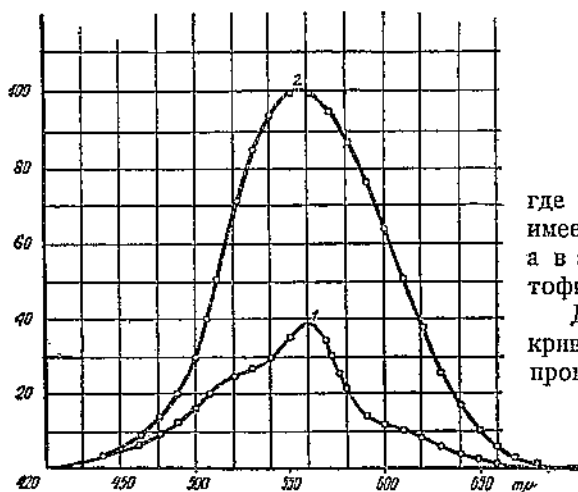


Рис. 147. Световые потоки:

1 — упавший на светофильтр; 2 — прошедший через него

где в числителе под знаком интеграла имеем поток, прошедший через фильтр, а в знаменателе — поток, упавший на светофильтр.

Для приведенного выше (рис. 146, кривая 1) синего стекла световой поток, прошедший через него, может быть представлен в виде кривой 1 рис. 147 (E_λ — дневной свет). Световой поток, упавший на светофильтр, представлен на этом же рис. 147 кривой 2.

Согласно формуле (1,2), отношение площадей, ограниченных кривыми 1 и 2, дает интегральный коэффициент

пропускания данного светофильтра. При вычислении интегрального коэффициента пропускания обычно пользуются или измерением площадей (планиметром, подсчетом квадратиков, нанесенных на миллиметровую бумагу площадей, и т. п.) или сложением ординат E_λ , $V_\lambda t_\lambda$ и $E_\lambda V_\lambda$ на данном участке длин волн.

Для примера подсчитаем интегральный коэффициент пропускания для синего светофильтра (рис. 146, кривая 2) для света дневного и электрического (лампа 25 ватт); получаем соответственно 31% и 28% (приемником энергии является

глаз). Расхождение в коэффициентах пропускания может быть значительно большим, если брать различные приемники лучистого потока, например глаз и фотографическую пластинку. Поэтому при работе со светофильтром следует определять его пропускание для данных условий работы — для данного источника света и данного приемника лучистой энергии.

Ясно, что интегральный коэффициент пропускания T так же, как и коэффициент пропускания T_λ , всегда меньше 1. Следовательно, применение светофильтра всегда ведет к ослаблению потока лучистой энергии, что в некоторых случаях исключает возможность применения светофильтра. Например, при аэро съемке, при очень плохих условиях освещения и недостаточной чувствительности аэропленки применение светофильтра может дать недодержанный негатив.

Аэросъемочные фильтры (см. ниже § 7) характеризуются следующими спектротометрическими параметрами:

а) минимальная плотность — D'_{λ_0} ; б) предельная или граничная длина волны $\lambda_{пр}$ или $\lambda_{гр}$ и в) крутизна — K .

С этими параметрами приходится иметь дело при заказах, приемках и работе с фильтрами.

а) Минимальная плотность — D'_{λ_0} . Характерной особенностью аэросъемочных фильтров является крутой подъем в сторону коротких длин волн и горизонтальная „площадка“ с минимальной плотностью в сторону длинных волн. D'_{λ_0} характеризует ординату этой горизонтальной площадки. В технических условиях на светофильтры часто указывается длина волны, при которой измеряется D'_{λ_0} . Целесообразность этого заключается в том, что измерения производятся в начале горизонтальной площадки, где точность и легкость измерения обуславливаются большей чувствительностью глаза, чем на ее далекой части — в длинноволновом участке спектра.

Минимальная плотность светофильтра D'_{λ_0} складывается из присущего данному светофильтру (данному сорту стекла) поглощения D_{λ_0} и потерям на отражение от двух поверхностей стекла D_r , зависящим от показателей преломления стекла.

$$D'_{\lambda_0} = D_{\lambda_0} + D_r. \quad (1,3)$$

Очевидно D_{λ_0} будет зависеть от толщины светофильтра; D_r от толщины не зависит и остается постоянной для любой толщины данного сорта стекла.

б) Предельная длина волны — $\lambda_{пр}$. Предельной длиной волны условились называть ту длину волны, для которой коэффициент пропускания в два раза меньше максимального его значения, или, что то же, — для которой плотность на 0,3 больше минимальной плотности данного светофильтра:

$$D_{\lambda_{пр}} = D'_{\lambda_0} + 0,3. \quad (1,4)$$

в) Крутизна светофильтра K . Крутизна светофильтра численно выражается разностью плотностей, соответствующих $\lambda_{пр}$ и λ_{λ_0} — 20 мμ:

$$K = D_{\lambda_{пр} - 20 \text{ мμ}} - D_{\lambda_0}. \quad (1,5)$$

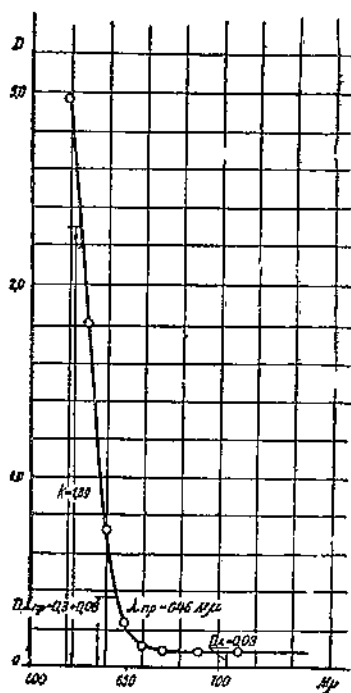


Рис. 148. Параметры фильтра КС-14

На рис. 148 графически представлены перечисленные выше параметры светофильтров для аэросъемочного фильтра V (стекло КС-14).

§ 2. Классификация светофильтров

Светофильтры по способу их изготовления могут быть разделены на следующие группы:

- 1) из стекла, окрашенного в массу;
- 2) желатиновые;
- 3) из окрашенных пластмасс;
- 4) жидкие.

Последняя группа светофильтров (жидкие) крайне неудобны в практической работе, особенно в приборах, и тем более в приборах, применяемых в полевых условиях.

Однако с этим неудобством приходится мириться вследствие того, что некоторые селективно поглощающие свет вещества не могут быть введены ни в желатину, ни в стекло, ни в пластмассу.

Более подробно мы остановимся на рассмотрении первых трех групп — твердых светофильтров — и укажем на их положительные и отрицательные свойства.

По их применению, мы разделяем светофильтры на шесть групп:

- 1) для фотографических работ;
- 2) для выделения узких участков спектра;
- 3) для равномерного (не спектрального) ослабления спектра;
- 4) для изменения чувствительности приемника или излучения источника света по спектру;
- 5) с изменяющейся характеристикой — фотометрические клинья;
- 6) для инфракрасной и ультрафиолетовой частей спектра.

§ 3. Желатиновые светофильтры

Желатиновые светофильтры представляют собой тонкую, 0,05—0,1 мм толщины, желатиновую пленку с введенным в нее органическим красителем. Быстрота и простота изготовления желатиновых светофильтров, требующего весьма несложного лабораторного оборудования, при большом и разнообразном выборе красителей самых различных спектральных свойств, способствовали широкому распространению желатиновых светофильтров. Мы не будем останавливаться на описании способа изготовления желатиновых светофильтров в настоящей главе. Этот способ достаточно подробно описан в ряде книг и статей [28, 29, 30].

Желатиновые светофильтры могут быть выполнены, в зависимости от предъявляемых к ним требований, или в виде желатиновой пленки или в виде стекла (или другой какой-нибудь прозрачной подложки) с нанесенной на него тонкой желатиновой пленкой.

При изготовлении светофильтров с высокими оптическими требованиями (чистота, равномерность окраски и т. п.) должны быть предъявлены соответствующие высокие требования к поверхности стекла, на которое производится полив расплавленной желатины с введенным в нее красителем. Для обеспечения этих требований, стекло, на которое производится полив, должно быть достаточной толщины (8—12 мм), при максимальных допусках на местные отклонения от плоскости в 1—2 μ . Применять такое стекло с политым на него желатиновым слоем в качестве светофильтра нецелесообразно. Это стекло используется только для полива. После высыхания пленка снимается со стекла, которое предварительно, до полива, обрабатывается тальком, обеспечивающим легкое отставание пленки от стекла.

Для предохранения пленки от влаги и механических повреждений, ее заклеивают между двумя стеклами требуемого размера на канадском бальзаме.

Закладывание желатиновой пленки между двумя стеклами без заклейки на канадский бальзам не рекомендуется. Оформленный таким образом светофильтр очень быстро портится — начинается коробление пленки от действия влаги и температуры. Следует отметить, что заклейка желатиновой пленки — светофильтра — между двумя стеклами на канадском бальзаме повышает пропускание, сравни-

тельно с пропусканием такой же пленки — светофильтра, заложенного между двумя стеклами без заклейки канадским бальзамом. Заклейка канадским бальзамом, являющимся оптически однородным с желатиной, уменьшает число поверхностей, граничащих с воздухом, с шести до двух. Кроме уменьшения числа поверхностей, вызывающих потери пропускания за счет зеркального отражения, канадский бальзам заполняет неровности поверхности желатинового слоя, вызывающие потери пропускания из-за рассеивания. В результате заклейки желатиновой пленки на канадском бальзаме пропускание светофильтра может быть повышено почти на 10%, несмотря на введение двух слоев канадского бальзама, которые, казалось бы, должны были уменьшить пропускание светофильтра.

Отрицательным свойством желатиновых светофильтров является их малая светостойкость — выцветание под действием света и, как результат этого выцветания, изменение спектральной характеристики светофильтра. Учитывая малую устойчивость желатиновых светофильтров, необходимо предохранять их от излишнего действия света, не оставлять, если этого не требует условие работы, на солнце или вблизи мощного источника света.

Нагревание фильтра, заклеенного на канадском бальзаме, свыше 40°C может повести к размягчению и вытеканию канадского бальзама и к расклеиванию светофильтра.

При соблюдении перечисленных выше предосторожностей заклеенный на канадском бальзаме желатиновый светофильтр может быть долгое время надежно использован в работе.

Концентрацию красителя или красителей (в случае составного светофильтра) принято характеризовать количеством граммов красителя каждого наименования на квадратный метр светофильтра, т. е. в $\frac{\text{граммах}}{\text{м}^2}$, при поливе расплава желатины с красителем — 1 л на квадратный метр стекла. При поливе, из указанного выше расчета, 90%-ным расплавом желатины толщина свежеполитого слоя будет 1 мм, после высыхания толщина пленки будет 0,07 мм. Поверхностная концентрация красителя в светофильтре иногда обозначается буквой H или единицами Гюбля (Hübli), по фамилии автора, предложившего указанное обозначение [3]. Оптическая плотность D_λ пропорциональна (закон Бера) концентрации красителя.

§ 4. Светофильтры из стекла, окрашенного в массу*

Стекла, окрашенные в массу молекулярными или коллоидными красителями (см. I, гл. 3, § 6), имеют большое преимущество перед желатиновыми, во-первых, благодаря своей светостойкости и, во-вторых, возможности выполнения из него светофильтров высокой оптической точности. Так, для аэрофотосъемочных работ, где предъявляются высокие требования к светофильтру (клин до 3', отклонение от плоскости 3—5 колец, местные отклонения 0,5 полосы), изготовлять желатиновые светофильтры, даже с заклежкой их на канадский бальзам, не представляется возможным. Канадский бальзам сильно деформирует стекло склеенного светофильтра, и через 5—6 месяцев фильтр начинает заметно ухудшать качество фотографического изображения.

Ограниченность выбора неорганических соединений, окрашивающих стекло, и сложность технологии производства цветного стекла, требующего заводских условий, значительно сужает возможности изготовления светофильтров с заданной спектральной характеристикой из стекла, окрашенного в массу.

§ 5. Светофильтры из окрашенных пластмасс

Светофильтры из пластмасс (например, полиметилметакрилата — органическое стекло K_d) не бьются подобно стеклянным светофильтрам и обладают большей механической прочностью, чем пленчатые желатиновые светофильтры; они с успехом могут быть применены в защитных очках, где применение стеклянных светофильтров

* См. Варгин [20], стр. 263.

недопустимо, ввиду опасности попадания осколков стекла в глаз при повреждении стекол.

Вопрос о применении окрашенной пластмассы в качестве светофильтра, т. е. о создании массы, отвечающей определенной, заданной заранее спектральной характеристике, только начинает разрабатываться. Существуют три способа* получения светофильтров на основе полиметилметакрилата, а именно: 1) введение красителя до полимеризации и проведение последней в присутствии красителя, 2) введение красителя после форполимеризации метилметакрилата и 3) поверхностная окраска готового прозрачного полиметилметакрилата в спиртовых растворах красителя. Первые опыты получения окрашенных пластмасс дали вполне обнадеживающие результаты. Следует, однако, иметь в виду, что применение светофильтров из пластмасс возможно лишь в тех случаях, когда к светофильтру не предъявляются высокие оптические требования.

Очень светостойчивые светофильтры получаются при окрашивании ацетилцеллюлозы индантроновыми красителями**.

§ 6. Светофильтры для фотографических работ

Светофильтры, применяемые в фотографии, могут быть разделены на две группы:

- а) для съемочных работ и
- б) для освещения темных фотолабораторий.

Таблица 21

λ м μ	I. ЖС-16		II. ЖС-18		III. ОС-12		IV. ОС-14		V. КС-14	
	D_{λ}	$T_{\lambda} \%$	D_{λ}	$T_{\lambda} \%$	D_{λ}	$T_{\lambda} \%$	D_{λ}	$T_{\lambda} \%$	D_{λ}	$T_{\lambda} \%$
450	3,28	0,05								
60	1,24	5,7								
70	0,42	38,0								
80	0,28	52,5								
90	0,18	66,1	5,44	0,00						
500	0,14	72,4	1,36	4,4						
10	0,12	75,9	0,42	38,0						
20	0,10	79,4	0,22	60,3						
30	0,08	83,2	0,13	74,1	3,64	00 2				
40	0,06	87,1	0,10	79,4	1,24	5,7				
50	0,06	87,1	0,07	85,1	0,42	38,0				
60	0,06	87,1	0,06	87,1	0,22	60,3	4,36	0,0		
70	—	—	—	—	0,11	77,6	1,74	1,9		
80	—	—	—	—	0,08	83,2	0,64	22,9		
90	—	—	—	—	0,07	85,1	0,21	21,7		
600	—	—	—	—	0,06	87,1	0,9	81,3		
10	—	—	—	—	—	—	0,7	85,1		
20	—	—	—	—	—	—	—	—	3,00	0,1
30	—	—	—	—	—	—	—	—	1,82	1,5
40	—	—	—	—	—	—	—	—	0,72	19,1
50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,24	67,5
60	—	—	—	—	—	—	—	—	0,11	77,6
70	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08	83,2
80	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08	—
700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* „Получение светофильтров на основе полиметилметакрилата“, отчет по теме К—Г—2* лаборатории № 1 Научно-исследовательского института пластмасс, Л., 1939.

** М. С. Зельдер и Г. К. Крюкова, Журн. техн. физики, 1944.

Светофильтры для съемочных работ (почти исключительно из стекла, окрашенного в массу) имеют своим назначением борьбу с воздушной „дымкой“ и исправление цветопередачи изображения при съемке. К этому же разделу должны быть отнесены светофильтры для трехцветной и двухцветной съемки.

Для борьбы с дымкой при аэрофотосъемке в ГОИ был разработан и введен в практику набор светофильтров из стекла, окрашенного в массу. Набор состоит из пяти светофильтров: из стекол ЖС-16, ЖС-18, ОС-12, ОС-14 и КС-14 в толщине $6 \pm 0,5$ мм *. Спектральная характеристика этого набора приведена на рис. 149 и в табл. 21.

Светофильтры для темных фотолабораторий предназначаются для освещения при обработке фотографических материалов. Рациональный светофильтр для этих целей должен иметь такую спектральную характеристику, которая обеспечивала бы максимальную визуальную освещенность рабочего места при минимальной активности для данного сорта фотографического материала **.

В отличие от обычных норм освещения, предусматривающих минимально допустимые освещенности, освещение темных фотолабораторий должно исходить из максимально допустимых норм, т. е. максимального освещения, которое в течение установленного времени еще не вуалирует фотографический материал.

В табл. 22 приведено гарантийное время нормального набора для светофильтров для фотолабораторий, которое может служить для проверки надежности данного светофильтра.

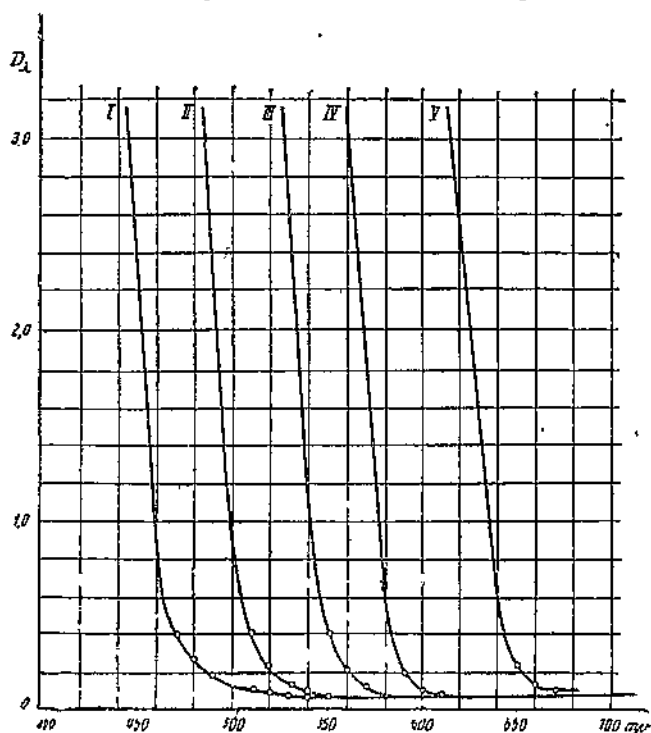


Рис. 149. Кривые плотности аэросъемочного набора

Таблица 22

Светофильтр	Гарантийное время (в мин.)	Расстояние от фонаря до фотографического слоя (в см)
Позитивный	10	20
Ортохроматический . . .	3	40
Панхроматический . . .	1	40
Инфрахроматический . .	1	40

При указанных времени и расстояниях фотографический слой при соответствующем светофильтре не должен давать вуали.

* Вопрос о применении светофильтров для борьбы с дымкой разбирается подробнее в главе о фотографии (IV, гл. 13, § 5а).

** А. А. Гершуи, Л. А. Вентман, Д. Н. Лазарев. Освещение темных цехов фотохимической промышленности. Фотокинохим. пром., № 1—2, 1935.

Это испытание целесообразно вести следующим образом: испытуемый материал прикрывается наполовину черной бумагой, и дается ряд засветок (больше и меньше гарантийного времени). После проявления, благодаря тому, что половина испытуемого материала не засвечивается, хорошо видна граница, где материал начинает вуалироваться при освещении через испытуемый светофильтр.

Светофильтры для темных фотолабораторий могут быть или одного из указанных выше типов, или в виде слоя окрашенного лака, непосредственно наносимого на лампочку. Рецептура желатиновых светофильтров приведена в табл. 23.

Таблица 23.

Наименование красителя	% содержания раствора (водного)	Кубические сантиметры							
		панхром		инфрахром		позитив		ортохром	
		1 стекло	2 стекло	1 стекло	2 стекло	1 стекло	2 стекло	1 стекло	2 стекло
Нафтол зеленый	2	45,0	—	35,0	—	8,3	—	7,5	—
Метанил желтый	0,5	—	—	—	—	36,0	—	36,0	—
Анил прочно шарлах	1	—	—	—	—	—	11,2	—	—
Родамин С	2	—	—	—	—	—	—	—	25,0
Оранжевый АТ-26	2	—	—	—	20,0	—	—	—	—
Анил чисто голубой	1	—	15,0	—	—	—	—	—	—
Вода	—	—	25,0	5,0	20,0	—	29,8	—	15,0
Желатин	8	55,0	60,0	60,0	60,0	55,7	60,0	56,5	60,0

Полив всех светофильтров — из расчета 10 см³ готового красочно-желатинового раствора на 100 см² поверхности стекла.

Высушенные стекла складываются полными сторонами внутрь и окантовываются по краям черной бумагой.

Для получения диффузного света между стеклами прокладывается лист восковки. При наличии матированных стекол необходимость в прокладке восковки отпадает, и полив производится на нематированные стороны стекла. Второе стекло в матировке не нуждается. Указанная выше рецептура светофильтров рассчитана на применение в фонаре (с не прямым освещением) 40-ваттной лампы.

В качестве светофильтров для фотолабораторных фонарей могут быть применены цветные стекла, окрашенные в массу, производства завода им. Дзержинского. Для освещения при работе с панхроматическими и инфрахроматическими фото-слоями может быть применен светофильтр, состоящий из двух стекол ЖЗС-13 (3 мм толщины) и ЗС-2 (3,5 мм толщины). Для позитивных слоев (бромосеребряная бумага, диапозитивные пластинки и т. п.) — стекло марки КС-2 (2,5 мм толщины). Одна сторона матируется для получения диффузного света. Источником света в фонарях со стеклянными светофильтрами служит лампа 25-ватт.

§ 7. Светофильтры для выделения узких участков спектра

В ряде случаев необходимо пользоваться набором светофильтров, вырезающих узкие участки спектра.

Спектральная характеристика одного из разработанных в ГОИ комплектов*, состоящего из 11 желатиновых светофильтров, от $\lambda = 429 \text{ м}\mu$ до $688 \text{ м}\mu$, через 20—30 $\text{м}\mu$, приведена на рис. 150. Подобные же наборы могут быть составлены из стекла, окрашенного в массу**, но в данном случае отдельные светофильтры

* Л. А. Вентман и Н. П. Горбов. Светофильтры для выделения узких участков спектра, Оптико-механич. пром., № 12, 1939.

** Р. М. Фридлянд. Стеклянные светофильтры для выделения узких участков спектра, Оптико-механич. пром., № 1, 1941.

набора будут иметь различную толщину, иногда довольно большую (до 10,5 мм) и состоять из одного, двух или трех стекол.

Указанные выше светофильтры для выделения узких участков спектра предназначены для источников сплошного спектра испускания. Есть возможность при помощи светофильтров получать строго монохроматическое излучение одной длины волны, применяя источник света с линейчатым спектром испускания, например ртутную дугу в комбинации с соответствующим светофильтром*.

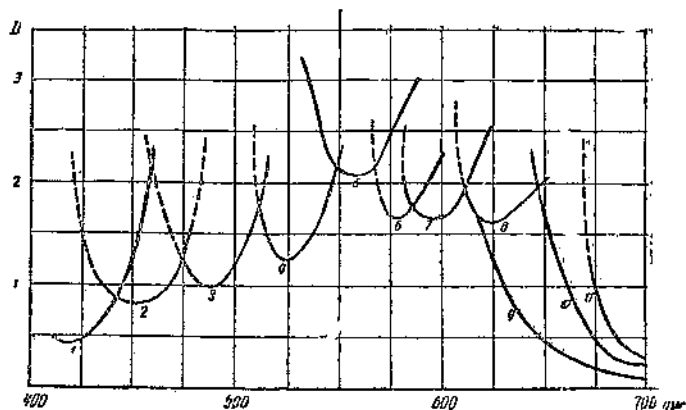


Рис. 150. Кривые плотности фильтров для выделения узких участков спектра

§ 8. Светофильтры для равномерного (не селективного) ослабления спектра

Так называемые „нейтрально-серые“ поглощающие слои могут быть осуществлены различными способами*.

Желатиновые „нейтрально-серые“ светофильтры, не рассеивающие свет, изготавливают из красителей, вводимых в желатину. В последнем рецепте „нейтрально-

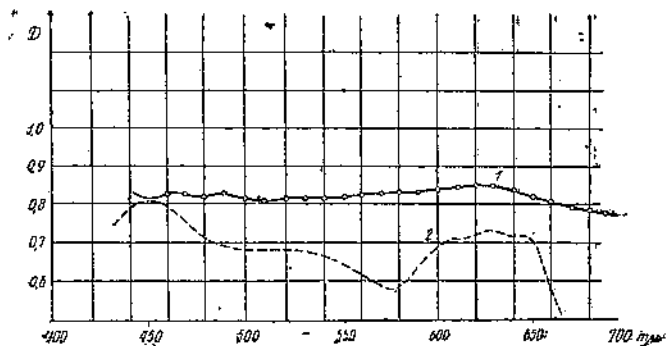


Рис. 151. Кривые плотности нейтрально-серых фильтров: 1 — желатиновый ГОИ; 2 — стекло HC-3

серого“ слоя, разработанного в ГОИ**, в области спектра 450 $m\mu$ — 660 $m\mu$ отступление от нейтральности определяется в $\pm 2\%$ по плотности. В дальней красной части спектра плотность уменьшается, а в сине-фиолетовой части, наоборот, увеличивается. Спектральная характеристика желатинового „нейтрально-серого“ слоя дана на рис. 151, кривая 1. На этом же рисунке дана кривая 2 поглощения по спектру

* Л. А. Вентман и И. И. Честная. Светофильтры для выделения отдельных линий из спектров испускания, Журн. техн. физики, т. III, вып. 2—3, 1933.

** Л. А. Вентман. Выбор поглощающего слоя сенситометрических клиньев, Кинофотохимпром., № 8, 1939.

стекла, окрашенного в массу (сорт НС-3, нейтральное стекло завода им. Дзержинского). Получить стекло лучшей нейтральности не удастся в связи с ограниченным выбором красителей, которые могут быть введены в стекло.

Для неселективного ослабления энергии видимой и инфракрасной частей спектра может быть применен графитовый поглощающий слой, представляющий собой высокодисперсный, суспендированный графит (диаметр частиц 1—2 μ) в желатиновом растворе с примесью небольшого количества аммиака. Спектральная характеристика такого слоя приведена на рис. 152.

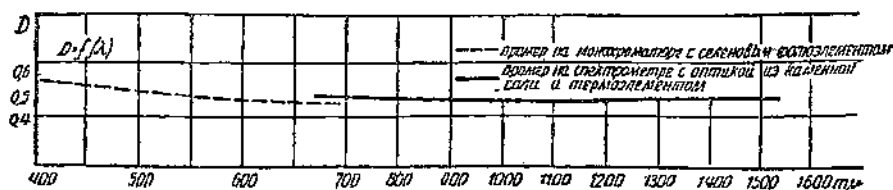


Рис. 152. Кривые плотности графитового фильтра

Недостатком графитового поглощающего слоя является его способность рассеивать свет, вследствие чего коэффициент пропускания графитового светофильтра не является величиной постоянной, а зависит от того, как применяется фильтр — в направленном или в диффузном свете.

Нейтрально-серые фильтры могут быть также получены распылением платины и родия*. Соответствующим подбором двух слоев разной толщины (ход кривой распыленной платины зависит от толщины слоя) удается получить очень хорошую нейтральность от 300 до 2300 $m\mu$, не доступную ранее применявшимися способами. Эти слои не рассеивают свет и являются достаточно долговечными во времени. Но техника получения таких металлических слоев пока еще недостаточно разработана, и говорить о массовых выпусках таких светофильтров в настоящее время преждевременно.

§ 9. Светофильтры для „изменения“ чувствительности приемника или излучения источника света по спектру

Часто приходится сталкиваться с требованиями приведения чувствительности приемника лучистой энергии к чувствительности по спектру другого приемника с иной спектральной чувствительностью.

Например, измерение освещенности в последнее время производят при помощи селенового фотоэлемента, спектральная чувствительность которого несколько отличается от чувствительности глаза (рис. 153). Исправление чувствительности по

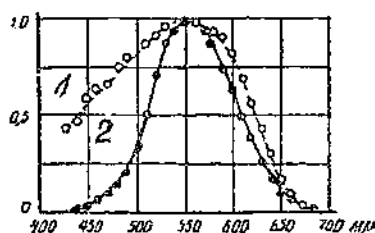


Рис. 153.

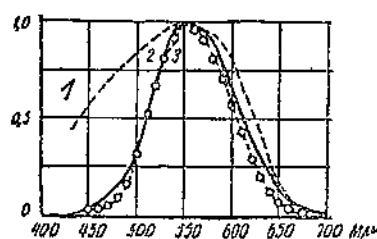


Рис. 154.

Кривые спектральной чувствительности селенового фотоэлемента (1), глаза (2) и селенового фотоэлемента с компенсационным светофильтром (3)

спектру селенового фотоэлемента возможно осуществить установкой перед фотоэлементом соответствующего рассчитанного компенсационного светофильтра. Результат такого исправления приведен на рис. 154.

* М. В. Савостьянова. Металлические нейтрально-серые фильтры для широкого спектрального интервала, Оптико-механич. прм. № 1, 1941.

Мы не будем приводить других примеров применения светофильтров подобного рода и отметим только, что, зная кривую распределения чувствительности по спектру данного приемника или источника света и задаваясь требуемой кривой, можно найти спектральную характеристику компенсационного светофильтра по формуле

$$T_{\lambda} = \frac{V_{\lambda}}{V'_{\lambda}},$$

где T_{λ} — коэффициент пропускания компенсационного светофильтра по длинам волн; V_{λ} — чувствительность по спектру данного приемника или источника света; V'_{λ} — заданная чувствительность по спектру*, которая должна быть воспроизведена при помощи компенсационного светофильтра и данного (V_{λ}) приемника или источника света.

Построив кривую $T_{\lambda} = f(\lambda)$, подбирают красители или стекла, окрашенные в массу, при помощи которых может быть изготовлен требуемый светофильтр.

§ 10. Светофильтры с изменяющейся характеристикой — фотометрические клинья

Большое число фотометрических приборов, требующих равномерного перехода в ослаблении света, основано на применении фотометрических клиньев. Другие известные способы ослабления освещенности, например изменения расстояния или входного отверстия (диафрагмы), не всегда могут быть применены по соображениям габаритов или практического использования данного прибора.

Фотометрический клин представляет собой равномерно нарастающую толщину однородного поглощающего слоя (рис. 155).

Характеристикой клина является его константа, под которой условимся понимать приращение оптической плотности на 10 мм длины клина.

Интервал ослабления клина определяется его константой K и длиной клина l .

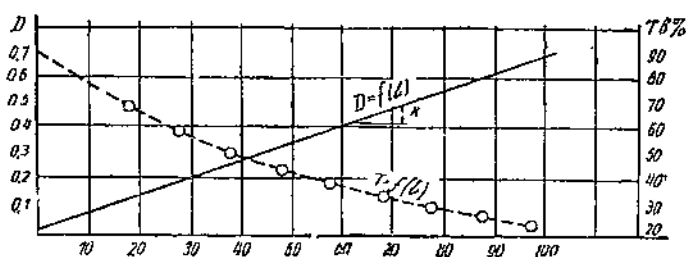


Рис. 156. Характеристики линейного клина

Удобно также пользоваться градуировочным графиком клина $D = f(l)$ (рис. 156). На этом же рисунке нанесена кривая $T = f(l)$. Эта зависимость, как указывалось в начале главы, не будет криволинейной.

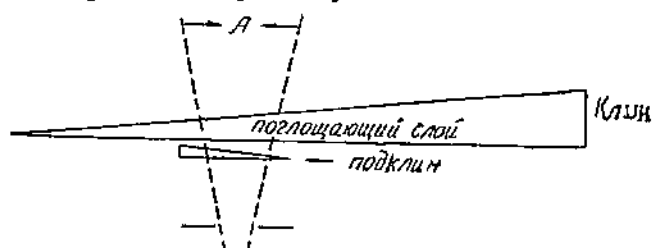


Рис. 155. Схема линейного фотометрического клина

Прямолинейная зависимость плотности D от длины клина l дает возможность нанести равномерную шкалу клина.

Плотность любого места клина может быть вычислена по формуле

$$D = kl + D_0, \quad (10,1)$$

где D_0 — начальная плотность клина; всегда $D_0 > 0$.

* Значения V_{λ} для глаза см. ниже, III, гл. 7, § 12, табл. 33.

При работе клина в приборе в поле зрения попадает участок клина с изменяющейся плотностью, что значительно сказывается на точности фотометрирования.

Чтобы избежать неравномерности фотометрического поля, применяют подклин, т. е. маленький клин с такой же константой, как и основной клин (рис. 155), но направленный в обратную сторону. При таком применении клина с подклином фотометрическое поле по всей площади имеет равную плотность. Такой установке клина с подклином может быть с полным правом приписано название „фильтр непрерывной переменной плотности“.

Для уменьшения габарита прибора вместо описанного выше линейного клина может быть изготовлен кольцевой (круговой) клин, у которого увеличение плотности идет по кругу (рис. 157 — по стрелке). Линейный клин, длиной 100 мм, может быть заменен круговым клином с такой же константой, диаметром 42 мм, считая, что начало части клина будет отстоять от края на 5 мм.

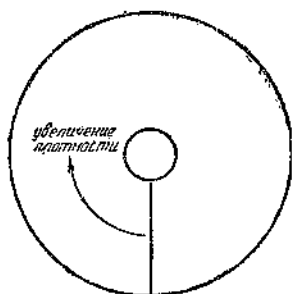


Рис. 157. Схема кругового фотометрического клина

Все, что было указано выше относительно линейных клиньев, относится и к круговым клиньям, с той только разницей, что константа определяется как приращение плотности на 10° и вместо подклина применяют второй, круговой, клин с такой же константой, как первый, но с нарастающей плотностью в обратном направлении. Линейные клинья могут быть изготовлены из красителей или графита в желатине или на стекле, окрашенном в массу. Круговые клинья изготавливаются только желатиновые при помощи специального металлического шаблона.

По особому заданию возможно изготовление клиньев как круговых, так и линейных, с прямолинейной зависимостью $T=f(l)$, но выполнение шаблонов для изготовления таких клиньев очень сложно.

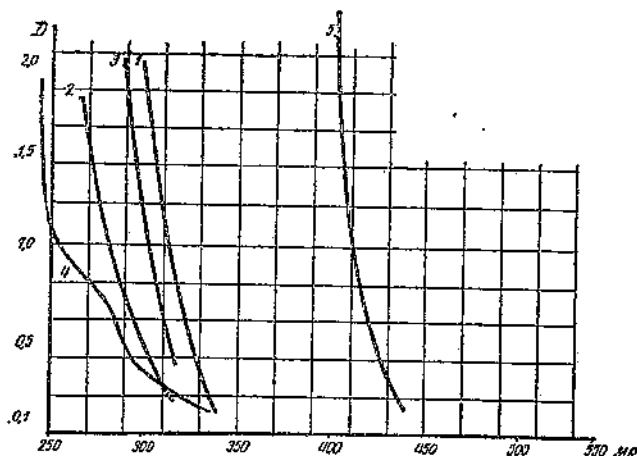


Рис. 158. Кривые плотности фильтров для ультрафиолетовой области спектра:

1 — обычное стекло толщиной $d=2,4$ мм; 2 — увиолевое стекло, $d=1,2$ мм; 3 — целлулоид (кинопленка), $d=0,13$ мм; 4 — желатин, $d=0,07$ мм; 5 — эскулиновый фильтр

Естественно, что, кроме „нейтрально-серых“ фотометрических клиньев, возможно изготовление и цветных клиньев, например для приведения источников света с различными цветовыми температурами к какой-либо заданной*.

* Техника отливания фотометрических клиньев описана в статье Шистовского (Астр. журн. 21, 118, 1944).

§ 11. Светофильтры для инфракрасной и ультрафиолетовой частей спектра

Требования, предъявляемые к светофильтрам этой группы, — или поглотить одну или другую область невидимого спектра, или, наоборот, — выделить, пропустить указанные выше области спектра.

Поглощение* ультрафиолетовой части спектра, без изменения видимой его части, может быть выполнено многими прозрачными средами; спектральные характеристики некоторых из них приведены на рис. 158.

Следует иметь в виду, что эскулиновый светофильтр под действием света изменяет свою характеристику (фильтр желтеет). Кроме того, этот светофильтр интенсивно флуоресцирует под действием ультрафиолетовых лучей.

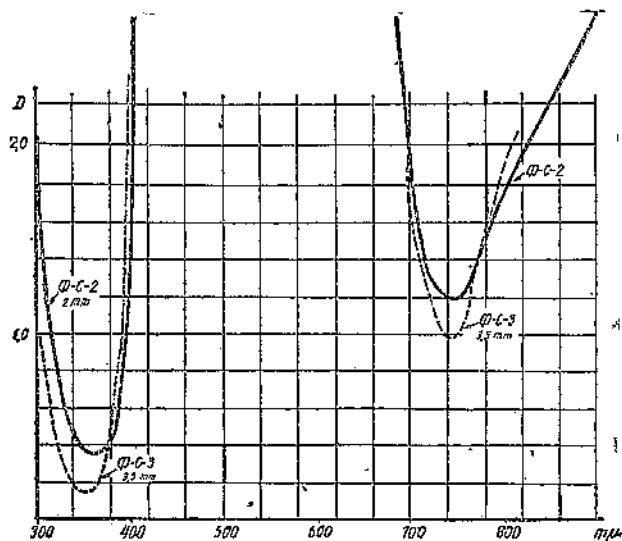


Рис. 159. Кривые плотности фильтров для выделения ультрафиолетовой области спектра

Для выделения* ультрафиолетовой части спектра могут быть применены светофильтры из стекла ФС-2, ФС-3 (рис. 159). Стекла ФС имеют, наряду с хорошим пропусканием в ультрафиолетовой части, существенный недостаток, а именно: пропускание, — правда, значительно ослабленное, — в красной части спектра.

Это пропускание красной части стеклами ФС следует иметь в виду и учитывать при их применении в качестве светофильтров для выделения ультрафиолетовой части спектра. Применяя стекло ФС с приемником, чувствительным к красной части спектра (например, с инфрахроматическими фотографическими пластинками), и источником света с интенсивным излучением в красной части спектра, можно получить ложный эффект, а именно отнести действие за счет ультрафиолетовой части спектра, в то время как оно вызвано излучением красной части спектра.

Для поглощения** инфракрасной части спектра пригодны так называемые теплозащитные стекла*, содержащие закись железа. На рис. 160 приведены кривые плотности двух типов таких стекол.

Для выделения** инфракрасной части спектра при практически полном поглощении видимых лучей могут быть применены светофильтры разных типов (желатиновые, пластмассовые, стеклянные). На рис. 161 приведены спектральные характеристики некоторых светофильтров, выделяющих инфракрасную часть спектра.

* См. Варгин [20], стр. 245—262.

** См. также статью Pfund, Transparent and opaque screens for the near-infrared, J. O. S. A., 29, 56, 1939.

В настоящем разделе мы не упоминаем о ряде сред, нашедших применение в лабораторной практике в качестве светофильтров для невидимых лучей. К числу

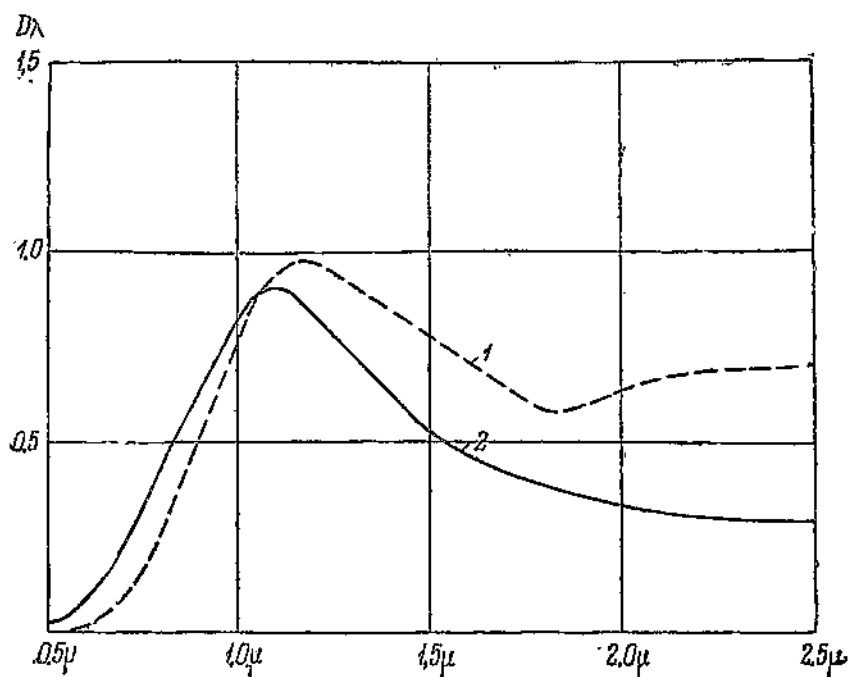


Рис. 160. Кривые плотности теплозащитных стекол толщиной 1 мм; 1 — фосфатное; 2 — силикатное

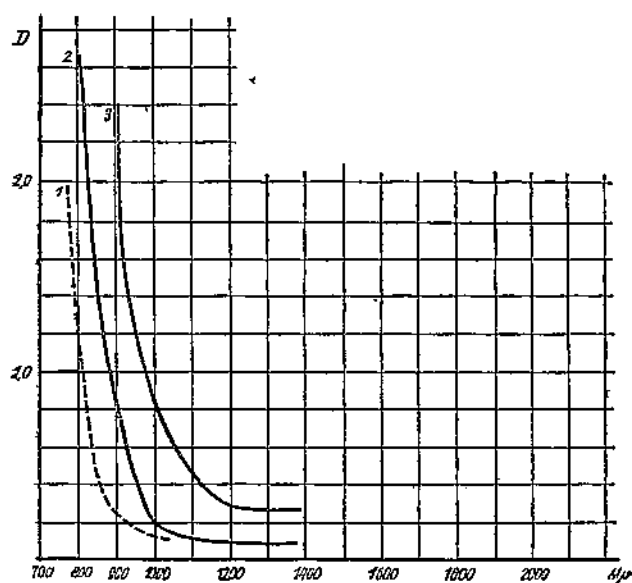


Рис. 161. Кривые плотности фильтров для инфракрасной области спектра:

1 — желатиновый фильтр № 65 ГОИ; 2 — стеклянный фильтр из стекла КС-10 толщиной 5 мм; 3 — стеклянный фильтр из стекла КС-12 толщиной 5 мм

таких сред следует отнести слои золота для поглощения инфракрасных лучей, серебряные слои для выделения узкой ультрафиолетовой части спектра и т. д.

Подобные светофильтры по ряду причин (непрочность, порча от влаги, невоспроизводимость и т. п.) не применяются в военных оптических приборах.

Таблица 24

Переход от оптической плотности D к коэффициенту пропускания T

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	1,0000	0,9977	0,9954	0,9931	0,9908	0,9886	0,9863	0,9840	0,9817	0,9795
0,01	0,9772	9750	9727	9705	9683	9661	9638	9616	9594	9572
0,02	9550	9528	9506	9484	9462	9441	9419	9397	9376	9354
0,03	9333	9311	9290	9268	9247	9226	9204	9183	9162	9141
0,04	9120	9099	9078	9057	9036	9016	8995	8974	8954	8933
0,05	8913	8892	8872	8851	8831	8810	8790	8770	8750	8730
0,06	8710	8690	8670	8650	8630	8610	8590	8570	8551	8531
0,07	8511	8492	8472	8453	8433	8414	8395	8375	8356	8337
0,08	8318	8299	8279	8260	8241	8222	8204	8185	8166	8147
0,09	8128	8110	8091	8072	8054	8035	8017	7998	7980	7962
0,10	7943	7925	7907	7889	7870	7852	7834	7816	7998	7780
0,11	7762	7745	7727	7709	7691	7674	7656	7638	7621	7603
0,12	7586	7568	7551	7534	7516	7499	7482	7464	7447	7430
0,13	7413	7396	7379	7362	7345	7328	7311	7295	7278	7261
0,14	7244	7228	7211	7194	7178	7161	7145	7129	7112	7096
0,15	7079	7063	7047	7031	7015	6998	6982	6966	6950	6934
0,16	6918	6902	6887	6871	6855	6839	6823	6808	6792	6776
0,17	6761	6745	6730	6714	6699	6683	6668	6653	6637	6622
0,18	6607	6592	6577	6561	6546	6531	6516	6501	6486	6471
0,19	6457	6442	6427	6412	6397	6383	6368	6353	6339	6324
0,20	6310	6295	6281	6266	6252	6237	6223	6209	6194	6180
0,21	6166	6152	6138	6124	6109	6095	6081	6067	6053	6039
0,22	6026	6012	5998	5984	5970	5957	5943	5929	5916	5902
0,23	5888	5875	5861	5848	5834	5821	5808	5794	5781	5768
0,24	5754	5741	5728	5715	5702	5689	5675	5662	5649	5636
0,25	5623	5610	5598	5585	5572	5559	5546	5534	5521	5508
0,26	5495	5483	5470	5458	5445	5433	5420	5408	5395	5383
0,27	5370	5358	5346	5333	5321	5309	5297	5284	5272	5260
0,28	5248	5236	5224	5212	5200	5188	5176	5164	5152	5140
0,29	5129	5117	5105	5093	5082	5070	5058	5047	5035	5023
0,30	5012	5000	4989	4977	4966	4955	4943	4932	4920	4909
0,31	4898	4887	4875	4864	4853	4842	4831	4819	4808	4797
0,32	4786	4775	4764	4753	4742	4732	4721	4710	4699	4688
0,33	4677	4667	4656	4645	4634	4624	4613	4603	4592	4581
0,34	4571	4560	4550	4539	4529	4519	4508	4498	4487	4477
0,35	4467	4457	4446	4436	4426	4416	4406	4395	4385	4375
0,36	4365	4355	4345	4335	4325	4315	4305	4295	4285	4276
0,37	4266	4256	4246	4236	4227	4217	4207	4198	4188	4178
0,38	4169	4159	4150	4140	4130	4121	4111	4102	4093	4083
0,39	4074	4064	4055	4046	4036	4027	4018	4009	3999	3990
0,40	3981	3972	3963	3954	3945	3936	3926	3917	3908	3899
0,41	3890	3882	3873	3864	3855	3846	3837	3828	3819	3811
0,42	3802	3793	3784	3776	3767	3758	3750	3741	3733	3724
0,43	3715	3707	3698	3690	3681	3673	3664	3656	3648	3639
0,44	3631	3622	3614	3606	3597	3589	3581	3573	3565	3556
0,45	0,3548	0,3540	0,3532	0,3524	0,3516	0,3508	0,3499	0,3491	0,3483	0,3475
0,46	3467	3459	3451	3443	3436	3428	3420	3412	3404	3396
0,47	3388	3381	3373	3365	3357	3350	3342	3334	3327	3319
0,48	3311	3304	3296	3289	3281	3273	3266	3258	3251	3243
0,49	3236	3228	3221	3214	3206	3199	3192	3184	3177	3170
0,50	3162	3155	3148	3141	3133	3126	3119	3112	3105	3097
0,51	3090	3083	3076	3069	3062	3055	3048	3041	3034	3027
0,52	3020	3013	3006	2999	2992	2985	2979	2972	2965	2958
0,53	2951	2944	2938	2931	2924	2917	2911	2904	2897	2891
0,54	2884	2877	2871	2864	2858	2851	2844	2838	2831	2825

<i>D</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,55	2818	2812	2805	2799	2793	2786	2780	2773	2767	2761
0,56	2754	2748	2742	2735	2729	2723	2716	2710	2704	2698
0,57	2692	2685	2679	2673	2667	2661	2655	2649	2642	2636
0,58	2630	2624	2618	2612	2606	2600	2594	2588	2582	2576
0,59	2570	2564	2559	2553	2547	2541	2535	2529	2523	2518
0,60	2512	2506	2500	2495	2489	2483	2477	2472	2466	2460
0,61	2455	2449	2443	2438	2432	2427	2421	2415	2410	2404
0,62	2399	2393	2388	2382	2377	2371	2366	2360	2355	2350
0,63	2344	2339	2333	2328	2323	2317	2312	2307	2301	2296
0,64	2291	2286	2280	2275	2270	2265	2259	2254	2249	2244
0,65	2239	2234	2228	2223	2218	2213	2208	2203	2198	2193
0,66	2188	2183	2178	2173	2168	2163	2158	2153	2148	2143
0,67	2138	2133	2128	2123	2118	2113	2109	2104	2099	2094
0,68	2089	2084	2080	2075	2070	2065	2061	2056	2051	2046
0,69	2042	2037	2032	2028	2023	2018	2014	2009	2004	2000
0,70	1995	1991	1986	1982	1977	1972	1968	1963	1959	1954
0,71	1950	1945	1941	1936	1932	1928	1923	1919	1914	1910
0,72	1905	1901	1897	1892	1888	1884	1879	1875	1871	1866
0,73	1862	1858	1854	1849	1845	1841	1837	1832	1828	1824
0,74	1820	1816	1811	1807	1803	1799	1795	1791	1786	1782
0,75	1778	1774	1770	1766	1762	1758	1754	1750	1746	1742
0,76	1738	1734	1730	1726	1722	1718	1714	1710	1706	1702
0,77	1698	1694	1690	1687	1683	1679	1675	1671	1667	1663
0,78	1660	1656	1652	1648	1644	1641	1637	1633	1629	1626
0,79	1622	1618	1614	1611	1607	1603	1600	1596	1592	1589
0,80	1585	1581	1578	1574	1570	1567	1563	1560	1556	1552
0,81	1549	1545	1542	1538	1535	1531	1528	1524	1521	1517
0,82	1514	1510	1507	1503	1500	1496	1493	1489	1486	1483
0,83	1479	1476	1472	1469	1466	1462	1459	1455	1452	1449
0,84	1445	1442	1439	1435	1432	1429	1426	1422	1419	1416
0,85	1413	1409	1406	1403	1400	1396	1393	1390	1387	1384
0,86	1380	1377	1374	1371	1368	1365	1361	1358	1355	1352
0,87	1349	1346	1343	1340	1337	1334	1330	1327	1324	1321
0,88	1318	1315	1312	1309	1306	1303	1300	1297	1294	1291
0,89	1288	1285	1282	1279	1276	1274	1271	1268	1265	1262
0,90	1259	1256	1253	1250	1247	1245	1242	1239	1236	1233
0,91	1230	1227	1225	1222	1219	1216	1213	1211	1208	1205
0,92	1202	1199	1197	1194	1191	1189	1186	1183	1180	1178
0,93	1175	1172	1169	1167	1164	1161	1159	1156	1153	1151
0,94	1148	1146	1143	1140	1138	1135	1132	1130	1127	1125
0,95	1122	1119	1117	1114	1112	1109	1107	1104	1102	1099
0,96	1096	1094	1091	1089	1086	1084	1081	1079	1076	1074
0,97	1072	1069	1067	1064	1062	1059	1057	1054	1052	1050
0,98	1047	1045	1042	1040	1038	1035	1033	1030	1028	1026
0,99	1023	1021	1019	1016	1014	1012	1009	1007	1005	1002

Пользование таблицей. В вертикальном столбце под обозначением *D* даны плотности через 0,01; в верхнем вертикальном ряду даны обозначения плотностей через 0,001 под ними — коэффициенты пропускания.

Каждая единица плотности в десять раз уменьшает значение *T*.

<i>D</i>	<i>T</i>	<i>T</i> %	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>T</i> %
0,489	0,3243	32,4	2,489	0,0032	0,3
1,489	0,0324	3,2	3,489	0,00032	0,03

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

§ 1. Фотоэлементы эмиссионного типа. § 2. Фотоэлементы с заградительным слоем. § 3. Фотоэлементы резистивного действия.

Самым чувствительным приемником световой энергии в области спектра между $0,4-0,7 \mu$ является глаз; в отношении чувствительности с ним до сих пор не могут конкурировать никакие другие приемники. В ряде случаев, однако, если даже работа ведется в видимом свете, глаз оказывается мало удобным или совсем непригодным инструментом. Это может иметь место при регистрации быстро сменяющихся световых сигналов, в приборах оптической телеграфии и телефонии, во всякого рода блокировочных устройствах, аппаратах для подсчета числа входящих и выходящих из некоторой определенной зоны людей (в тоннелях, складах и т. д.) и пр. Наконец, замена глаза иным приемником неизбежна при работе в невидимых ультрафиолетовых или инфракрасных лучах.

Наибольшее распространение в этих случаях имеют устройства с фотоэлементом, чувствительным к соответствующей области спектра.

Теория фотоэлектрического эффекта дана выше (I, гл. 1, § 13).

В типах фотоэлементов и их конструкции имеется очень большое разнообразие. Существует также глубокое различие в самом принципе действия различных типов фотоэлементов. По характеру процессов, происходящих в светочувствительном слое под влиянием освещения, фотоэлементы можно разделить на три основных, резко различающихся между собой класса: фотоэлементы эмиссионного типа, фотоэлементы с так называемыми заградительным или запирающим слоем (иначе, вентильные) и, наконец, фотоэлементы резистивного действия (фотосопротивления).

§ 1. Фотоэлементы эмиссионного типа

Типичное устройство фотоэлемента эмиссионного типа изображено на рис. 162. Внутри стеклянного баллона на металлической подложке (серебро, никель) нанесен очень тонкий слой другого „активного“ металла (цезий, калий), чистого или находящегося в соединении с каким-либо другим веществом (кислород, сера,

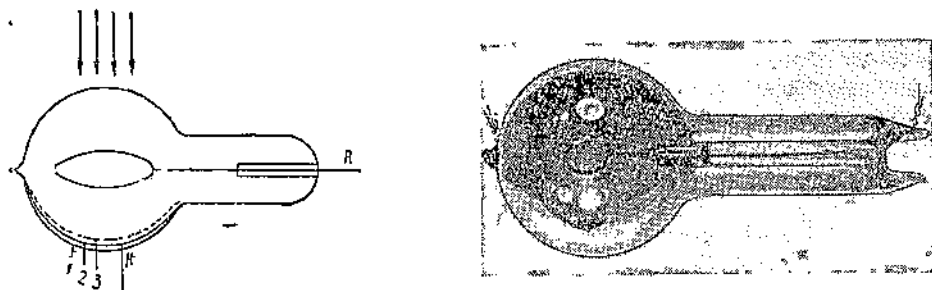


Рис. 162. Эмиссионный фотоэлемент

сурьма), которое повышает чувствительность слоя или сдвигает по спектру область чувствительности. В зависимости от конструкции фотоэлемента подложка наносится или непосредственно на внутреннюю поверхность баллона, или ею является специальная плоская пластинка, впаянная на ножке внутрь баллона. Подложка с нанесенным на нее слоем активного вещества служит одним электродом фотоэлемента — катодом и имеет вывод через стенку баллона для подключения фотоэлемента к электрической цепи. Анодом служит обычно металлическая проволока в виде петли или рамки, также впаянная внутрь баллона и хорошо изолированная в электрическом отношении от катода. Воздух из баллона откачивается, и фотоэлемент или остается вакуумным, или наполняется газом, инерт-

ным в отношении вещества катода. Первые, как известно, носят название вакуумных или пустотных, вторые — газонаполненных фотоэлементов.

Освещение катода освобождает из его поверхности электроны, и если между катодом и анодом имеется ускоряющее электрическое поле, то ими создается электрический ток через фотоэлемент. Обычно в цепь элемента включается батарея питания на 80—240 вольт. С чисто электрической точки зрения фотоэлемент эмиссионного типа можно рассматривать как устройство, генерирующее под действием света электрический ток и имеющее очень высокое внутреннее сопротивление. Пропуская фототок через высокое сопротивление, можно получить на нем, даже при малой силе тока, значительное падение напряжения, которое затем, при помощи ламповой схемы можно усиливать. Сила тока, протекающая через фотоэлемент, пропорциональна интенсивности светового потока, падающего на его катод. В темноте тока нет, и сам по себе фотоэлемент, если пренебречь ничтожными токами утечки через изоляцию (10^{-12} — 10^{-16} А), является устройством, не проводящим тока.

Чувствительность фотоэлемента эмиссионного типа обычно характеризуют числом протекающих через фотоэлемент микроампер, рассчитанным на один люмен светового потока, падающего на его катод, и обычно указывается в паспорте, к нему приложенном. Для пустотных кислородно-цезиевых фотоэлементов она имеет величину порядка 7—10 μ А на люмен. Самые чувствительные из вакуумных фотоэлементов — сурьмяно-цезиевые — дают около 80 μ А/лм. Это значит, что при диаметре окошка фотоэлемента в 5 см освещенность катода, при которой сурьмяно-цезиевый фотоэлемент будет давать ток в одну десятую миллиампера, должна быть около 600 люксов, а для кислородно-цезиевого — до 5000 люксов (данные относятся к источнику света с цветовой температурой* 2400°К). Сила фотоэлектрического тока зависит от напряжения, приложенного к фотоэлементу. При небольших разностях потенциалов между катодом и анодом часть вылетевших из катода электронов может не достигнуть анода и задержаться на других частях фотоэлемента. С увеличением разности потенциалов доля электронов, улавливаемых анодом, увеличивается до тех пор, пока все электроны, вылетающие из катода, достигнут анода. У пустотных фотоэлементов это значение тока является предельным для данного освещения, и дальнейшее повышение напряжения не влечет за собой его увеличения. Наступает „насыщение“. Рабочее напряжение пустотных фотоэлементов должно находиться в области насыщения вольт-амперной характеристики, так как при этом случайные колебания напряжения в цепи фотоэлемента не оказывают существенного влияния на фототок. У газонаполненных фотоэлементов при повышении напряжения происходит ионизация газа, наполняющего баллон, и образовавшиеся ионы принимают участие в электрическом токе. Чем больше повышается напряжение, тем больше ионизация, тем больше ток через фотоэлемент. Вольт-амперная характеристика газонаполненного фотоэлемента поэтому резко отличается от характеристики пустотного (рис. 163). При слишком высоком напряжении ионизация может стать настолько большой, что станет возможным электрический разряд через газ, который начинает светиться. Потенциал, при котором наступает это явление, носит название „потенциала зажигания“. Рабочее напряжение всегда должно быть на 30—50 вольт ниже потенциала зажигания, так как при газовом разряде чувствительный слой разрушается и фотоэлемент выходит из строя. Кроме того, вблизи потенциала зажигания его работа становится неустойчивой. Потенциал зажигания и предельное значение рабочего напряжения также указываются в паспорте, прилагаемом к фотоэлементу. Обычно первый имеет величину порядка 300 вольт, а второй — 250 вольт. За счет ионизации чувствительность газонаполненных фотоэлементов в 5—8 раз больше, чем у пустотных, но из-за отсутствия насыщения, при неизменной освещенности катода, фототок не остается неизменным при колебаниях напряжения на зажимах фотоэлемента. В особенности это начинает сказываться при значительных колебаниях освещенности и если в цепи фотоэлемента имеется

* См. I, гл. I, § 11.

высокое омическое сопротивление, например входное сопротивление лампового усилителя. На фотоэлементах получаются колебания напряжения, сопровождающиеся соответствующими изменениями его чувствительности. Поэтому, когда требуется повышенная точность работы, как, например, при точном фотометрировании, следует рабочую точку для напряжения на вольт-амперной характеристике выбирать, по возможности, дальше от потенциала зажигания или, что еще лучше, пользоваться вакуумными фотоэлементами. Также предпочтительнее пользоваться последними в случае приема сигналов высокой частоты или при фотометрировании кратковременных вспышек, так как при частотах выше 5000—6000 герц уже сказывается инерционность газонаполненных фотоэлементов. Пустотные фото-

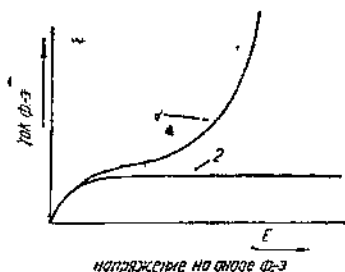


Рис. 163. Вольт-амперная характеристика фотоэлементов:
1 — газонаполненный; 2 — вакуумный

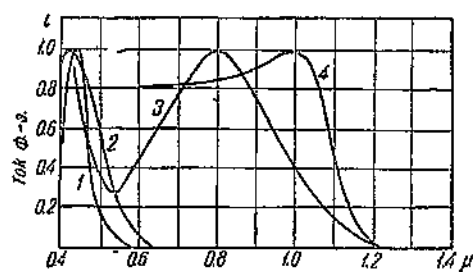


Рис. 164. Кривые спектральной чувствительности фотоэлементов:
1 — калпевый; 2 — сурьмяно-цезиевый; 3 — кислородно-цезиевый; 4 — телуридный

элементы практически безинерционны, запаздывание фототока в них относительно момента начала освещения меньше одной миллиардной доли секунды. Этим объясняется необходимость использования вакуумных фотоэлементов в телевизионных установках.

Кривые спектральной чувствительности различных фотоэлементов изображены на рис. 164. Область чувствительности цезиевых оксидированных фотоэлементов простирается на всю длинноволновую и близкую инфракрасную часть спектра. Максимум кривой находится вблизи 0,9 м, а практический предел чувствительности — вблизи 1,3—1,4 м. В ультрафиолетовой области лежит второй максимум чувствительности, но им обычно на практике пользоваться не приходится.

В различного рода фотометрических устройствах для видимого спектра удобнее пользоваться сурьмяно-цезиевыми фотоэлементами. Помимо того, что они отличаются высокой чувствительностью, они удобнее еще и тем, что область их чувствительности распространяется почти на весь видимый спектр и имеет максимум вблизи 0,42 м. При помощи светофильтра кривую его спектральной чувствительности можно привести к кривой видности глаза при меньшей потере общей чувствительности, чем кривую чувствительности кислородно-цезиевого фотоэлемента, имеющего глубокий провал в зеленой части спектра.

Фотоэлементы для ультрафиолетовых лучей имеют до сих пор весьма слабое распространение вследствие относительной сложности в устройстве и питании соответствующих источников света, необходимости применения кварцевой или зеркальной оптики и трудности в подборе хороших светофильтров.

Говоря о фотоэлементе с внешней эмиссией, нельзя умолчать о третьей группе фотоэлементов этого класса: фотоэлементов с вторичной эмиссией. Их отличие от распространенных вакуумных фотоэлементов заключается в введении между основным катодом и анодом одного или большего числа вспомогательных электродов, также покрытых слоем цезия. Схема такого фотоэлемента с одним

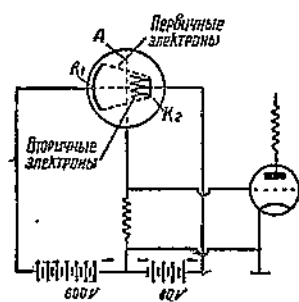


Рис. 165. Схема фотоэлемента со вторичной эмиссией

дополнительным электродом изображена на рис. 165 (Всесоюзный Электротехнический институт, конструкция Тимофеева и Шипалова). Свет падает на фотокатод k_1 . Вылетевшие с него электроны ускоряются в направлении анода A , представляющего собою сетку. Так как ускоряющее поле создается очень большим — 600—800 вольт, — большая часть их пролетает через отверстие в аноде и достигает второго, меньшего по размерам, вторичного катода k_2 . При проникновении электронов в слой цезия из него вырываются вторичные электроны, число которых может быть в 8—10 раз больше числа электронов в первичном пучке. Вторичные электроны, в свою очередь, направляются к аноду и задерживаются им, так как потенциал вторичного катода k_2 всего лишь на 80—120 вольт ниже потенциала анода. Разработаны конструкции фотоэлементов, в которых имеется не одно, а несколько последовательных „отражений“ от ряда вспомогательных катодов, давая при каждом из них соответствующее усиление (трубки Тимофеева, Кубецкого, Фарисворта). При соответствующем числе вторичных катодов удается достичь усиления в сотни тысяч и даже в миллионы раз. В военной практике эти фотоэлементы еще не применяются, с одной стороны, вследствие сложности схемы их включения, а с другой, — вследствие необходимости тщательного подбора и поддержания постоянства потенциала на каждом из вспомогательных электродов. Малейшие колебания напряжения, изменение величины токов, утечки внутри фотоэлемента и другие более глубокие причины, касаться которых здесь не будем, ведут к непостоянству работы сложного фотоэлемента, что выражается в появлении сильных шумов и тресков, если на выходе усилительного устройства включен телефон.

§ 2. Фотоэлементы с заградительным слоем

Вентильные фотоэлементы представляют другой класс фотоэлементов, резко отличающийся от фотоэлементов эмиссионного типа как в отношении принципа действия, так и их конструкции и свойств. Наибольшей известностью из фотоэлементов этого класса пользуются селеновые фотоэлементы. Схематический разрез селенового фотоэлемента с заградительным слоем показан на рис. 166. На железную пластинку 1 нанесен тонкий слой селена 2, поверх которого напыляется тонкий полупрозрачный слой металла (золото, платина), являющийся вторым электродом 3. Первым электродом служит железная подложка. При соответствующих условиях на границе между верхней пленкой металла и селеном образуется тончайший переходный слой, получивший название заградительного, или запирающего, наличие которого обязано существованию фотоэффекта у этой системы. Заградительный слой обладает униполярной проводимостью. Его сопротивление для тока в направлении от верхнего слоя

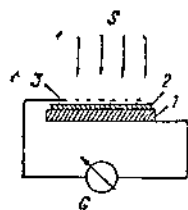


Рис. 166. Схема вентильного фотоэлемента

к нижнему иное, чем от нижнего к верхнему. Возникающие под действием света электрические заряды создают на заградительном слое разность потенциалов. При замыкании электродов внешней цепью в ней течет ток, исчезающий при затемнении фотоэлемента. В электрическом отношении эта система может рассматриваться как генератор электродвижущей силы, величина которой зависит от интенсивности освещения фотоэлемента. Внутреннее сопротивление его не велико, оно измеряется тысячами, иногда двадцатью-тридцатью тысячами омов. Если сопротивление внешней цепи мало по сравнению с внутренним сопротивлением фотоэлемента, сила тока в ней пропорциональна освещенности на поверхности фотоэлемента, по крайней мере при освещенностях, не превосходящей нескольких тысяч люксов. При больших сопротивлениях внешней цепи линейность фототока от освещенности нарушается. Ток отстает от освещения. Это обстоятельство нужно иметь в виду, например, при выборе гальванометра для измерения силы тока.

Чувствительность селеновых фотоэлементов этого типа порядка 300 $\mu A/lm$. в отдельных случаях достигает 500 $\mu A/lm$.

Отсутствие необходимости батарей питания выгодным образом отличает эти фотоэлементы от фотоэлементов других типов. Однако имеется и весьма существенный недостаток, препятствующий применению их в технических устройствах. Развиваемая фотоэлементом электродвижущая сила невелика. Невелико, как указывалось, их внутреннее сопротивление. Поэтому усиление фототоков от них при помощи ламповых схем представляет большие трудности.

Область применения этих фотоэлементов ограничивается случаями, когда можно обойтись токами порядка 10^{-8} — 10^{-6} А, пользуясь стрелочными гальванометрами соответствующей чувствительности и небольшим внутренним сопротивлением (около 100 ом). Это могут быть различного рода люксметры и такие автоматические устройства, в которых роль реле может исполнить легкий подвижной механизм, как, например, стрелка гальванометра, замыкающая при своем отклонении тот или другой контакт.

В отличие от фотоэлемента с внешней эмиссией, фотоэлементы с запирающим слоем характеризуются высокой инерционностью, проявляющейся уже при частотах около 3000 герц. Причина этого лежит в том, что при весьма тонком слое селена фотоэлемент представляет собой конденсатор весьма большой емкости, которая определяет величину его временной постоянной. Кривая его частотной характеристики представлена на рис. 167.

Из других фотоэлементов с заградительным слоем известны так называемые купроксные или меднозакисные фотоэлементы, в которых вместо селена применяется закись меди на медной подкладке; серно-таллиевые — с активным слоем, представляющим собой сложное соединение таллия, серы и кислорода, и серно-серебряные („Фэсс“)*. Купроксные фотоэлементы менее чувствительны, чем селеновые, зато область их спектральной чувствительности продолжается довольно далеко в инфракрасную область. У серно-таллиевых фотоэлементов с заградительным слоем еще большая чувствительность, чем у селеновых фотоэлементов, и большее внутреннее сопротивление, позволяющее более выгодным образом применять ламповое усиление. В отношении стабильности они, однако, оставляют желать лучшего. Максимум спектральной чувствительности серно-таллиевых и серно-серебряных фотоэлементов лежит в близкой инфракрасной области (около 1000 $m\mu$).

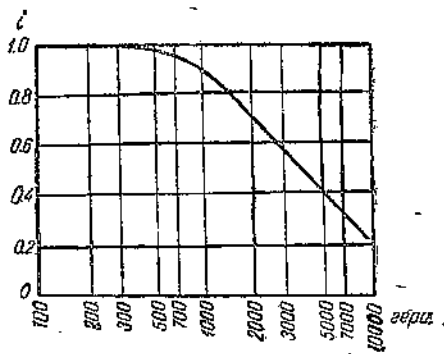


Рис. 167. Частотная характеристика селенового фотоэлемента

§ 3. Фотоэлементы резистивного действия

К третьему классу фотоэлементов относятся фотоэлементы резистивного действия, или, как их называют иначе, фотосопротивления. Из самого названия явствует, что эти фотоэлементы не являются генераторами тока или напряжения. Их действие основано на свойствах некоторых веществ изменять свою электропроводность при освещении тем или другим участком спектра. Таких веществ очень много, можно было бы привести несколько десятков наименований, но пригодных для практических применений можно из них назвать только четыре: селен, сернистый висмут, молибденит и таллофид. Селеновые элементы сопротивления были самыми первыми фотоэлементами. Они применялись с большим или меньшим успехом в самых разнообразных технических конструкциях раньше, чем был открыт внешний фотоэффект. Теперь резистивные селеновые фотоэлементы совсем вышли из употребления, так как пользование ими сопряжено с рядом неудобств, избежать которые в значительной мере, если не полностью,

* Фотоэлементы „Фэсс“ изготавливаются Физическим институтом Украинской Академии наук.

удается применением других фотоэлементов. Они отличаются сравнительно невысоким темновым сопротивлением — обстоятельство, затрудняющее ламповое уси-

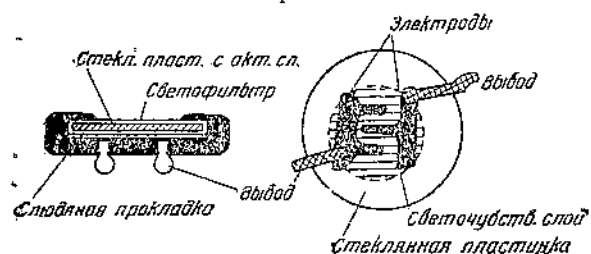


Рис. 168. Схема талофида

ления в американской армии оптического телеграфа и телефона с кристаллами молибденита, во французской — фотоэлементов из сернистого висмута, однако после открытия нового, более чувствительного вещества, получившего название „талофид“ (Talofide), ими перестали пользоваться, тем более что естественные кристаллы молибденита, достаточных размеров и обладающие значительной чувствительностью к освещению, в природе встречаются редко.

Серно-галлиевые фотоэлементы сопротивления — талофиды — имеют большую распространенность. Их чувствительный слой представляет собою, так же как и в фотоэлементах с заградительным слоем, соединения галлия, серы и кислорода. Впервые это вещество было изготовлено американским исследователем Кезом в 1922 г. Долгое время способ его изготовления сохранялся в секрете. Были опубликованы лишь основные сведения об их свойствах. В результате работ различных лабораторий фотоэлементы этого типа более или менее сходного состава и свойств стали изготавливаться почти во всех государствах: во Франции, Германии, Италии, Японии.

Устройство талофидного фотоэлемента схематически изображено на рис. 168. Чувствительный слой заполняет промежуток между двумя электродами на поверхности подложки из изолирующего материала. Для увеличения линии электродов им часто придают форму гребешка, причем зубцы одного заходят в промежутки другого. Этим достигается увеличение действующей площадки активного слоя и уменьшение темнового сопротивления, так как это вещество отличается весьма высоким сопротивлением. По своему оформлению талофидные фотоэлементы различных фирм отличаются друг от друга. Некоторые фирмы считают необходимым пластинку с чув-

ствительным слоем заключать в evacuated или наполненный инертным газом стеклянный баллон. На рис. 169 приводится фотография такого фотоэлемента фирмы Ролла (Италия). Подобное же устройство имеют талофиды Кеза. На рис. 170 изображена несколько отличная от приведенной выше конструкция талофидного фотоэлемента, выпускаемого фирмой Цейсс для оптических телефонов. Пластинка с талофидным слоем находится внутри свинчивающегося из двух частей цоколя — футляра из изолирующего материала типа карболит. Тонкий слой прозрачного лака

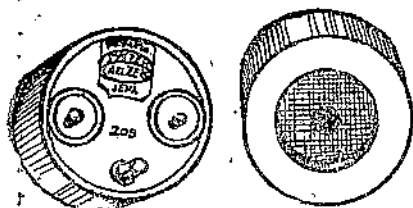


Рис. 170. Талофид Цейсса

с хорошими изолирующими свойствами на поверхности чувствительного слоя защищает его от пыли и атмосферной влаги.

Кривая спектральной чувствительности талофидных фотоэлементов дана на рис. 164. Максимум находится в близкой инфракрасной области — около 1 м. Со

ление, большим непостоянством во времени и значительной инертностью. Область чувствительности лежит в дальноволновом конце видимого спектра с максимумом около 0,7 м.

Сернистый висмут и молибденит также практически теперь не применяются. Правда, в литературе можно найти указания на безуспешные попытки приме-

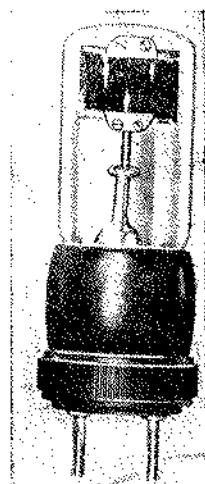


Рис. 169. Талофид Ролла

стороны длинных волн кривая чувствительности быстро спадает. Для излучения с длиной волны больше $1,2 \mu$ талофид практически не чувствителен. В сторону видимого спектра понижение чувствительности идет значительно медленнее. Свет с длиной волны короче $0,5 \mu$ оказывает на талофиды вредное действие: их чувствительный слой теряет чувствительность. Поэтому в большинстве случаев окно фотоэлемента прикрывается красным светофильтром.

Фотоэлементы резистивного действия требуют включения вспомогательной батареи на 10—30 вольт. Темновое сопротивление талофидных фотоэлементов сильно варьирует в зависимости от способов их изготовления и измеряется мегомами и даже тысячами мегомов. Наиболее удобное сопротивление для работы с устройствами, содержащими усилительные схемы, — от нескольких мегомов до 10—20 мегомов. Оно не так велико по сравнению с сопротивлением утечки между сеткой и катодом обычных усилительных ламп, как внутреннее сопротивление фотоэлементов эмиссионного типа. Этим объясняется тот факт, что в приборах, предназначенных для работы в полевых условиях, когда трудно обеспечить надежную изоляцию, предпочтение оказывается талофидным фотоэлементам, а не цезиевым, невзирая на то, что первые обладают рядом довольно существенных

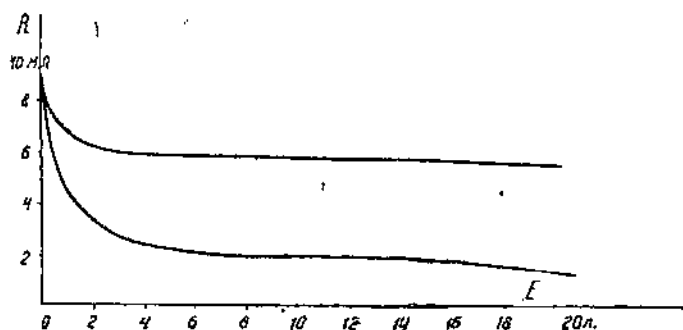


Рис. 171. Световая характеристика талофидных фотоэлементов фирмы Оффичине Галилео (2 типа)

недостатков, от которых свободны фотоэлементы с внешней эмиссией. Их световая характеристика, в отличие от рассмотренных выше типов фотоэлементов, не имеет вида линейной зависимости (рис. 171). При малых освещенностях относительное изменение сопротивления больше, чем при больших. Следовательно, и чувствительность талофида получается большей, когда он защищен от постороннего света. Засветка его, например, светом неба, дневным рассеянным светом, попадающим в поле приема прибора, в котором установлен талофид, значительно снижает чувствительность. Другое следствие нелинейности световой характеристики — возможность искажения сигналов при больших амплитудах изменения их силы света. Наконец, талофиды, находящиеся под напряжением, и в темноте и при постоянном освещении довольно часто „текут“, т. е. их сопротивление плавно и непрерывно изменяется. Как правило, чем выше приложенное напряжение, тем больше текучесть. Нередки также случаи внезапных скачкообразных изменений сопротивления, отмечаемые при приеме на слух в форме тресков и шумов, мешающих нормальному приему.

Сопротивление лучших образцов талофидных фотоэлементов при переходе от темноты к освещенности в 1 люкс на поверхности защитного светофильтра (источник света — лампа накаливания с цветовой температурой около 2300°K) понижается вдвое. У большинства фотоэлементов в этих условиях понижение сопротивления происходит на 20—30% от его темнового значения. При эксплуатации талофидных фотоэлементов нужно следить за тем, чтобы диаметр освещенной зоны их активного слоя был не меньше расстояния между электродами. При световом пятне меньших размеров не будет использоваться полностью чувствительность фотоэлемента. Большее увеличение размеров пятна практически мало

повышает чувствительность, но несколько может улучшить постоянство работы фотоэлемента.

Кривая рис. 172 представляет собою инерционную характеристику чувствительного слоя. В действительности инерционность всей электрической цепи с фотоэлементом и большим входным сопротивлением усилителя получается больше. При сопротивлении в несколько мегомов даже небольшие емкости проводов, выводов и т. д. заметным образом влияют на частотную характеристику системы. Заметные искажения сигналов при слишком высоком входном сопротивлении усилителя наступают уже при относительно невысокой звуковой частоте. В телефонном приеме это выражается в сильном изменении тембра вследствие выпадения высших обертонов, имеет место „басистый“ прием, понижается разборчивость речи.

Область применения таллофидных фотоэлементов — различного рода приборы оптической телефонной и телеграфной связи, блокировки, сигналов ограждения и т. д., работающих на инфракрасных лучах и предназначенных для эксплуатации в полевых условиях.

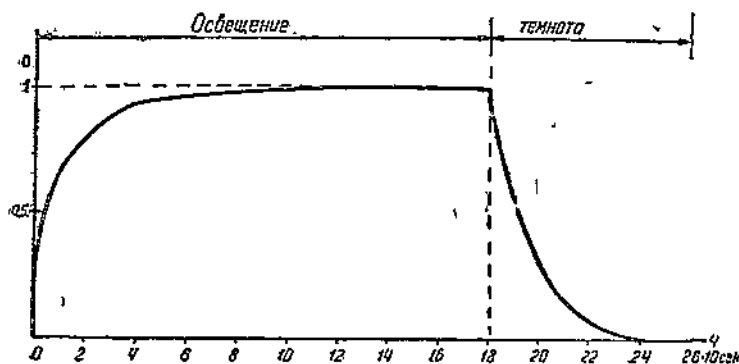


Рис. 172. Инерция таллофидного фотоэлемента

Глава 6

ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

§ 1. Введение. Основные понятия. § 2. Люминофоры временного действия. § 3. Светящиеся составы постоянного действия. § 4. Органические люминофоры. § 5. Нанесение люминофоров. § 6. Применение люминесцирующих материалов в военном деле.

§ 1. Введение. Основные понятия

Люминесцирующие вещества, или „люминофоры“, т. е. вещества, испускающие свет в холодном состоянии, в отличие от обычных горячих источников света, находят за последнее время все более и более широкое применение в жизни и технике, в частности в военной. Общеизвестно применение светящихся красок на циферблатах часов, на стрелках компасов, на шкалах авиационных измерительных приборов и т. д. На улицах городов, затемненных с целью маскировки, можно видеть слабо светящиеся надписи и указатели, на экранах телевизионных приемников вспыхивает изображение, рисуемое пучком летящих электронов. Во всех этих случаях источник света остается холодным — испускаемый свет не является результатом нагревания тела. Однако для того, чтобы тело могло светиться, — испускать лучистую энергию, не поглощая тепла, — к нему необходимо подвести энергию в какой-либо другой форме, нужно, как говорят, „возбудить“ его. Возбужденное вещество может излучить поглощенную энергию либо сразу же после возбуждения, в этом случае говорят о мгновенном свечении — флуоресценции, либо в течение более или менее длительного промежутка времени — случай так называемой фосфоресценции, когда накопленная энергия отдается телом посте-

ленно *. В первом случае свечение длится обычно миллиардные доли секунды, во втором — минуты, часы, а иногда даже месяцы. Энергия, необходимая для возбуждения вещества, может подводиться в самой разнообразной форме: простым механическим ударом, в виде энергии, освобождающейся при химических реакциях, летящими электронами или светом — видимым или невидимым. Продукты распада радиоактивных веществ также могут являться источником возбуждения. Если источник возбуждения неразрывно связан с люминесцирующим веществом, внедрен в него и действует непрерывно в течение долгого времени, то светящийся состав называется составом постоянного действия. Таковы все светящиеся вещества с радиоактивными препаратами, являющимися практически бесконечно долго действующими источниками возбуждения. Напротив, если светящийся состав нуждается в предварительном возбуждении от внешнего источника и свечение его практически прекращается спустя несколько минут, часов или, в лучшем случае, нескольких суток после возбуждения, он может быть назван составом временного или переменного действия. Наибольшее распространение имеют светящиеся составы временного действия, возбуждаемые видимым или ультрафиолетовым светом — их свечение длится обычно несколько минут или часов. На экранах рентгеновских кабинетов и в телевизионных приемниках применяются люминофоры со значительно более коротким свечением, затухающим через сотые и тысячные доли секунды после прекращения возбуждения. Длительность свечения, возбужденного энергией, освобождающейся при химических реакциях, может достигать, в зависимости от характера реакции и условий ее проведения, — до нескольких часов и даже суток.

По природе свечения люминофоры могут быть разделены на две принципиально различные группы. К первой, наиболее важной в техническом отношении, принадлежат люминофоры, обладающие правильной кристаллической структурой, способность которых светиться появляется при введении в кристаллическую решетку основного вещества атомов посторонних веществ. Свечение люминофоров другой группы, к которой относятся огромное большинство органических и некоторые неорганические люминесцирующие соединения, является свойством, присущим молекулам самого светящегося вещества, и не связано обычно со структурой тела. В первом случае сильно проявляется фосфоресценция, во втором — флуоресценция. В люминофорах первой группы высвечивание накопленной энергии ускоряется внешним воздействием, например нагреванием. Обычно свечение достаточно ярко уже при комнатной температуре, однако известен ряд люминофоров, свечение которых появляется лишь при более высоких температурах. При достаточно сильном охлаждении все люминофоры этой группы перестают светиться, и энергия возбуждения, накопленная в них, может сохраняться в течение очень длительного промежутка времени. Но стоит нагреть такой «замороженный» источник света, как появляется свечение, затухающее более или менее быстро, в зависимости от температуры, до которой нагрет люминофор. Накопленная телом энергия возбуждения может быть извлечена также посредством облучения длинноволновыми (красными или инфракрасными лучами). Вещества, относящиеся ко второй группе, свечение которых определяется внутренними свойствами атомов и молекул, образующих тело, не обнаруживают такой температурной зависимости.

Одной из наиболее важных закономерностей люминесценции является так называемый закон Стокса, согласно которому испускаемый свет люминесценции обладает в среднем большей длиной волны, чем поглощенный, возбуждающий свет. Так как энергия длинноволновых квантов меньше энергии коротковолновых, то закон Стокса является частным выражением общего закона сохранения энергии. Из закона Стокса следует, что видимая люминесценция может быть возбуждена лишь коротковолновым участком видимого спектра и невидимыми ультрафиолетовыми лучами; красные и невидимые инфракрасные лучи не способны возбуж-

* Термин «фосфоресценция» и распространенное название фосфоресцирующих тел — фосфор не имеет никакого отношения к химическому элементу фосфору, длительное свечение которого обусловлено медленным окислением за счет кислорода воздуха.

дать люминесценцию, расположенную в видимой части спектра. Инфракрасные лучи могут только, как указывалось, вызывать ускорение высвечивания накопленной энергии возбуждения. Кроме того, инфракрасные лучи в некоторых случаях способны тушить свечение высвечивающегося фосфора. Эта способность также находит себе, как увидим, технические и, в частности, военные применения.

§ 2. Люминофоры временного действия

Люминофоры временного действия, как уже говорилось, могут быть разделены на две принципиально различные группы. К первой относятся светящиеся составы, в которых свечение вызывается обязательным присутствием посторонней примеси, называемой активатором. Свечение люминофоров второй группы определяется строением самих молекул. Безактиваторные люминофоры неорганического типа — урановые и платино-сиеродистые соли и также редкие земли — имеют фосфоресценцию малой длительности и широкого применения в военном деле не нашли.

В дальнейшем мы остановимся на физико-химических свойствах, главным образом, первой группы люминофоров. При изготовлении люминофоров, активированных примесями металлов, в качестве основного вещества берется обычно какое-нибудь сернистое соединение: ZnS , CaS , SrS и т. д. Процесс затухания люминофоров зависит как от основного вещества, так и от примесей. Исходные продукты должны быть очень чистыми. Загрязнения основного материала вызывают в спектре излучения, помимо полос, соответствующих вводимому активатору, еще полосы, обязанные своим появлением ничтожным количествам загрязнений.

Недостаточная чистота основного рабочего вещества, кроме добавочных случайных полос в спектре излучения, вызывает обычно ослабление интенсивности свечения вследствие физического, а также химического тушения.

Разработано много методов очистки исходных материалов люминофоров, которые подробно излагаются в специальной литературе по флуоресценции и фосфоресценции. Для получения надежных результатов требуется исключительная чистота всех компонентов люминофора, т. е. основного вещества, активатора и плавня. Наиболее жесткие требования предъявляются к основному веществу ввиду преобладания его массы. Люминофоры, применяемые в технике, должны иметь примеси в концентрации, не превышающей 10^{-8} г/см³. Обычные методы очистки исходных продуктов недостаточны. Применяются комплексные приемы: перекристаллизация, фракционное осаждение, высаливание, электролиз и т. д. Прокаливание сернистого соединения производится обычно при высокой температуре, а введение активатора требует пониженной температуры. Поэтому к основному веществу и активатору необходимо добавлять специальный плавень, который при сравнительно невысокой температуре превращает всю смесь в однородную массу. Назначение плавней состоит не только в облегчении перевода смеси в кристаллическое состояние, но и в усилении желательных полос в спектре испускания. В качестве плавней употребляются соли лития, натрия, калия, магния, бария, стронция, кальция и др.

Для цинковых люминофоров в качестве плавней рекомендуется применять хлористые соединения $LiCl$, $NaCl$, KCl , $BaCl_2$.

Длительное облучение люминофора светом (в особенности солнечным) иногда вызывает разложение люминофора. Большое значение при этом имеет неустойчивость плавней и в меньшей степени — основного вещества.

На определенной стадии приготовления люминофора к основному веществу добавляется нужное количество металла активатора, который и вызывает появление определенных полос свечения. Светосоставы принято обозначать условно следующим образом: на первом месте ставится химический символ основного вещества, на втором — активатор, на третьем — плавень и на последнем — греческой буквой обозначается полоса излучения, например: $CaSmnNa-\alpha$.

Содержание активатора, выраженное в долях нормального, обозначается символически буквой n с соответствующим коэффициентом, например $CaScu\ 0,01\ n$. Здесь коэффициент 0,01 обозначает долю нормальной концентрации при тех условиях, когда при возбуждении получается максимум яркости свечения.

Наиболее часто применяемые для технических целей люминофоры ZnS , активированные медью, дают зелено-желтое свечение большой начальной яркости. Меняя активатор, можно при той же основе люминофора получить светосоставы с различными световыми свойствами.

При введении в ZnS в качестве активаторов Ag , Ni , Co , Cd можно получить свечение с короткой длительностью — флуоресценцию; напротив, Cu , Mn , Sm , Ce , Sn и другие дают длительное свечение (фосфоресценцию).

Одновременное введение в фосфор нескольких активаторов в большинстве случаев ослабляет, а в отдельных случаях полностью уничтожает свечение. Люминесценция сернистого цинка, активированного медью, ослабевает на 60% при введении железа в количестве 10^{-3} ; при концентрации 10^{-4} интенсивность свечения понижается до 1%. Для фосфора CaS , активированного Cu , присутствие Bi в соответствующих количествах уничтожает полностью свечение.

Основными физическими характеристиками люминофоров, активированных тяжелыми металлами, являются: закон затухания, выход люминесценции, спектры излучения и поглощения и световые суммы.

Затухание рассматриваемого типа фосфоров протекает в широком интервале (но не всюду) по гиперболическому закону*. Например затухание цинко-сульфидных люминофоров может быть описано формулой

$$I = At^{-\alpha},$$

где α — постоянная величина, равная 1,15 для $ZnSCu$.

На рис. 173 приведены экспериментальные кривые затухания фосфора $ZnSCu-\alpha$. Угловой коэффициент экспериментальной кривой дает значение постоянной α . Хорошая применимость гиперболической формулы доказана также для щелочно-земельных люминофоров.

Зная закон высвечивания и начальное значение интенсивности, легко найти значение величины так называемой световой суммы L люминофора. Световой суммой называют полное количество световой энергии, излучаемое люминофором от момента прекращения возбуждения до окончания процесса высвечивания. Световая сумма, в свою очередь, позволяет определить выход люминесценции, т. е. отношение энергии, излучаемой люминесценцией, к энергии, поглощенной люминофором. Для этого необходимо найденное экспериментально значение световой суммы разделить на количество энергии, поглощенной фосфором. Экспериментальная задача определения абсолютного выхода кристаллических люминофоров очень сложна и поэтому практически решена только для немногих случаев.

Во всех этих случаях оказалось, что абсолютный выход близок к единице, т. е. практически вся поглощенная энергия излучается люминофором. Так, например, абсолютный выход свечения люминофора CaS_{Bi} при возбуждении линией 436 $m\mu$ (максимум спектра излучения 440 $m\mu$) равняется 0,97. Для сернистого цинка, активированного медью, при возбуждении линией 436 $m\mu$ выход люминесценции составляет 0,84 (для полосы излучения $\alpha = 515 m\mu$).

Из всего огромного множества светосоставов временного действия практически особенно важны четыре группы люминофоров: 1) сульфиды и оксиды щелочно-земельных металлов, 2) сульфиды и оксиды цинка, цинко-магниевого и цинко-кальциевого люминофоры, 3) вольфраматы и молибдаты и, наконец, 4) силикатные фосфоры.

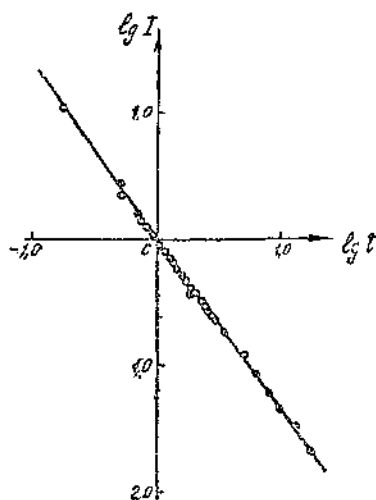


Рис. 173. Затухание фосфора. $ZnSCu-\alpha$

* См. Левшин [39], стр. 55.

Для военных нужд чаще всего применяются первые две группы люминофоров. Наиболее употребительными из сульфидов и оксидов щелочно-земельных фосфоров являются: CaS , SrS , BaS , MgS , CaO , SrO , MgO и BaO .

В качестве активаторов наилучшие результаты дают Bi , Cu , Mn , Pb , а также менее употребительные Ag , Ni , CO , Zn , редкие земли и др.

Техника получения щелочно-земельных люминофоров, а также основные физические закономерности их подробно изучены школой Ленарда, а поэтому их нередко называют „ленардовскими фосфорами“.

Большая длительность свечения щелочно-земельных люминофоров является одним из главных их достоинств. Подбирая наиболее выгодные температурные режимы, в последние годы стали получать щелочно-земельные фосфоры, обладающие очень большой длительностью свечения. Особенно известны в этом отношении люминофоры CaSBi и SrSBi , у которых заметное свечение продолжается несколько часов (4—6). Светящийся голубоватым светом SrSBi характеризуется наибольшей световой суммой и продолжительностью высвечивания. Спектры поглощения щелочно-земельных фосфоров имеют несколько сравнительно узких полос, ширина которых не превышает 30 $\text{m}\mu$. Наоборот, полосы излучения их широки, ширина их иногда достигает 100 $\text{m}\mu$. Только щелочно-земельные фосфоры, активированные редкими землями, дают весьма узкие полосы эмиссии.

Начальная интенсивность свечения щелочно-земельных фосфоров меньше, чем у цинковых фосфоров, но зато они имеют значительно большую длительность свечения.

Сульфиды щелочно-земельных фосфоров характеризуются хорошей возбудимостью от дневного света. Практическое применение большей частью нашли усложненные люминофоры щелочно-земельного типа с несколькими растворителями и активаторами, например: голубые и синие $\text{CaBaS} \cdot \text{BiBe}$, $\text{CaSrBaS} \cdot \text{BiBe}$, $\text{CaSrS} \cdot \text{BiBe}$.

При практическом употреблении этих люминофоров необходимо учитывать температурную зависимость законов затухания. Количественные данные по изменению световой суммы L и показателя затухания α , в зависимости от температуры, для CaSBi приведены в табл. 25*.

Таблица 25

$t^{\circ}\text{C}$	α	L	$t^{\circ}\text{C}$	α	L
—183	0,84	179	92	1,18	1335
— 60	0,92	1090	100	1,11	1070
0	0,99	1500	150	1,10	382
26	1,03	2250	185	1,10	555
38	1,04	2490	250	1,12	275
50	1,07	2560	300	1,10	180
			400	1,09	80

Из данных таблицы видно, что при низких температурах затухание идет медленно, показатель затухания α имеет минимальное значение 0,84, а световая сумма равна 179. При повышении температуры значение показателя затухания возрастает, а затем в довольно широком интервале температур α не изменяется (т. е. форма кривых затухания остается неизменной).

Начиная с температур $+60^{\circ}\text{C}$, скорость затухания начинает резко возрастать, а значение световой суммы падает. Максимальное значение величина световой суммы имеет в интервале температуры от комнатной до $+60^{\circ}\text{C}$.

По нашим измерениям, ход изменения α и L для стронциевого светосостава, активированного Bi , совпадает с светосоставом CaSBi .

Щелочно-земельные светосоставы мало устойчивы химически и разлагаются при действии воды, света, при нагревании и т. д. Особенно пагубное действие на

* В. А. Ястребов. Доклады АН СССР, 28, 698, 1940.

интенсивность их свечения оказывает вода. Нахождение щелочно-земельных составов в течение нескольких дней во влажной атмосфере снижает световую сумму фосфора на 50%. Ввиду этого при нанесении щелочно-земельных светсоставов необходимо пользоваться специальными влагостойкими лаками, для предохранения светсостава от воздействия влажности. Там, где требуется сравнительно небольшая длительность свечения, но большая начальная интенсивность, следует употреблять и цинко-кадмиевые люминофоры.

Группа цинко-сульфидных люминофоров нашла широкое военное и техническое применение. Этому способствовала, главным образом, их устойчивость по отношению к воде, а также к температурным влияниям. Чаще всего в качестве активатора для названной группы люминофоров применяют Cu , Mn , Co , Ag . Каждый из них дает одну, две, а иногда и больше полос эмиссии. Люминофор ZnS , активированный медью, имеет полосу спектра излучения с максимумом около 530 $\text{m}\mu$, а светсостав ZnSMn имеет две полосы излучения: оранжевую (590 $\text{m}\mu$) и синюю (460 $\text{m}\mu$), по спектральному составу и положению подобную полосе чистого неактивированного светсостава ZnS (в котором активатором являются избыточные атомы самого цинка).

У химически чистых цинкосульфидных фосфоров каждый активатор дает только одну полосу фосфоресценции. Правда, химически чистые цинковые люминофоры можно получать только в лабораторных условиях. Все продажные технические цинковые люминофоры, кроме основных полос излучения, обязанных данному активатору, имеют обычно полосы излучения, получаемые за счет загрязнений.

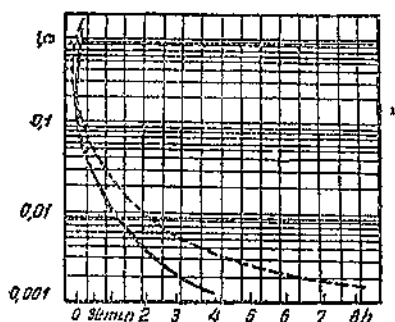


Рис. 174. Затухание светосоставов ZnS-Cu (сплошная кривая) и SrS-Bi (прерывистая кривая)

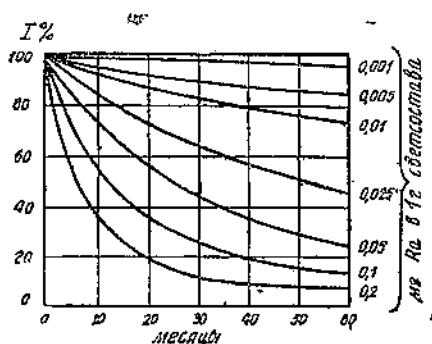


Рис. 175. Изменение со временем яркости свечения светосоставов постоянного действия при различном содержании радия

Существенно заметить, что световая сумма, излучаемая люминофором, не может возрастать безгранично при увеличении интенсивности возбуждающего света. В предельном случае (вполне осуществимом в действительности) все центры свечения будут возбуждены, и дальнейшее увеличение интенсивности не может сопровождаться увеличением световой суммы. При возбуждающих световых потоках, далеких от предельного состояния „насыщения“, яркость свечения люминофора зависит от равновесия между возбуждением и излучением.

Цинковые светсоставы, так же как и щелочно-земельные, хорошо возбуждаются под действием дневного света, хуже от искусственных источников света (лампы накаливания); особенно интенсивное свечение вызывают ультрафиолетовые лучи (кварцевые лампы).

Продолжительность времени зарядки любых люминофоров переменного действия до насыщения зависит от интенсивности источника возбуждения, химической природы люминофора, температуры и от толщины поверхности слоя.

Скорость высвечивания и интенсивность свечения фосфоров можно менять подогревом. При подогреве светсостав начинает светиться ярче, но время высвечивания сокращается. При низкой температуре энергию возбуждения можно законсервировать в фосфоре на длительное время.

В довольно широком интервале температур (от 200 до 400°) форма кривых законов затухания остается неизменной.

Затухание составов переменного действия $ZnSCu$ и $SrSbI$ при комнатной температуре представлено графически на рис. 174. Прерывистая кривая изображает убывание с течением времени интенсивности свечения для люминофора $SrSbI$, сплошная кривая дает убывание интенсивности свечения сернистого цинка, активированного медью.

Из этих кривых видно, что начальная интенсивность светосостава $ZnSCu$ значительно выше по сравнению с щелочно-земельным люминофором. Убывание величины интенсивности высвечивания цинкового люминофора с течением времени идет значительно быстрее, чем у сульфида стронция. Через 7—10 мин. после возбуждения интенсивность свечения $SrSbI$ становится выше, и высвечивание идет значительно медленнее.

Из кривых также видно, что сульфид стронция обладает значительно большей световой суммой.

§ 3. Светящиеся составы постоянного действия

Светосоставы постоянного действия также представляют собой сернистые соединения, активированные атомами тяжелых металлов, но содержащие, кроме того, небольшое количество радиоактивных препаратов: солей радия, мезотория или радиотория. В качестве основного вещества при изготовлении светосоставов постоянного действия чаще всего берется сернистый цинк, активированный медью, — один из наиболее ярких и стойких фосфоров. Возбуждение свечения светосоставов происходит за счет энергии продуктов распада радиоактивных атомов, главным образом за счет энергии образующихся при распаде α -частиц. Одна α -частица может вызвать возбуждение очень большого числа „центров“ фосфоресценции и, следовательно, испускание очень большого числа (около двух миллионов) световых квантов. Поэтому, рассматривая светосостав постоянного действия в небольшую лупу, можно наблюдать на его поверхности отдельные яркие вспышки (сцинтилляции), вызываемые действием отдельных α -частиц. Как показывают измерения, почти вся энергия α -частиц превращается в люминофоре в световую энергию излучения. При таком активном действии α -частиц содержание радиоактивного вещества в светосоставе может быть очень малым, и, действительно, обычные продажные светосоставы содержат 0,001—0,05 мг радия на грамм светосостава. Период, за который радий распадается наполовину, равняется 1580 годам, и, таким образом, соли этого элемента являются практически неисчерпаемым источником возбуждения. Тем не менее срок жизни обычных светосоставов постоянного действия ограничен несколькими годами или десятками лет, и весь запас энергии радиоактивного препарата не может быть использован. Это объясняется тем, что под действием бомбардировки α -частицами микрокристаллики сернистого цинка разрушаются и перестают светиться. Разрушение светосостава происходит тем быстрее, чем выше содержание в нем радиоактивного препарата. Таким образом, два наиболее важных свойства светосоставов — яркость и длительность действия — оказываются до некоторой степени взаимоисключающими, и получить особо яркий люминофор с очень большим сроком службы невозможно. Однако даже наиболее яркие продажные светосоставы сохраняют через год после приготовления еще около половины начальной интенсивности. Срок службы менее ярких светосоставов исчисляется десятилетиями. На рис. 175 изображено спадание со временем яркости светосоставов, содержащих различные количества радия. Так как изменение активности α -излучения радия за период в несколько десятилетий очень невелико, то приведенные кривые характеризуют разрушение светосостава под действием α -лучей. Вследствие такого нерационального использования радия в светосоставах и трудности извлечения радия из разрушенных светосоставов в последнее время стремятся заменить радий более дешевыми и более быстрораспадающимися мезоторием и радиоторием (периоды полураспада соответственно 6,7 и 1,9 лет), радиоактивная энергия которых используется полнее. Сам мезоторий не испускает при своем распаде α -частиц и не способен вызывать свечение. Свечение составов, содержащих мезоторий, обусловлено

дальнейшим распадом продуктов, образующихся при его распаде, в частности радиотория, дающих очень интенсивное α -излучение. Вследствие этого яркость светосоставов, содержащих чистый мезоторий, в первое время после их изготовления не падает, а, напротив, возрастает за счет увеличения количества радиотория и других продуктов распада мезотория. Технический мезоторий содержит обычно около 20% радия, и поэтому изменение со временем α -активности обычных составов, содержащих технический мезоторий, отличается от того, которое имело бы место в случае чистого MsTh (рис. 176). Вводя в светосостав смесь мезотория с радиоторием, можно получать составы, свечение которых остается более или менее постоянным в течение нескольких месяцев, так как уменьшение яркости свечения вследствие разрушения кристаллов сернистого цинка будет компенсиро-

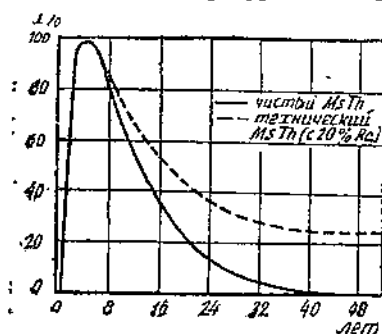


Рис. 176. Изменение со временем интенсивности α -излучения светосостава, содержащего чистый и технический мезоторий

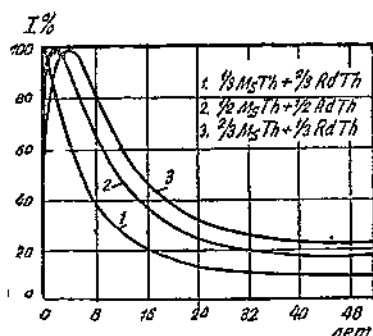


Рис. 177. Изменение со временем интенсивности α -излучения смеси технического мезотория с радиоторием

ваться возрастанием α -активности радиоактивного препарата. На рис. 177 представлено изменение со временем α -активности радиоактивных смесей с различным относительным содержанием MsTh и RdTh .

Яркость светосоставов постоянного действия в широких пределах пропорциональна количеству содержащегося в них радиоактивного препарата. В настоящее время в Советском Союзе выпускаются светосоставы 10 марок (от „А“ до „К“), отличающихся по своей яркости. Начальные яркости этих светосоставов следующие:

Таблица 26

М а р к а	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
Начальная яркость в стильбах $\times 10^9$ не ниже	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0

Светосостав марки „А“ содержит около 0,005 мг радиоактивного препарата на 1 г сернистого цинка (в пересчете на радий), состав марки „К“ — около 0,1 мг на грамм.

Изменение со временем яркости этих светосоставов характеризуется табл. 27.

При выборе той или иной марки светосоставов всегда следует руководствоваться тем, является ли в данном случае совершенно необходимой максимально возможная яркость светосостава или его можно поступиться, обеспечив тем самым более продолжительный срок службы и значительно снизив стоимость светящего покрытия. Так, например, для окраски циферблатов часов, стрелок компасов, различных

Таблица 27

Марка светосостава	Яркость в стилибах $\times 10^8$ через			
	1 год	2 года	3 года	4 года
А	—	—	—	0,45
Б	—	—	—	0,90
В	—	—	—	1,30
Г	1,85	1,75	1,70	1,65
Д	2,45	2,25	2,10	—
Е	2,70	2,35	2,15	—
Ж	3,15	2,55	2,20	—
З	3,45	2,70	2,20	—
И	3,90	2,90	—	—
К	4,40	3,00	—	—

указателей и т. д. нет надобности в применении особо ярких светосоставов; напротив, на шкалах авиационных приборов, где отсчеты должны делаться быстро и уверенно, желательно применение возможно более ярких фосфоров, так как обеспечение безопасности полета вполне окупает сравнительно небольшое увеличение стоимости прибора.

При испытании светосоставов постоянного действия необходимо иметь в виду, что они нередко обладают весьма яркой флуоресценцией, возбуждаемой видимым или ультрафиолетовым светом, так что для получения данных о собственном свечении состава следует продержать его некоторое время в темноте. Высвечивание энергии, запасенной при световом возбуждении, может быть значительно ускорено, если светосостав осветить красным светом.

§ 4. Органические люминофоры

Очень многие органические вещества, в особенности органические красители, обладают способностью давать при освещении ультрафиолетовым светом чрезвычайно яркую флуоресценцию — свечение очень малой длительности (миллиардные доли секунды), которое прекращается практически мгновенно при выключении возбуждающего света. Яркая флуоресценция характерна также для многих продуктов переработки нефти: керосина, вавелина, брайтштока, машинных масел и т. д. Свечение этих веществ, в отличие от рассмотренных неорганических люминофоров, определяется не кристаллической структурой вещества, а индивидуальными свойствами отдельных образующих его молекул. Многие вещества флуоресцируют как в растворах, так и на поверхности тканей, бумаги и т. д. Некоторые, напротив, светятся только в последнем случае, в связанном (адсорбированном) состоянии. Таковы, например, многие органические красители. Известен ряд веществ, флуоресцирующих только в растворах. Практическое применение органические люминофоры находят как в растворах, так и в виде выкрасок. Разнообразие флуоресцирующих органических веществ позволяет получать покрытия, исключительно разнообразные по цвету. Смешивая различные вещества, можно бесконечно варьировать получаемые оттенки и получать, например, цвета, близкие к белому.

Одной из характерных особенностей органических люминофоров, в частности красителей, является так называемое концентрационное тушение — ослабление, а затем и полная утрата способности светиться при увеличении концентрации вещества в растворе. Поэтому для каждого вещества существует некоторая оптимальная концентрация, при которой свечение получается наиболее ярким. Яркость, а иногда и цвет флуоресценции нередко зависит от адсорбента — подложки, на которую наносится краситель: от сорта ткани, бумаги и пр.

В табл. 28 приведены некоторые рецепты растворов, дающих на тканях ярко флуоресцирующие выкраски*.

* Е. М. Брумберг и Д. Н. Лазарев, Журн. техн. физики, Д. Н. Лазарев, Светящиеся краски, Лениздат, 1944.

Таблица 28

Наименование вещества	Среда	Оптимальная концентрация (г/л)	Цвет флуоресценции	Цвет окрашенной ткани при обычном освещении	Оптическая яркость
Флуоресцеин	Щелочная	0,8	Желто-зеленый	Желтый	0,26
Родамин С	Нейтральная	0,6	Красно-оранжевый	Малиновый	0,04
Родамин 6GDN	"	2,5	Коричневый	Красный	0,01
Эозин	"	1,5	Желто-оранжевый	Розовый	0,08
Аурамин	Слабо кислая	0,5	Желто-зеленый	Желто-зеленый	0,04
Риванол	"	0,5	Зеленый	Зеленоватый	0,15
Нафтионовая кислота	Нейтральная	4,0	Фиолетовый	Бесцветный	0,03
Гидрастинин	"	2,0	Голубой	"	0,17
Гидрастинин	"	2,0	"	"	"
Родамин С	Щелочная	0,01	Белый	Розовый	0,23
Флуоресцеин		0,03			
Флуоресцеин		0,8			
Родамин С		0,15			
	"		Оранжевый	Оранжево-красный	0,12

Органические люминофоры могут наноситься также в различных специальных лаках, в желатине, клеевых красках и т. д. (см. следующий параграф).

К недостаткам флуоресцирующих выкрасок, получаемых с помощью органических красителей, следует отнести их недостаточную светопрочность: при длительном воздействии яркого света (например, прямого солнечного света) яркость их флуоресценции заметно уменьшается. Процесс выцветания ускоряется в присутствии влаги.

Некоторые органические красители, введенные в стеклообразные массы, дают, помимо кратковременной флуоресценции, более длительное свечение — фосфоресценцию, длящуюся несколько секунд. Яркий люминофор получается при сплавлении борной кислоты с флуоресцентом или α -оксинафтойной кислотой. Хорошие органические люминофоры получаются на фосфатной основе. Некоторые красители дают очень яркую фосфоресценцию в сахарных леденцах. При этом цвет фосфоресценции может отличаться от цвета мгновенного свечения (эскулин). Промежуточной между такими стеклообразными люминофорами и кристаллолюминофорами является группа цементных люминофоров, активируемых также органическими веществами. Длительность их фосфоресценции — несколько десятков секунд.

§ 5. Нанесение люминофоров

Для нанесения светосоставов на поверхности чаще всего пользуются специальными лаками, а также клеевыми и масляными красками, желатином и другими связующими веществами. Основные требования, предъявляемые к такому связующему веществу, следующие:

1. Оно должно быть инертно химически по отношению к наносимому составу. В частности, для нанесения щелочно-земельных и цинк-сульфидных фосфоров совершенно непригодны кислые лаки, под действием которых сернистые соединения быстро разлагаются. Также вредно действуют на сернистые фосфоры свинцовые соединения. 2. Оно должно быть вполне прозрачно как для возбуждающего излучения (обычно ультрафиолетового), так и для испускаемого (видимого) света. 3. Оно должно давать механически прочные покрытия, предохраняющие светосостав от вредного атмосферного воздействия. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют винилитовые и акрилатные (метилакрилат) лаки, лаки, изготавливаемые из даммаровой смолы, полистироловые лаки, а также в некоторых случаях нитролаки (царпон-лак) и ацетил-целлулозные лаки. Кислые лаки и смолы должны быть предварительно нейтрализованы (например, раствором соды). Наилучшие растворители для лаков — ароматические и алифатические углеводороды, в особенности бензол, толуол и ксилол. На покрываемый предмет предварительно наносится слой лака, затем — по высыхании — слой светосостава в том же или

каком-либо другом связующем веществе, покрываемый сверху, для защиты от атмосферных влияний, слоем достаточно устойчивого лака (например, шеллака). Обычно смесь кристаллических фосфоров с лаком составляется из расчета 400 г светосостава на 1 л лака. Темные предметы целесообразно покрывать предварительно обычной белой краской (не содержащей свинца). Не чувствительные к влаге светосоставы из сернистого цинка могут наноситься в жидком стекле, клеевых красках или в желатине. Возможно приготовление светящихся эмалей, содержащих цинк-сульфидные фосфоры, которые с успехом могут быть применены для изготовления указателей, светящихся под действием ультрафиолетовых лучей. Люминофоры могут также вводиться в толщу пластмассы.

Органические флуоресцирующие вещества могут наноситься посредством пропитки тканей соответствующими растворами, а также в различных лаках, клеевых красках, желатине, жидком стекле и т. д. Следует заметить, что яркость их флуоресценции сильно зависит от свойств применяемого связующего вещества.

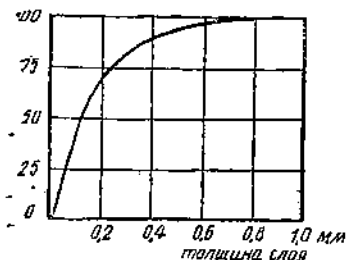


Рис. 178. Зависимость яркости свечения светосостава от толщины слоя

Вопрос о толщине наносимого покрытия особо важен в случае нанесения дорогостоящих фосфоров постоянного действия. При увеличении толщины слоя яркость свечения растет вначале пропорционально толщине покрытия, однако уже при толщине около 1 мм достигается предел яркости (рис. 178). Практически оказывается, что нанесение слоев светосоставов постоянного действия, более толстых, чем 0,1—0,2 мм, нецелесообразно, так как небольшой выигрыш в интенсивности свечения не оправдывает значительного удорожания покрытия.

При изготовлении светящихся смесей из кристаллических люминофоров их нельзя растирать в ступке и вообще сильно размельчать, так как яркость свечения заметно уменьшается при уменьшении размеров кристаллов.

Введение светосостава в любой лак несколько снижает его яркость по сравнению с яркостью в порошке, поэтому во всех случаях, где это возможно, следует избегать применения связующих веществ. Так, например, при изготовлении светящихся надписей и шкал можно заполнять порошкообразным светосоставом соответствующие углубления и прикрывать их сверху стеклянной или целлулоидной пластиной.

§ 6. Применение люминесцирующих материалов в военном деле

Особенно широкое применение в военном деле нашли себе светосоставы постоянного действия, содержащие радиоактивные препараты. Их несомненное достоинство — безотказность действия в любых условиях и полная независимость от каких-либо источников питания. Применение светосоставов постоянного действия целесообразно во всех тех случаях, когда необходимо создать сравнительно слабое освещение небольших участков без подвода энергии извне. Это, в первую очередь, шкалы, циферблаты, указатели и т. д. на приборах, предназначенных для точного использования. Почти все навигационные и контрольные приборы на современных самолетах снабжены светящимися шкалами с радиоактивными светосоставами. Минимальные размеры светящихся букв и штрихов определяются видимостью при соответствующих освещенностях и сильно зависят от яркости использованного светосостава. Ввиду падения разрешающей способности глаза при низких освещенностях эти размеры должны быть увеличены по сравнению с размерами букв и штрихов „дневных“ надписей и шкал. Рис. 179 показывает, какова должна быть минимальная яркость светящихся букв или знаков для того, чтобы при заданной высоте они были ясно видны на темном фоне при различных расстояниях между наблюдателем и прибором (данные относятся к буквам, у которых толщина штрихов составляет около $\frac{1}{6}$ от длины). Так, например, буква, нанесенная светсо-

ставом марки „К“, будет читаться с расстояния в 1 м при высоте в 3 мм, тогда как при использовании слабосветящегося состава марки „А“ размеры ее необходимо увеличить до 14 мм.

Постоянно действующие радиоактивные светосоставы могут наноситься на прицельные приспособления винтовок, пулеметов и орудий, ими можно покрывать визиры для ночной ориентации различных приборов и т. д. Лупы, соединенные с конусом, внутренняя часть которого покрыта светящимся составом (рис. 180), очень удобны для рассматривания в темноте карт, записей и т. д.

По данным, встречающимся в иностранной литературе, светосоставы постоянного действия находят себе применение и в полевой обстановке: для маркировки пути с помощью светящихся указателей, для обозначения препятствий и мест, зараженных отравляющими веществами, для указания с помощью светящихся лент пути к помещению командиров, к госпиталю и к другим важным пунктам и т. д. Имеются указания, что в английской армии в прошлую империалистическую войну применялись кусочки светящейся материи, прикреплявшиеся сзади к воротникам и служившие для того, чтобы давать возможность передвигаться друг за другом в темноте. Плавающие стеклянные шары, наполненные светящимися составами и прикрепленные к грубым проволоочным сетям, применялись для наблюдения за движением подводной лодки противника, запутавшейся в сети.

Однако применение для подобных целей светосоставов постоянного действия с радиоактивными препаратами невозможно в сколько-нибудь широких масштабах вследствие чрезвычайно высокой стоимости и дефицитности их. В то же время в целом ряде случаев они могут быть с успехом заменены светящимися составами временного (перемежного) действия. Так, например, всевозможные светящиеся указатели, сигналы, ориентиры и прочее могут покрываться длительно действующими светосоставами на щелочно-земельной основе (например, SrSbI).

Свечение таких знаков вполне отчетливо воспринимается в темноте в течение нескольких часов после прекращения возбуждения. Чрезвычайно заманчива перспектива получать свечение сигналов ночью за счет зарядки фосфора дневным светом. К сожалению, получающиеся при этом яркости свечения существующих фосфоров не всегда удовлетворительны, так как в течение длительного периода сумерек светосостав высвечивается, перезаряжаясь очень мало, и к моменту наступления полной темноты значительная часть световой суммы оказывается высвеченной, вследствие этого к утру свечение очень сильно ослабевает. Таким образом, если к светящемуся предмету, покрытому светосоставом временного действия, предъявляется требование значительной яркости в течение всей ночи, то он нуждается в периодической подзарядке от искусственных источников. Более выгодно применение светящихся составов переменного действия в южных широтах, где смена дня и ночи происходит более резко. Применение светосоставов временного действия целесообразно также для устройства светящихся луп и в некоторых случаях для шкал измерительных приборов.

Очень широко применение люминесцирующих веществ, в частности светосоставов временного действия и органических люминофоров, в области светомаскировки. Польза люминофоров очевидна, в первую очередь, в тех случаях, когда внутри какого-нибудь помещения необходимо осветить наиболее важные в произ-

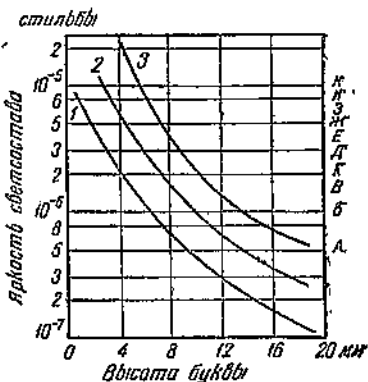


Рис. 179. Видимость светящихся штрихов. Расстояние до наблюдателя:

1 — 0,5 м; 2 — 1 м; 3 — 2 м

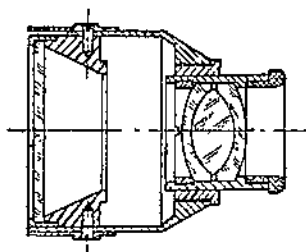


Рис. 180. Разрез лупы с подсветкой

водственном отношении места, оставив все помещение в темноте. Так, например, важно иметь освещенные приборы и ручки на пульте управления, рубильники распределительных щитов, отметить двери, лестницы и т. д. Эта задача легко может быть разрешена с помощью люминесцирующих веществ. Для этого необходимо покрыть все указанные места светсоставами временного действия и создать в помещении достаточно интенсивное ультрафиолетовое освещение, практически незаметное для глаза. Покрытые светсоставами места начнут ярко светиться на вполне темном фоне и в то же время будут совершенно незаметны для воздушного наблюдателя. Если примененные светсоставы обладают послесвечением, то покрытые ими места будут продолжать светиться и после выключения ультрафиолетового источника, в случае, например, аварии, давая, таким образом, возможность ориентироваться в полной темноте. Применение светсоставов, обладающих длительным послесвечением, можно рекомендовать для освещения в бомбо- и газоубежищах и вообще в местах скопления большого числа людей. Достаточно большие щиты, покрытые такими составами и повешенные на стенах вблизи от освещающих ламп, при внезапном выключении освещения создадут внутри убежища некоторую освещенность, позволяющую ориентироваться. Во всех воюющих странах в затемненных городах распространены различные нагрудные значки у прохожих, заряжающиеся во время пребывания на свету внутри помещений и затем высвечивающиеся на затемненных улицах. Одежда регулировщика уличного движения в затемненном городе может быть пропитана флуоресцирующими красителями, что делает его отчетливо заметным в пучке ультрафиолетового света, посылаемого специальной арматурой. Способность многих фосфоров тухнуть под действием инфракрасных лучей нашла себе применение для целей секретной сигнализации и для обнаружения передвигающихся в темноте или тумане людей и предметов (см. ниже, гл. 15, § 1).

Возможности применения люминесцирующих материалов в военном деле не исчерпываются, разумеется, перечисленными примерами. Повидимому, все же далеко не все из этих возможностей учтены — слишком недавно „холодный свет“ стал находить себе широкое практическое применение, — и в этом направлении должна интенсивно работать военно-изобретательская мысль.

Раздел III

ГЛАЗ НА ВОЙНЕ

Глава 7

Основные сведения о работе глаза

§ 1. Устройство глаза. § 2. Основные понятия и формулы диоптрийной оптики. § 3. Глаз как оптический прибор. § 4. Построение изображений в глазу. Эмметропический и аметропический глаз. § 5. Астигматический глаз. § 6. Аккомодация. § 7. Аметропический глаз и видимость далеких предметов. § 8. Устройство сетчатки глаза. § 9. Недостатки (абберации) оптической системы глаза. § 10. Явление иррадиации. Поглощение света в глазу. § 11. Световая и темновая адаптация глаза. § 12. Световые пороги глаза. § 13. Контрастная чувствительность глаза. § 14. Порог ослепления. § 15. Острота зрения. § 16. Факторы, влияющие на остроту зрения. § 17. Возникновение светового ощущения. Последовательные образы. Восприятие мельканий. § 18. Быстрота восприятия. Устойчивость ясного видения. § 19. Бинокулярное зрение. § 20. Восприятие глубины пространства. Острота глубинного зрения. § 21. Принцип коррекции аметропического глаза. § 22. Коррекция аметропии выдвижением окуляра оптического прибора. § 23. Различные формы очковых линз. § 24. Очковые линзы для работы на близких расстояниях. § 25. Точность юстировки очковых линз относительно глаза. Очковые оправы. § 26. Изменения, вносимые очковой линзой в работу глаза, и восприятие предметов внешнего мира. Контактные очковые линзы. § 27. Защитные очковые линзы. § 28. Очки для слабовидящих. § 29. Цвет и цветоощущение. § 30. Цветовой треугольник. § 31. Теория цветного зрения. Аномалии в восприятии цветов. § 32. Пути и значение рационализации зрительных условий работы.

Глаз является основным наблюдательным и измерительным прибором, применяемым человеком постоянно, — при любых наблюдениях, измерениях, трудовых процессах и т. д.

В целях расширения возможностей глаза построено большое количество разнообразных оптических приборов: таковы, например, бинокль и зрительная труба, увеличивающие дальность видения; дальномер, повышающий точность оценки расстояний; перископ, обеспечивающий возможность видеть внешние объекты из танка, подводной лодки или окопа; микроскоп, позволяющий видеть объекты малых размеров, какие не может различать невооруженный глаз, и др.

Все эти приборы применяются совместно с глазом, в связи с чем знакомство с особенностями устройства последнего как оптического прибора и законами светового и цветовосприятия, изучаемыми в специальной научной дисциплине — физиологической оптике, оказываются существенно важным и необходимым как для конструирования, так и для рационального использования оптических приборов.

Многие наблюдения, измерения, отсчеты и т. д. производятся, однако, и без участия оптических приборов, т. е. так называемым невооруженным глазом; знакомство с устройством и законами работы глаза как оптического прибора и приемника лучистой энергии дает возможность и в этих случаях создавать такие условия работы глаза, при которых точность и производительность его работы будут оптимальными.

В военном деле рационализация условий работы глаза особенно велика: от точности, достоверности и быстроты произведенных глазом с оптическим прибором или без него наблюдений или измерений, зачастую неповторимых, может зависеть успех тех или иных военных операций. Переходя к описанию устройства

глаза и законов свето- и цветовосприятия, отметим, что в соответствии с размером настоящей книги мы имеем возможность коснуться лишь отдельных, наиболее существенных вопросов физиологической оптики.

§ 1. Устройство глаза

Глаз человека имеет приблизительно шарообразную форму. Его диаметр равен примерно 2,5 см.

На рис. 181 изображен горизонтальный разрез глаза. В ограничивающем глаз почти со всех сторон внешнем слое различают присутствие трех различных оболочек. Внешняя твердая оболочка называется склерой, или белковой оболочкой. Охватывая со всех сторон внутреннее содержимое глаза, склера непрозрачна на всем своем протяжении, за исключением передней части глаза.

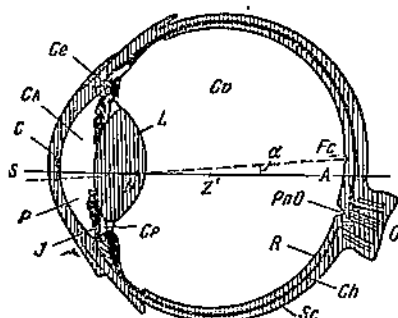


Рис. 181. Схематическое изображение глазного яблока, разрезанного по горизонтали (правый глаз):

C — роговица; S_c — склера; Ch — сосудистая оболочка; J — радужная оболочка; P — зрачок; R — сетчатка; L — хрусталик; Ce — ресничное тело; CA — передняя камера; CP — задняя камера; Cv — стекловидное тело; SNA — оптическая ось глаза; NF — зрительная линия; Fe — Фокус centralis; O — ствол зрительного нерва; PnO — слепое пятно; Z' — центр вращения глаза

Здесь склера значительно выдается вперед и приобретает большую кривизну и прозрачность. Эта прозрачная часть склеры известна под названием роговицы, или роговой оболочки. С внутренней стороны к склере прилегает вторая оболочка, представляющая собой сеть из мелких кровеносных сосудов. Эта вторая оболочка в передней части глаза переходит в радужную оболочку, окрашенную у разных людей в различный цвет и имеющую в середине отверстие, известное под названием зрачка.

Диаметр зрачка меняется в зависимости от количества света, попадающего в глаз. Пределы колебаний диаметра зрачка — от 2 до 8 мм. В обычных условиях освещения диаметр зрачка имеет 3—4 мм. Колебания зрачка регулируют количество света, попадающего в глаз. Величина диаметра зрачка в условиях ночного и дневного освещения имеет большое значение для опто техники, поскольку именно зрачок глаза является обычно действующей диафрагмой

в оптической системе глаз — оптический прибор.

Третья оболочка, выстилающая все дно глаза, за исключением передней его части, и расположенная непосредственно под сосудистой оболочкой, — это сетчатая оболочка, или сетчатка.

Сетчатка состоит в основном из разветвлений волокон зрительного нерва и их окончаний, имеет весьма сложное строение и играет в глазу примерно ту же роль, какую в фотоаппарате играет фотографическая пластинка. Сетчатка является световоспринимающим аппаратом глаза, превращающим при участии мозга образованное на ней оптической системой глаза изображение внешних объектов в создающуюся в нашем сознании пространственную картину окружающего нас мира.

Специальному вопросу устройства сетчатки посвящен параграф 8 настоящей главы.

Внутри глаза, непосредственно за зрачком, расположено прозрачное упругое тело, имеющее форму собирающей линзы, ограниченной двумя выпуклыми поверхностями; оно известно под названием хрусталика. Хрусталик находится в прозрачной сумке, укрепленной в охватывающей его со всех сторон кольцеобразной мышце, на рис. 181 можно видеть ее разрез. Когда эта мышца, известная под названием цилиарной мышцы, или ресничного тела, находится в состоянии покоя, диаметр круглого отверстия в ней имеет максимальные размеры.

Сумка, в которой находится хрусталик, находится в этом случае в состоянии натяжения, что заставляет хрусталик принимать наименее искривленную форму.

При напряжении цилиарной мышцы отверстие в ней уменьшается, благодаря чему уменьшается и натяжение сумки хрусталика. Хрусталик под влиянием присущих ему упругих сил увеличивает свою кривизну (рис. 182). Изменение кривизны хрусталика в результате воздействия цилиарной мышцы известно под названием аккомодации. Аккомодация имеет огромное значение для работы зрительного аппарата глаза, обеспечивая возможность получения на сетчатке резких изображений при различных отстояниях рассматриваемых объектов от глаза.

Пространство между роговицей и хрусталиком известно под названием передней камеры глаза. Передняя камера глаза заполнена студенистой прозрачной жидкостью, носящей название камерной влаги. Такого же рода жидкостью заполнено и небольшое пространство между зрачком и хрусталиком (задняя камера). Несколько иного рода, тоже студенистого вида, тело (стекловидное тело) заполняет большое пространство внутри глаза, между хрусталиком и сетчаткой.

Глазное яблоко покоится в имеющей шарообразную форму костной черепной полости, открытой с одной стороны. Подвижность глаза обеспечивается действием шести мышц, прикрепленных с одной стороны к главному яблоку, а с другой — к глазной орбите. Большое значение для различных оптических расчетов имеет положение центра вращения глазного яблока (точка Z' , рис. 181). Эта точка находится внутри глаза, примерно на расстоянии 13 мм от вершины роговицы.

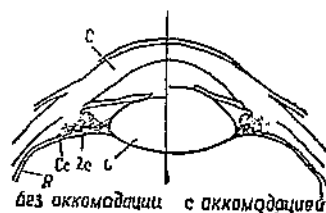


Рис. 182. Изменение кривизны хрусталика при аккомодации;

C — роговица; L — хрусталик; Ce — ресничное тело; R — сетчатка; Ze — цилиарные связки

§ 2. Основные понятия и формулы диоптрийной оптики

При изложении учения о глазе как оптическом приборе и в особенности при описании действия корригирующих глаз очковых линз принято пользоваться формулами геометрической оптики, приведенными в так называемый диоптрийный вид. Ниже мы приводим некоторые из таких формул, используемые в дальнейшем изложении.

Для характеристики преломляющего действия линзы или системы линз, вместо величины заднего фокусного расстояния f' , часто пользуются обратной величиной $D = \frac{1}{f'}$. Величина D называется силой, или рефракцией, линзы или системы и выражается в диоптриях (сокращенно дптр), если величина f' выражена в метрах.

Если, например, заднее фокусное расстояние линзы $f' = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$, то ее рефракция $D = \frac{1}{0,25} \text{ дптр} = 4 \text{ дптр}$. Линза с рефракцией $D = 10 \text{ дптр}$ имеет заднее фокусное расстояние $f' = 10 \text{ см}$.

Для нахождения рефракций линзы по данным: n — показателю преломления стекла, из которого она сделана; d — толщине линзы, и радиусам ее поверхностей r_1 и r_2 , служит формула

$$D = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2. \quad (2,1)$$

В этой формуле D — рефракция линзы,

D_1 — рефракция передней поверхности линзы,

D_2 — рефракция задней поверхности линзы,

$$\delta = \frac{d}{n}.$$

Величины D_1 и D_2 могут быть найдены, в свою очередь, по формулам

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} \quad \text{и} \quad D_2 = \frac{1-n}{r_2}. \quad (2,2)$$

Положение главных точек линзы может быть найдено по следующим формулам:

$$h = \frac{\delta D_2}{D} \quad \text{и} \quad h' = -\frac{\delta D_1}{D}. \quad (2,3)$$

В этих формулах, которые могут быть применены как к одной линзе, так и к системе линз,

h — расстояние от передней вершины линзы до ее передней главной точки,

h' — расстояние от задней вершины линзы до ее задней главной точки.

Фокусные расстояния линзы f и f' откладываются от ее главных плоскостей до соответствующих фокусов. Таким образом, для нахождения фокусных расстояний необходимо, помимо положения фокусов, знать еще и положения главных плоскостей линзы. Эти плоскости, в зависимости от формы линзы, могут занимать различные положения (рис. 183).

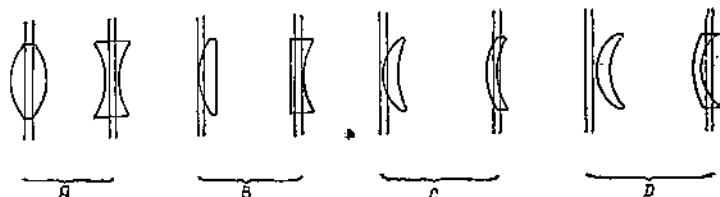


Рис. 183. Положение главных плоскостей в очковых линзах разной формы:

A — Bi-линзы; B — Плп-линзы; C — плоские мениски (перископические линзы); D — глубокие мениски

Значительно удобнее, поэтому, вместо отрезков f и f' пользоваться отрезками v и v' , представляющими собою расстояния от вершин линзы до соответствующих фокусов и называемыми вершинными фокусными расстояниями линзы. Величины, обратные v и v' , известны под названием вершинных рефракций линзы. Именно величиной задней вершинной рефракции характеризуют обычно силу очковых линз.

Формулы (2,1) и (2,3) дают возможность найти величины D , h и h' не только для одной линзы по данным значениям D_1 и D_2 ее поверхностей, но и для оптической системы из двух линз. В этом последнем случае под величиной D_1 следует понимать рефракцию первого члена системы, т. е. первой из двух линз, а под D_2 — рефракцию второго члена системы, т. е. второй линзы. Величина δ в этом случае — расстояние между задней главной плоскостью первой линзы и передней главной плоскостью второй линзы.

Для определения места изображения, даваемого линзой от какого-либо объекта, служит формула Гульстранда:

$$B = A + D. \quad (2,4)$$

Здесь $B = \frac{1}{b}$, где b — расстояние от задней главной точки линзы до изображения; $A = \frac{1}{a}$, где a — расстояние от передней главной точки линзы до объекта; D — рефракция линзы. Все три величины B , A и D выражены в диоптриях. Формула Гульстранда имеет универсальный характер: она может быть применена не только для случая преломления лучей в одной линзе, находящейся в воздухе или иной среде, но и для преломления лучей в системе линз, в одной преломляющей сферической поверхности, в сферических зеркалах и т. д. Необходимо лишь иметь

в виду, что до подстановки в формулу (2,4) отрезки a , b , и f' должны быть приведены к воздуху, т. е. разделены соответственно на показатель преломления той среды, которая граничит с соответствующей вершиной линзы*.

§ 3. Глаз как оптический прибор

Глаз представляет собою сложную оптическую систему, состоящую из роговицы и хрусталика. Пространство между роговицей и хрусталиком, а также внутренняя полость глаза за хрусталиком заполнены средами (камерная влага и стекловидное тело) с показателями преломления, отличающимися от единицы.

Сила, или рефракция, всего глаза в целом, а также отдельных членов оптической системы глаза зависит от величины радиусов, ограничивающих их поверхности, показателя преломления вещества роговицы (камерной влаги и стекловидного тела) и взаимного расстояния между членами системы. Все эти величины для разных глаз имеют разные значения, в связи с чем и рефракция у разных глаз различна.

Обычно для характеристики глаза пользуются средними значениями величин, характеризующих оптический аппарат глаза. Таблицы таких величин давались рядом ученых, работавших в области физиологической оптики; они известны под названием схематического глаза. Наиболее точным в настоящее время считается схематический глаз Гульстранда (табл. 29). По поводу этих данных необходимо сделать ряд замечаний.

1. Передняя поверхность роговицы имеет сферическую форму только в своей средней части (примерно, $\frac{1}{4}$ всего диаметра роговицы). По мере удаления от этой так называемой оптической зоны роговицы радиус кривизны передней поверхности роговицы перестает быть постоянным. Приведенная в таблице величина радиуса передней поверхности роговицы относится именно к оптической зоне роговицы.

2. Величины радиусов роговицы и их знаки позволяют видеть, что роговица по своей форме представляет собою выпукло-вогнутую рассеивающую линзу. Рефракция роговицы схематического глаза равна 43,05 дптр. Для среднего глаза, у которого удален хрусталик (так называемый афактический глаз) и у которого, следовательно, все преломление света в глазу обуславливается только действием одной роговицы, вся рефракция глаза и равна этому числу — 43,05 дптр. Главные плоскости такого глаза можно считать совпадающими и проходящими через вершину роговицы.

3. Хрусталик глаза имеет весьма сложное строение: он состоит из большого числа концентрически расположенных слоев с постепенно возрастающими по величине от периферии к середине показателями преломления. В середине хрусталика находится ядро с более или менее однородным показателем преломления. В связи с таким устройством хрусталика в схематическом глазу Гульстранда приводятся, помимо радиусов внешних поверхностей хрусталика, еще особые данные и для ядра хрусталика. Сложное строение хрусталика имеет большое значение для акта аккомодации (см. стр. 188).

В табл. 29 приводятся отдельно данные для глаза с хрусталиком в состоянии покоя и максимального напряжения аккомодации.

Из табл. 29 видно, что главные точки глаза расположены очень близко друг от друга (примерно на расстоянии 0,25 мм друг от друга). Также близко расположены друг к другу и узловые точки глаза.

При грубых подсчетах возможно как первые, так и вторые точки считать совпадающими друг с другом. Это приводит к возможности заменить схематический глаз Гульстранда упрощенной схемой глаза, известной под названием редуцированного глаза. В схеме редуцированного глаза повторное преломление света в роговице и хрусталике заменено однократным преломлением одной сферической поверхностью соответствующим образом подобранных кривизны и показателя преломления внутренней среды, заполняющей глаз.

В табл. 30 приведены данные для такого редуцированного глаза.

* Заметим, что приведенные выше формулы (2,1 — 2,4) справедливы для случая линзы в воздухе. Если линза находится не в воздухе, а в среде с показателем преломления n_1 , отличающимся от 1, формулы для нахождения величин D_1 , D_2 , f , f' , h и h' несколько меняются. В частности, если передняя поверхность линзы граничит со средой, имеющей показатель преломления n_1 , а задняя поверхность — со средой с показателем преломления n_2 , величины отрезков f и h возрастают в n_1 раз, величины же отрезков f' и h' в n_2 раз.

Схематический глаз Гулььстранда

Элементы системы	Точно		Упрощенно	
	при покое аккомодации	при макси- мальном напря- жении	при покое аккомодации	при макси- мальном напря- жении
Показатели преломления				
Роговица		1,375		
Камерная влага и стекловидное тело		1,336		1,336
Хрусталик		1,386	1,413	1,424
Эквивалентное ядро хрусталика . . .		1,406		
Положение, считая от вер- шины роговицы (в мм)				
Передняя поверхность роговицы . .		0		0
Задняя " " " " " " " "		0,5		
Передняя " " хрусталика . .	3,6	3,2		
" " эквивалент- ного ядра хрусталика	4,146	3,8725		
Задняя поверхность эквивалентного ядра хрусталика	6,565	6,5275		
Задняя поверхность хрусталика . . .		7,2		
Оптический центр хрусталика			5,85	5,2
Радиусы (в мм)				
Передняя поверхность роговицы . .		7,7		
Задняя " " " " " " " "		6,8		
Эквивалентная " поверхность рого- вицы				7,8
Передняя поверхность хрусталика . .	10	5,33	10	5,33
" " эквивалент- ного ядра хрусталика	7,911	2,655		
Задняя поверхность эквивалентного ядра хрусталика	— 5,76	— 2,655		
Задняя поверхность хрусталика . . .	— 6	— 5,33	— 6	— 5,33
Рефракция (в диоптр)				
Передняя поверхность роговицы . .		48,83		
Задняя " " " " " " " "		— 5,88		
Эквивалентная " поверхность рого- вицы				43,08
Передняя поверхность хрусталика . .	5	9,375	7,7	16,5
Эквивалентное ядро хрусталика . . .	5,985	14,96		
Задняя поверхность хрусталика . . .	8,33	9,375	12,833	16,5
Система роговицы				
Рефракция		43,05		43,08
Положение передней главной точки .		— 0,0496		0
" " задней " " " " " "		— 0,0506		0
Переднее фокусное расстояние		— 23,277		— 23,214
Заднее " " " " " " " "		31,031		31,014
Система хрусталика				
Рефракция	19,11	33,06	20,53	33
Положение передней главной точки	5,678	5,145	5,85	5,2
" " задней " " " " " "	5,808	5,255	5,85	5,2
Фокусное расстояние	69,908	40,416	65,065	40,485
Полная система глаза				
Рефракция	58,64	70,57 *	59,74	70,54
Положение передней главной точки	1,348 *	1,722 *	1,505 *	1,821 *
" " задней " " " " " "	1,602 *	2,086 *	1,631 *	2,025 *
" " переднего фокуса	— 15,707 *	— 12,397	— 15,235 *	— 12,355 *

* Расстояния отсчитываются от передней вершины роговицы.

Элементы системы	Точно		Упрощенно	
	при покое аккомодации	при максим- альном напря- жении	при покое аккомодации	при максим- альном напря- жении
Положение заднего фокуса	24,387 *	21,016 *	23,996*	20,963*
Переднее фокусное расстояние	-17,055	-14,169	16,740	-14,176
Заднее " " " " " " " " " "	22,785	18,030	22,365	18,938
Положение fovea centralis		24 *		24*
Аметропия	+ 1,0	- 9,6	0	- 9,7
Положение ближней точки		-102,3 *		-100,8*
" входного зрачка	3,047 *	2,688 *		
" выходного зрачка	3,667 *	3,312 *		
" первой узловой точки	7,079 *	—		
" второй " " " " " " " " " "	7 333 *	—		

Таблица 30

Редуцированный глаз

Рефракция	58,64 дптр
Радиус кривизны преломляющей поверхно- сти	5,78 мм
Показатель преломления	1,336
Длина глаза	22,78 мм
Переднее фокусное расстояние	-17,054 мм
Заднее фокусное расстояние	22,78 мм

§ 4. Построение изображений в глазу. Эмметропический и аметропический глаз

Приведенные выше данные об устройстве глаза как оптического прибора позволяют провести для оптической системы глаза построения изображений, внеш-

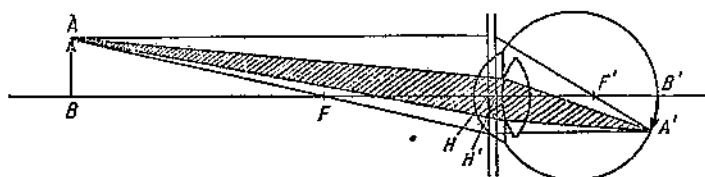


Рис. 184. Построение изображения в глазу:

AB — объект; B'A' — изображение; F и F' — передний и задний фокусы глаза; H и H' — главные точки глаза

них предметов. Такое построение, сделанное для схематического глаза, дано на рис. 184. На этом рисунке AB — находящийся перед глазом объект, который глаз видит, т. е. изображение которого получается на сетчатке глаза**.

При помощи редуцированного глаза (табл. 30) такое построение выполняется еще проще (рис. 185). Величина изображения на сетчатке может быть найдена из следующей формулы, справедливость которой вытекает из подобия треугольников ABN и A'B'N (рис. 185):

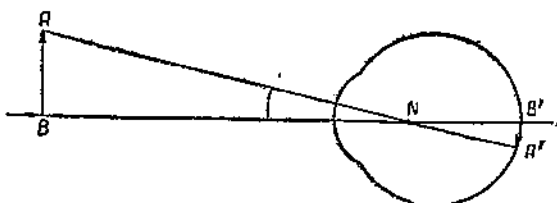


Рис. 185. Построение изображения в редуцированном глазу:

AB — объект; B'A' — изображение; N — узловая точка глаза

$$\beta = f \times \operatorname{tg} \omega = -17,05 \times \frac{\alpha}{d}, \quad (4.1)$$

* Расстояния отсчитываются от передней вершины роговицы.

** Отрезки HB, HF, H'F', длина глаза и другие отрезки даны на этом рисунке в произвольном масштабе. Само построение выполнено по обычным правилам геометрической оптики.

где β — величина изображения,

α — величина объекта,

d — расстояние от глаза (точнее, узловой точки глаза) до объекта,

f — переднее фокусное расстояние.

Пользуясь этой формулой, возможно, например, убедиться в том, что величина изображения на сетчатке фигуры человека ростом в 1,70 м, находящегося на расстоянии 10 м от глаза, равна

$$\beta' = -17,05 \cdot \frac{1,70}{10} = -2,9 \text{ мм.}$$

Знак ' у величины β указывает на то, что получающееся на сетчатке изображение — обратное. Обратные изображения получаются на сетчатке всегда от всех объектов внешнего мира. Обращение этих изображений совершается в мозгу и является процессом психологического характера.

Задний фокус глаза может занимать различные положения: он может лежать внутри глаза, на сетчатке или за глазом. Он может лежать на сетчатке только в том случае, если длина глаза l и его заднее фокусное расстояние связаны следующим соотношением:

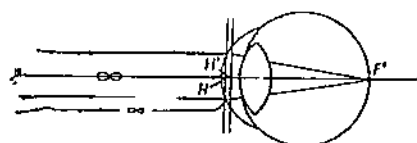


Рис. 186. Эмметропический глаз;

R — дальнейшая точка глаза; F' — задний фокус глаза; H и H' — главные точки глаза

$$l = 1,60 + \bar{f}'^* \quad (4,2)$$

В формуле (4,2) l — длина глаза, 1,60 — расстояние задней главной точки глаза от вершины роговицы (табл. 29).

Глаз, для которого справедливо соотношение (4,2) при отсутствии напряжения аккомодации, называется эмметропическим глазом (рис. 186).

Точка на оптической оси глаза, изображение которой в результате действия оптической системы глаза получается при покое аккомодации на сетчатке, называется дальнейшей точкой глаза (обозначается буквой R), а та точка, изображение которой получается на сетчатке при максимальном напряжении аккомодации, называется ближней точкой (обозначается буквой P). Величина $A = \frac{1}{a}$, где $a = HR$ (рис. 186), т. е. представляет собою расстояние от передней главной точки глаза до дальнейшей точки, называется аметропией (A). Нетрудно видеть, что для эмметропического глаза $a = \infty$, т. е. аметропия $A = 0$.

Приведенная на стр. 180 формула Гульстранда $B = A + D$ применима, конечно, и к оптической системе глаза. Полагая, что объект находится в дальнейшей точке глаза, мы должны предполагать, что изображение получится на сетчатке глаза. В этом случае величина A в формуле $B = A + D$ — аметропия глаза; величина D — рефракция глаза, а B — величина, обратная приведенному к воздуху расстоянию от задней главной точки глаза до изображения, т. е. до сетчатки.

Для эмметропического глаза

$$A = 0 \quad \text{и} \quad B = D. \quad (4,3)$$

Величины B и D^{**} у разных людей, вообще говоря, различны и колеблются по законам случайности; в отдельных случаях они могут оказаться равными друг

* $\bar{f}' = n f'$, где n — показатель преломления стекловидного тела. $\bar{f}'$ называется задним фокусным расстоянием глаза, приведенным к среде с показателем преломления n .

** Величина рефракции глаза D принимает разные значения у разных людей, в зависимости от случайных колебаний в величинах, от которых она зависит: радиусов роговицы и хрусталика, показателей преломления роговицы и хрусталика и расстояния между роговицей и хрусталиком.

другу, однако это не может быть явлением обыденным, в связи с чем и эмметропический глаз, иногда в общежитии неудачно называемый нормальным глазом, представляет собою явление редкое, исключительное*. Как правило, равенство (4,3) не имеет места.

Таблица 31

Длина глазного яблока при различной аметропии

Аметропия (в дптр)	Длина глаза (в мм)	Аметропия (в дптр)	Длина глаза (в мм)	Аметропия (в дптр)	Длина глаза (в мм)
0	24,39	—12	30,24	—24	40,17
—1	24,78	—13	30,87	—25	41,31
—2	25,19	—14	31,53	+1	24,01
—3	26,61	—15	32,21	+2	23,63
—4	26,05	—16	32,94	+3	23,27
—5	26,51	—17	33,69	+4	22,92
—6	26,98	—18	34,48	+5	22,60
—7	27,47	—19	35,31	+6	22,27
—8	27,98	—20	36,18	+7	21,96
—9	28,51	—21	37,09	+8	21,65
—10	29,07	—22	38,06	+9	21,36
—11	29,64	—23	39,09	+10	21,07

Глаз, для которого $B \neq D$ и, следовательно, аметропия $A \neq 0$, называется аметропическим глазом. У аметропического глаза $a \neq \infty$, т. е. дальняя точка такого глаза не находится в бесконечности.

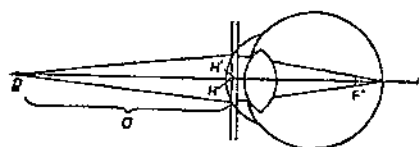


Рис. 187. Миопический глаз:

R — дальняя точка глаза; F' — задний фокус глаза; H и H' — главные точки глаза

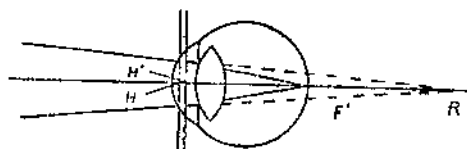


Рис. 188. Гиперметропический глаз:

R — дальняя точка глаза; F' — задний фокус глаза; H и H' — главные точки глаза

Глаз, у которого $A < 0$ и, следовательно, $a < 0$, т. е. дальняя точка глаза лежит в пространстве перед глазом на конечном расстоянии от него, называется миопическим, или близоруким глазом. Нетрудно видеть, что задний главный фокус миопического глаза лежит внутри глаза, перед сетчаткой (рис. 187). Миопический глаз может рассматриваться как такой, длина которого по отношению к его фокусному расстоянию велика.

Если $A > 0$ и $a > 0$, т. е. дальняя точка глаза лежит в пространстве за глазом, глаз называется гиперметропическим или дальноворким. Задний фокус такого глаза лежит за глазом, и длина глазного яблока по отношению к фокусному расстоянию оказывается мала (рис. 188). Дальняя точка гиперметропического глаза, лежащая за глазом, является по отношению к оптической системе глаза так называемым мнимым объектом, т. е. той точкой, которая определяет сходимость лучей, падающих на неаккомодирующий гиперметропический глаз. Эти лучи, в результате действия оптической системы глаза, пересекаются как раз на сетчатке глаза.

* Сказанное подтверждается результатами обработки соответствующего статистического материала. Согласно, например, данным, полученным Штейгером еще в 1911 г., учитывая аметропию только тогда, когда она не ниже 1,00 дптр, мы все же у 80% людей находим аметропию и только у 20% людей — эмметропию. В настоящее время, когда аметропия, даже равная 0,25 дптр, подлежит коррекции и потому не может быть отброшена, как не имеющая значения, число аметропов должно быть значительно ближе к 100%.

В табл. 31 приведены длины глазного яблока при различных аметропиях при условии, что рефракция глаз во всех случаях равна рефракции схематического глаза, т. е. 58,64 дптр.

В случае эмметропии длина такого глаза должна равняться 24,39 мм. Если рефракция глаза другая, то для того, чтобы глаз был эмметропическим, его длина должна быть также иной. Таким образом, эмметропический глаз может, вообще говоря, иметь различные значения рефракции и длины: важно только, чтобы они были таковы, чтобы задний фокус глаза лежал на сетчатке, другими словами, чтобы $B=D$.

В действительности, как ясно из предыдущего, аметропия может вызываться колебаниями не только в длине глазного яблока (осевая аметропия), но и в рефракции (рефракционная аметропия). В связи с этим истинные длины глазных яблок при разных аметропиях могут отступать от тех значений, которые приведены в табл. 31.

§ 5. Астигматический глаз

В предыдущем предполагалось, что поверхности как роговицы, так и хрусталика сферические. Рефракция глаза во всех меридианах в этом случае одинакова. [Под меридианами подразумевают большие круги, проведенные через вершину роговицы и задний полюс глаза (рис. 189).]

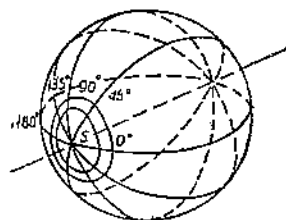


Рис. 189. Меридианы (сечений) астигматического глаза:

S —вершина роговицы глаза

Глаз, у которого во всех меридианах рефракция одинакова, дает в гауссовом пространстве, т. е. для осевого пучка лучей изображение точки в виде точки. Такой глаз может быть эмметропическим или аметропическим (близоруким или дальнозорким). В весьма большом числе случаев, однако, рефракция глаза в разных меридианах бывает неодинакова. Среди различных меридианов глаза имеется, в таком случае, обычно меридиан, в котором аметропия имеет максимальное значение, и другой меридиан, расположенный под углом в 90° к первому, в котором аметропия имеет минимальное значение и в част-

ном случае может быть равна 0. Такой глаз носит название астигматического глаза. Меридианы максимальной и минимальной аметропии астигматического глаза называются его главными меридианами, или главными сечениями.

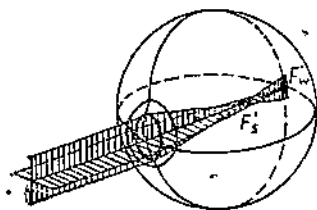


Рис. 190. Простой миопический астигматизм; в горизонтальном меридиане глаз эмметропичен, в вертикальном — миопичен:

F_s' —задний главный фокус вертикального пучка лучей; F_w' —задний главный фокус горизонтального пучка лучей

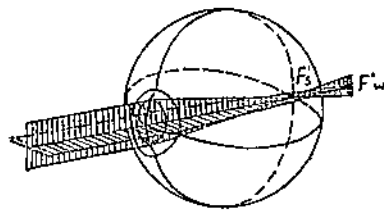


Рис. 191. Простой гиперметропический астигматизм; в вертикальном меридиане глаз эмметропичен, в горизонтальном — гиперметропичен:

F_s' —задний главный фокус вертикального пучка лучей; F_w' —задний главный фокус горизонтального пучка лучей

Астигматический глаз, так же как и астигматическая линза (см. ниже, стр. 214) трансформирует падающие на него пучки лучей в астигматические. В фокусах такого пучка вместо точек получаются линии.

На рис. 190—194 изображены различные виды астигматических глаз. Если один из фокусов астигматического глаза лежит на сетчатке (рис. 190 и 191),

аметропия астигматического глаза в этом меридиане равна 0. Для другого главного сечения глаз будет аметропическим. Такой случай астигматизма глаза известен под названием простого астигматизма. Кроме случая простого астигматизма, различают еще случаи сложного (рис. 192 и 193) и смешанного астигматизма (рис. 194).

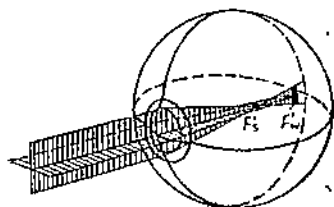


Рис. 192. Сложный миопический астигматизм. Глаз миопичен в обоих главных меридианах:

F'_s — задний главный фокус вертикального пучка лучей; F'_w — задний главный фокус горизонтального пучка лучей

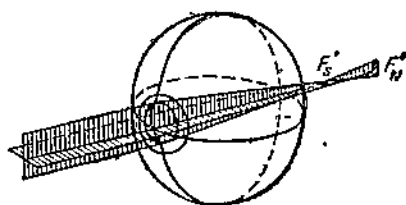


Рис. 193. Сложный гиперметропический астигматизм. Глаз гиперметропичен в обоих главных меридианах:

F'_s — задний главный фокус вертикального пучка лучей; F'_w — задний главный фокус горизонтального пучка лучей

Причина астигматизма глаза лежит обычно в несферической (торической) форме роговицы глаза или, реже, в несферической форме поверхностей хрусталика. Помимо этого, астигматизм глаза может быть обусловлен еще и неправильным положением хрусталика относительно оптической оси.

Небольшие степени астигматизма (до 1 дптр) и притом такого, когда рефракция глаза в вертикальном меридиане больше, нежели в горизонтальном, объясняются изменением

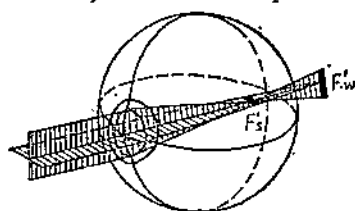


Рис. 194. Смешанный астигматизм. В вертикальном сечении глаз миопичен, в горизонтальном гиперметропичен:

F'_s — задний главный фокус вертикального пучка лучей; F'_w — задний главный фокус горизонтального пучка лучей

формы роговицы под влиянием тяжести век, лежащих на глазном яблоке. Такой астигматизм называется физиологическим астигматизмом.

Для испытания глаза на астигматизм используют обычно свойство астигматического глаза различать линии какого-то одного направления лучше, нежели линии других направлений. На рис. 195 изображен вид таблицы, применяемой для испытания глаза на астигматизм.

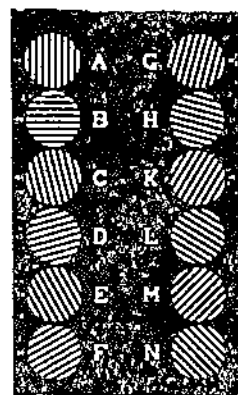


Рис. 195. Таблица испытания глаза на астигматизм

ческого глаза все кружки, состоящие из линий, кажутся одинаково черными. Глаз же, обладающий астигматизмом (а таких большинство!), увидит линии одного какого-либо кружка более черными, нежели в других кружках. Направление линий, видимых более черными, позволяет делать выводы о расположении главных меридианов астигматического глаза.

§ 6. Аккомодация

О механизме аккомодации было сказано в § 1 настоящей главы. Большое значение для акта аккомодации имеет слоистое строение хрусталика (рис. 196).

Существование слоев хрусталика и центрального ядра дает возможность при том же искривлении наружных поверхностей хрусталика в процессе аккомодации получать больший эффект аккомодации, чем при сплошном хрусталике, т. е. имеющем однородное строение.

Из табл. 29 видно, что для схематического глаза рефракция хрусталика в покое accommodation равна 19,11 дптр; в состоянии максимального напряжения accommodation эта рефракция достигает 33,06 дптр. В соответствии с этим рефракция всего глаза изменяется с 58,64 до 70,57 дптр.

В той же табл. 29 можно найти значения других величин, характеризующих оптический аппарат глаза для состояния максимального напряжения accommodation. Так, положение главных плоскостей глаза при напряжении accommodationного аппарата глаза меняется весьма мало (на 0,4 мм), взаимное же расстояние между главными плоскостями практически совсем не меняется. Это позволяет при всякого рода подсчетах пренебрегать изменением положения главных плоскостей и считать, что плоскости эти неподвижны.

Аккомодационная способность глаза измеряется величиной объема accommodation, обозначаемым Aa . Величина

$$Aa = A - P = \frac{1}{a} - \frac{1}{p}, \quad (6,1)$$

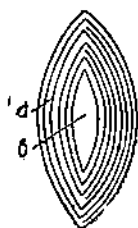


Рис. 196.
Строение хрусталика:

b — одиорное ядро хрусталика; a — периферическая часть хрусталика, состоящая из большого числа отдельных слоев

где a — расстояние от передней главной точки глаза до дальнейшей точки, а p — до ближней точки глаза.

Величина Aa выражается в диоптриях, для чего отрезки a и p должны быть выражены в метрах.

Пользуясь формулой (6,1), возможно найти, например, что если ближняя точка эмметропического глаза находится на расстоянии 10 см перед глазом, то объем accommodation такого глаза $Aa = 10$ дптр. Если глаз миопический, с миопией, равной, например, —4 дптр, а ближняя точка занимает то же положение относительно глаза, как и в предыдущем случае, т. е. находится на расстоянии 10 см от него, то объем accommodation равен $Aa = 6$ дптр. Для гиперметропического глаза с гиперметропией, равной, например, +4 дптр, и ближней точкой, находящейся перед глазом тоже на расстоянии 10 см от него, объем accommodation равен 14 дптр.

Таким образом, при том же положении ближней точки объем accommodation для случаев гиперметропического, эмметропического и миопического глаза неодинаков.

Сказанное понятно, если учесть различные положения дальнейшей точки в перечисленных трех случаях. Дальнейшая точка миопического глаза лежит в пространстве перед глазом на конечном расстоянии от него. В результате действия accommodationного аппарата глаза точка, сопряженная с сетчаткой, перемещается из дальнейшей точки глаза в ближнюю (рис. 197). Согласно сказанному выше, это будет перемещением из точки, находящейся в пространстве перед глазом, в такую же другую, но расположенную ближе к глазу. Для случая эмметропического глаза объем accommodation будет соответствовать перемещению из бесконечности (рис. 198), а в случае гиперметропического глаза (рис. 199) — из пространства за глазом через отрицательную и положительную бесконечности в ближнюю точку, одинаково расположенную для всех трех случаев.

Соответственно величине пути перемещения, сопряженной с сетчаткой точки, меняется и величина объема accommodation: при одинаковом положении ближней точки он больше всего в случае миопического глаза и меньше всего для гиперметропического глаза. Для эмметропического глаза величина объема accommodation при одинаковых положениях ближней точки лежит между величинами объемов accommodation при миопии и гиперметропии.

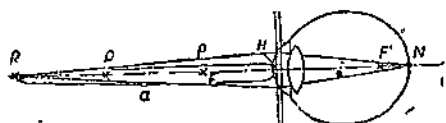


Рис. 197. Расположение дальнейшей и ближней точек у миопического глаза:

R — дальнейшая точка глаза; P — ближняя точка глаза; F' — задний фокус глаза; N — точка центра

Физический смысл величины Aa делается понятным из следующего равенства, которое может быть получено путем двукратного применения для оптической системы глаза формулы Гульстранда (стр. 180) сначала для объекта в дальнейшей точке глаза, а затем в ближней:

$$Aa = A - P = D_2 - D_1, \quad (6,2)$$

где D_2 — рефракция глаза в покое аккомодации и

D_1 — рефракция глаза в состоянии максимального напряжения аккомодации.

Нетрудно видеть, что численная величина объема аккомодации равна той прибавке в рефракции глаза, которая может быть осуществлена в результате максимального напряжения аккомодационного аппарата глаза.

Заметим, что формула (6,2) при подстановке в нее, вместо расстояния p до ближней точки глаза, расстояния до любой другой точки, расположенной между точками R и P , позволяет определить соответствующее напряжение аккомодации при рассмотрении этой точки глазом.

Положение ближней точки не остается неизменным в течение жизни человека: вследствие постепенной утраты хрусталиком своих упругих свойств ближняя точка



Рис. 198. Расположение дальнейшей и ближней точек у эметропического глаза:

R — дальнейшая точка глаза; P — ближняя точка глаза; $a = HR$ — расстояние до дальнейшей точки глаза; $p = HP$ — расстояние до ближней точки глаза. У эметропического глаза дальнейшая точка глаза лежит в бесконечности, т. е. $a = HR = \infty$

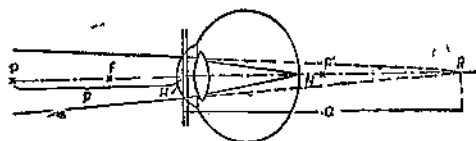


Рис. 199. Расположение дальнейшей и ближней точек у гиперметропического глаза:

R — дальнейшая точка глаза; P — ближняя точка глаза; F' — задний главный фокус глаза; N — focus centralis

с увеличением возраста постепенно отодвигается от глаза и может даже из пространства перед глазом попасть в пространство за глазом. Соответственно меняется и объем аккомодации: в возрасте 10 лет он равен 14 дптр, в 20 лет — 10 дптр, в 40 лет — 4,5 дптр, в 50 лет — 2,5 дптр и в 75 лет — 0 дптр. К 75 годам хрусталик полностью теряет упругие свойства, и объем аккомодации делается равным нулю.

Явление постепенной утраты аккомодации известно под названием пресбиопии, или старческой дальнозоркости. Обычно (хотя и неосновательно) эти термины применяют к глазу в возрасте за 40 лет.

Значения объема аккомодации для разных возрастов приведены в табл. 32.

Таблица 32
Изменение объема аккомодации в зависимости от возраста человека

Возраст (годы)	Объем аккомодации (в дптр)	Возраст (годы)	Объем аккомодации (в дптр)
10	14,0	45	3,5
15	12,0	50	2,5
20	10,0	55	1,75
25	8,5	60	1,0
30	7,0	65	0,5
35	5,5	70	0,25
40	4,5	75	0

§ 7. Аметропический глаз и видимость далеких предметов

Одним из условий хорошего различения окружающих нас объектов является получение на сетчатке глаза резкого (отчетливого), изображения этих объектов.

Как видно из рис. 200, в случае эметропического глаза далекие объекты изображаются резко на сетчатке при покое аккомодации глаза, поскольку задний фокус этого глаза лежит на сетчатке. Объекты, расположенные ближе, изобразились бы в этом случае за сетчаткой: в результате напряжения аккомодации, однако, и в этом случае изображения могут получаться резко на глазном дне (рис. 201).

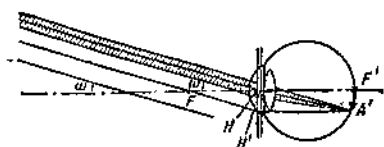


Рис. 200. Изображение далекого объекта в эметропическом глазу:

F' — задний главный фокус глаза; A' — изображение далекой точки

Помимо величины аметропии, диаметр кружков светорассеяния зависит еще и от диаметра зрачка глаза.

Нетрудно видеть, что с уменьшением зрачка уменьшается ширина попадающего в глаз конусообразного пучка лучей, в результате чего уменьшается и диаметр кружков светорассеяния. Изображения объектов делаются при этом резче.

Изменять произвольно диаметр зрачка глаза мы не можем. Для того чтобы увеличить резкость изображения далеких объектов, близорукий человек (не скорректированный очками) обычно щурится, т. е. создает своими веками щелевидную диафрагму. На том же принципе увеличения резкости изображения на сетчатке за счет уменьшения диаметра кружков светорассеяния построены так называемые дырчатые очки (рис. 203).

Нетрудно понять, что предметы, расположенные между бесконечностью и дальнейшей точкой глаза, изображаются на сетчатке миопического глаза лучше. Предмет, расположенный в точке R — дальнейшей точке миопического глаза, изображается на дне глаза без напряжения аккомодации резко, предметы, расположенные ближе к глазу, изображаются резко только при наличии соответствующего напряжения аккомодации.

Как было указано выше, дальнейшая точка гиперметропического глаза лежит за глазом и является мнимым объектом. Отсюда следует, что при покое аккомодации гиперметропический глаз не дает резких изображений от расположенных перед глазом реальных объектов, где бы они ни находились (рис. 204). Только помещая в дальнейшую точку мнимый объект, другими словами, отбрасывая в это место изображение какого-либо предмета, находящегося перед глазом, даваемое какой-то посторонней глазу оптической системой или просто линзой, возможно получить на сетчатке гиперметропического глаза резкое изображение без напряжения аккомодации. Дифрагмирование — прищуривание — и в случае гиперметропического глаза улучшает резкость изображения на сетчатке, однако гиперметроп, вместо того чтобы прищуривать глаза, предпочитает пользоваться аккомодацией.

В случае неаккомодирующего миопического глаза задний фокус лежит не на сетчатке, а внутри глаза. Там же изображаются и далекие объекты, находящиеся перед глазом. На сетчатке при этом каждая точка объекта изображается не точкой, а кружком, тем большим, чем дальше отстоит фокус от сетчатки, т. е. чем больше величина аметропии глаза (рис. 202).

В результате получается размытое изображение, как говорят, «в кругах светорассеяния».

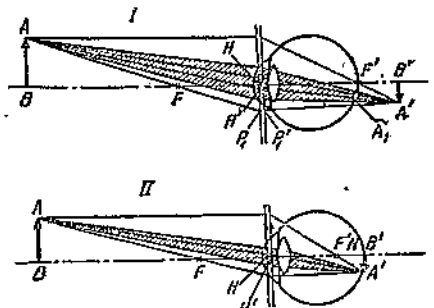


Рис. 201. Изображение близкого объекта на сетчатке эметропического глаза:

AB — ближний объект; $A'B'$ — его изображение; F' — задний главный фокус глаза; A' — кружок светорассеяния; I — случай неаккомодирующего глаза; II — случай аккомодирующего глаза

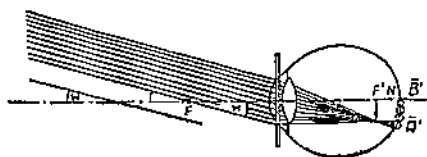


Рис. 202. Изображение далекого объекта на сетчатке некорректированного миопического глаза:

F' — задний главный фокус глаза; $A'B'$ — изображение далекого объекта в кругах светорассеяния

. При аккомодации задний фокус гиперметропического глаза передвигается ближе к глазу, точка же, сопряженная с сетчаткой (при покое аккомодации — дальнейшая точка), удаляется от глаза и при наличии достаточного объема аккомодации переходит в пространство перед глазом.

Из сказанного ясно, что резкое изображение далеких объектов в гиперметропическом глазу возможно только при затрате некоторого напряжения аккомодации. Для изображения близких предметов затрачиваемое напряжение аккомодации должно быть еще значительнее.

Далеко лежащие объекты могут быть отчетливо видимыми как эметропическим, так и гиперметропическим глазом*. В первом это имеет место без аккомодации, во втором — это возможно только при наличии аккомодационного напряжения. В миопическом глазу далекие объекты не могут резко изображаться на сетчатке, а следовательно, и быть отчетливо видимыми. Для получения на дне глаза резких изображений близких объектов необходимо наличие аккомодационного напряжения: оно больше всего для случая гиперметропического глаза, меньше — для эметропического и еще меньше — для миопического глаза**.

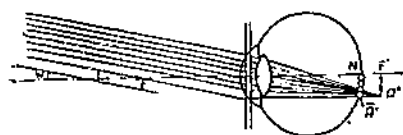


Рис. 204. Изображение далекого объекта на сетчатке гиперметропического глаза:

F' — задний главный фокус глаза; A' — изображение верхней точки объекта в кругах светорассеяния

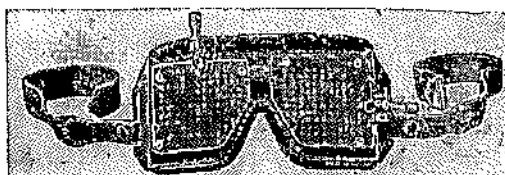


Рис. 203. Дырчатые очки

§ 8. Устройство сетчатки глаза

Изображение предметов на глазном дне воспринимается нами через посредство сетчатки и мозга. Сетчатка глаза состоит из сплетения отдельных нервных волокон. Последние состоят из вещества, аналогичного мозговому веществу, в связи с чем сетчатку рассматривают как вынесенную вперед часть мозга. Число отдельных нервных волокон в сетчатке достигает миллиона. Свой путь из мозга в глаз эти волокна совершают, будучи тесно сплетены между собою и образуя так называемый ствол зрительного нерва, или просто зрительный нерв (О на рис. 181).

В толще сетчатки физиологи различают 10 отдельных слоев. Разрез сетчатки представлен на рис. 205.

Пройдя через склеру и сосудистую оболочку в виде ствола зрительного нерва, отдельные волокна зрительного нерва расходятся по всей сетчатке, образуя своими сплетениями первый, наружный слой сетчатки***. Из первого слоя сетчатки нервные волокна, образуя ряд утолщений сложного строения, проходят через ряд слоев сетчатки и оканчиваются в девятом слое сетчатки особыми окончаниями, являющимися световоспринимающими элементами сетчатки.

Существует два вида окончаний нервных волокон: одни, имеющие вид стебелька и относительно длинные, известны под названием палочек;

* Если гиперметропия очень велика или, наоборот, объем аккомодации гиперметропического глаза мал, далекие объекты не могут изображаться отчетливо на сетчатке гиперметропического глаза. В этом случае гиперметропический глаз видит вдаль так же плохо, как и миопический глаз.

** Для миопического глаза необходимое для рассмотрения близкого предмета напряжение аккомодации может быть равно и нулю в том случае, когда объект находится в дальнейшей точке глаза. Для миопического глаза с аметропией, например $A = -3$ дптр, это будет иметь место для расстояния 33 см от глаза, для $A = -4$ дптр — для 25 см и для $A = -5$ дптр — для 20 см.

*** При счете слоев имеется в виду направление оси стекловидного тела к радужной и белковой оболочке, как указано на рис. 205.

другие, более короткие, но и более толстые, имеющие форму луковицы, называются колбочками (рис. 206). Как палочки, так и колбочки имеют очень малые размеры и видны только в микроскоп. Длина и ширина палочек и колбочек равны нескольким тысячным долям миллиметра. Общее число палочек и колбочек в сетчатке одного глаза достигает примерно 140 000 000, из них примерно 7 000 000 колбочек и 133 000 000 палочек.

Распределены палочки и колбочки по сетчатке неравномерно. В месте сетчатки, находящемся против зрачка глаза, расположены одни колбочки. Этот участок сетчатки несколько углублен и имеет площадь около 0,5 мм, что соответствует пространственному углу около 1°. Это место сетчатки известно под названием *fovea centralis* (сокращенно — просто *fovea*). В *fovea* находятся только колбочки, число их здесь достигает 4000—5000. *Fovea* является серединой овалообразного участка сетчатки, размером примерно от 1,4 до 2,0 мм, известного под названием желтого пятна, или *macula*.

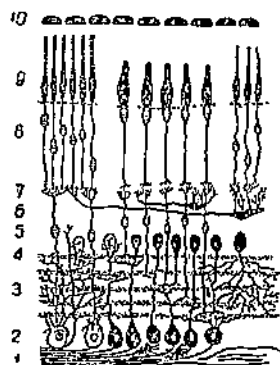


Рис. 205. Строение сетчатки:

1 — волокна зрительного нерва (граничат со стекловидным телом); 2 — ганглиозные клетки; 3 — внутренний межзернистый слой; 4, 5, 6 — внутренний зернистый слой; 7 — внешний межзернистый слой; 8 — внешний зернистый слой; 9 — слой палочек и колбочек; 10 — слой зерен черного пигмента (прилагается к сосудистой оболочке)

В желтом пятне, помимо колбочек, встречаются и палочки, однако число колбочек здесь значительно превышает число палочек. Пространственный угол, соответствующий желтому пятну, равен около 6—7°. При удалении от желтого пятна число палочек в сетчатке начинает возрастать, число колбочек, наоборот, уменьшаться. В краевых (периферических) частях сетчатки встречаются одни только палочки. Желтое пятно и в особенности центральное углубление его — *fovea centralis* — являются областями наиболее точного зрения, что объяс-

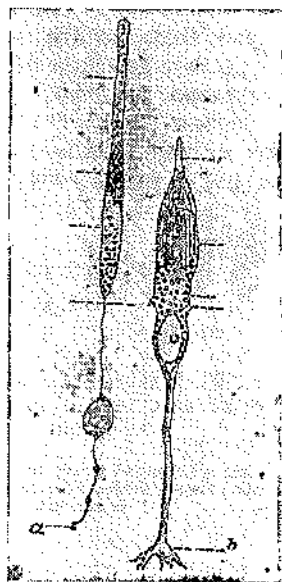


Рис. 206. Вид палочек (a) и колбочек (b) (увеличено в 1000 раз)

няется, между прочим, тем обстоятельством, что здесь каждой колбочке соответствует специальное, ведущее к ней волокно зрительного нерва; в периферической части сетчатки одно зрительное волокно имеет целый ряд окончаний*.

В сетчатке есть участок, совсем лишенный палочек и колбочек, а потому и вовсе нечувствительный к свету: это то место сетчатки, где ствол зрительного нерва, идущий из мозга, прободает склеру и сосудистую оболочку глаза. Этот круглый участок сетчатки известен под названием слепого пятна и имеет диаметр около 1,5 мм. На слепом пятне могли бы уместиться изображения 11 лун, находящихся в зените в состоянии полнолуния. В существовании слепого пятна легко убедиться с помощью рис. 207. Если смотреть правым глазом при закрытом левом с расстояния 20—30 см на крестик, то черный кружок перестает быть видимым, так как изображение его попадает на слепое пятно.

Палочки и колбочки различаются по своим функциям: палочки более светочувствительны, но не различают цветов, колбочки чувствительны к цветам, но менее светочувствительны. Цветные объекты, рассматриваемые при слабом (например, лунном) свете, когда весь зрительный процесс осуществляется исключительно

* Поскольку число нервных волокон в стволе зрительного нерва достигает 1 000 000, число же колбочек и палочек равно 140 000 000, видно, что одному нервному волокну в среднем соответствует до 140 палочек или колбочек.

палочками, отличаются друг от друга только яркостью (светлотой), цвет же объектов в этих условиях не ощущается*.

В палочках открыто наличие особого вещества, разлагающегося при действии на него света, известного под названием зрительного пурпура, или родопсина. Разложение зрительного пурпура под действием света представляет собою фотохимическую реакцию, в результате которой в нервных волокнах появляется электрическая разность потенциалов. В форме отдельных электрических импульсов световое раздражение передается от глаза в мозговые центры, где и воспринимается нами в виде света. В последнее время удалось наблюдать и записывать эти возникающие под действием света отдельные электрические импульсы в нервных волокнах изолированного глаза. Образец такой записи дан на рис. 208. Изучение таких записей, произведенных в различных условиях воздействия света на сетчатку, расширяет наши представления о механизме процессов, возникающих в сетчатке и нервных волокнах под действием света. Если глаз находится в темноте, разложившийся в палочках зрительный пурпур снова восстанавливается. Обычно при действии света мы имеем налицо оба процесса —



Рис. 207. Рисунок, позволяющий убедиться в существовании темного пятна

Рис. 208. Электроретинограмма; ряд отдельных электрических импульсов, обнаруженных в изолированном нервном волокне глаза морского краба (*Limulus polyphemus*) при действии света на сетчатку

разложения и восстановления зрительного пурпура, идущие навстречу друг другу. В колбочках вещество, подобное зрительному пурпуру в палочках, до сего времени не открыто; имеются, однако, все основания предполагать наличие его и в этом случае.

В последнем, десятом, слое сетчатки, прилегающем к сосудистой оболочке, находится в виде отдельных крупных зерен так называемый черный пигмент. Существование черного пигмента имеет большое значение для приспособления глаза к работе при различных уровнях освещенности.

Одним из условий производительной и точной работы глаза является получение на сетчатке отчетливого и резкого изображения объектов внешнего мира. Последнее возможно, однако, только при достаточно совершенном устройстве глаза как оптического прибора.

§ 9. Недостатки (абerrации) оптической системы глаза

Рассматривая глаз с точки зрения требований, предъявляемых к оптическому прибору, возможно указать на ряд недостатков оптической системы глаза. Недостатки эти вызывают сомнения в рациональности устройства оптической системы глаза и возможности получать хорошие результаты в отношении различения малых по величине или далеких объектов.

В связи с этим следует указать на то, что в анатомическом устройстве глаза и особенно сетчатки, а также в законах реакции сетчатки на световые раздражения, возможно усмотреть специальное стремление предельно использовать несовершенное изображение на сетчатке в условиях работы глаза при самых различных по величине освещенностях.

* Поскольку фovea не имеет палочек совсем, в желтом же пятне их очень мало, зрительный процесс в условиях слабых освещенностей осуществляется периферическими частями сетчатки. Так, например, астрономы при наблюдении звезд малой величины специально направляют свой взгляд несколько в сторону.

Из оптических недостатков глаза остановимся кратко на следующих: недостатках в центрировке оптической системы глаза, сферической аберрации, хроматической аберрации и светорассеянии.

1) Недостатки в центрировке оптической системы глаза

Говоря о центрированной оптической системе, обычно имеют в виду, что все преломляющие поверхности сферичны и имеют одну общую оптическую ось. На стр. 181 было указано, что роговица, вообще говоря, не сферична и только в пределах оптической зоны поверхность ее с некоторой долей приближения может считаться сферической. Такие же отступления от сферичности отмечаются и в отношении поверхностей хрусталика. Не может считаться совершенной и центровка членов оптической системы глаза. Необходимо, наконец, иметь в виду еще и тот факт, что оптическая ось глаза не пересекает *fovea* (рис. 181).

В результате зрения протекает в несколько скошенном направлении по отношению к оптической оси системы. Это отклонение в направлениях зрительной линии глаза и оптической оси, однако, невелико (не выше 5°)*; кроме того, наличие их несколько уменьшает вредное действие аберраций глаза.

Практически с некоторой долей приближения возможно считать глаз центрированной оптической системой, симметричной относительно оптической оси.

2) Сферическая аберрация

Глаз не свободен от сферической аберрации, однако в условиях малых размеров зрачка (2—4 мм) влияние этого вида аберрации глаза на качество изображения относительно мало, — меньше, нежели влияние дифракции или хроматической аберрации. При больших отверстиях зрачка влияние сферической аберрации делается сильнее, и качество изображений на сетчатке заметно портится, поскольку каждая точка в пространстве объектов изображается на сетчатке не точкой, а кружком светорассеяния.

С вопросом о сферической аберрации глаза связан вопрос о так называемой глубине фокуса глаза. Под глубиной фокуса подразумевают наибольшее расстояние, в пределах которого объект-точка, передвигаясь, изображается на сетчатке кружком светорассеяния таких размеров, что возбуждается только один световоспринимающий элемент сетчатки. Глубина фокуса уменьшается с увеличением диаметра зрачка глаза и с уменьшением среднего расстояния от глаза до объекта-точки. Значения глубины фокуса для разных значений диаметра зрачка глаза следующие:

Диаметр зрачка (в мм)	Глубина фокуса для ∞	Глубина фокуса для 25 см (в см)
1	от ∞ до 8 м	3,2
2	" ∞ " 16 "	1,6
3	" ∞ " 24 "	1,1
4	" ∞ " 32 "	0,8

Цифры относятся к глазу в покое аккомодации. Напряжение аккомодации сопровождается уменьшением диаметра зрачка, что связано с увеличением глубины фокуса.

* Согласно подсчетам Гульстранда, для величины зрачка в 2 мм появляющийся в результате несовпадения зрительной и оптической осей глаза астигматизм равен примерно 0,1 дптр.

3) Хроматическая абберация глаза

Глаз не является ахроматической системой. В существовании хроматизма глаза легко убедиться, смотря на белую светящуюся точку через кобальтовое стекло, пропускающее только синие и красные лучи. При положении светящейся точки в области дальнейшей точки глаза она видна глазом в виде красной точки, окруженной синим сиянием; при передвижении светящейся точки ближе к глазу, в область ближней точки глаза, эта же светящаяся точка видна как синяя, окруженная красным сиянием. Наличие хроматической абберации в глазу приводит к уменьшению резкости получаемых на сетчатке изображений внешних объектов. Величина хроматической абберации глаза для крайних видимых спектральных излучений — примерно 2 дптр.

В соответствии с увеличением преломляемости при уменьшении длины световой волны хроматическая абберация для коротких волн в три раза больше, нежели для длинных. Отсюда следует, что требуется добавочное напряжение аккомодации в 1,5 дптр для того, чтобы сфокусировать наиболее эффективные для глаза желто-зеленые лучи (см. стр. 199) в той же плоскости, как и фиолетовые, и только 0,5 дптр для фокусировки красных лучей в одной плоскости с желто-зелеными.

Различная чувствительность сетчатки к спектральным излучениям различных длин волн и в частности максимальная эффективность желто-зеленых лучей, а также и малые размеры зрачка глаза приводят к тому, что в обыденной жизни наличие хроматической абберации ощущается нами сравнительно очень мало.

4) Светорассеяние

Говоря о рассеянии света внутри глаза, мы имеем в виду как рассеяние его в хрусталике и стекловидном теле, на пути к сетчатке, так и отражение света от задних слоев сетчатки. И то и другое явление создает в глазу слабую светящуюся дымку, хорошо заметную в виде светлых ореолов, окружающих светлые объекты, рассматриваемые на темном фоне. Наличие такой дымки уменьшает контраст между яркостями объектов и фонов, на которых они проектируются, что неблагоприятно отражается на видимости объектов в условиях низких освещенностей.

§ 10. Явление иррадиации. Поглощение света в глазу

Наличием сферической и хроматической абберации в глазу объясняются явления переоценки размеров светлых площадей или линий, проектирующихся на черном фоне, узких освещенных свадн щелей или отверстий, источников света (например, звезд) и т. д., известные под названием иррадиации. В существовании явления иррадиации можно убедиться, рассматривая рис. 209. На этом рисунке оба



Рис. 209. Явление иррадиации. Вследствие иррадиации белый квадрат кажется большим по площади, нежели имеющий одинаковые с ним размеры черный квадрат

квадрата — черный и белый — имеют точно одни и те же размеры. Между тем белый квадрат кажется большим, нежели черный. Благодаря явлению иррадиации две смежных ярких поверхности, разделенные темным промежутком, стремятся слиться воедино, т. е. величина черного промежутка, разделяющего две ярких поверхности, кажется меньшей или даже совсем исчезает (рис. 210). Эффект иррадиации тем больше, чем больше яркость светящейся поверхности. Благодаря явлению иррадиации, белые штрихи на черных шкалах кажутся более толстыми, нежели той же толщины черные штрихи на светлом фоне.

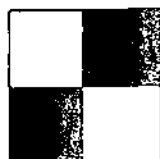


Рис. 210. Явление иррадиации. Вследствие иррадиации белые поля раздвигаются и представляются глазу сообщаемыми друг с другом

Поглощение падающего на глаз света происходит преимущественно в хрусталике. Поглощение света в хрусталике начинает расти после достижения 30-летнего

возраста, причем особенно сильно растет поглощение лучей короткой части спектра, благодаря чему хрусталик из прозрачного делается желтым. Такие изменения поглощения хрусталиком излучения различных длин волн приводят к соответствующим изменениям в восприятии цвета.

Помимо хрусталика глаза, избирательным поглощением обладает еще сетчатка в области желтого пятна, благодаря наличию в последнем желтого пигмента. Поглощающее действие сетчатки в области желтого пятна сказывается в том, что объекты синего или фиолетового цвета воспринимаются периферией сетчатки более синими или фиолетовыми, нежели центральной ее частью (желтым пятном).

Помимо излучений видимой части спектра, в глазу поглощаются и невидимые излучения — лучи ультрафиолетовые и инфракрасные. Ультрафиолетовые лучи поглощаются в роговице и хрусталике. Роговицей поглощаются лучи с длиной волны меньшей 298 $m\mu$; хрусталик, как правило, не пропускает лучей короче 313 $m\mu$. Таким образом, ультрафиолетовые лучи с длинами волн короче 313 $m\mu$ для глаза с хрусталиком и 298 $m\mu$ для глаза без хрусталика обычно не доходят до сетчатки. Только при ультрафиолетовых излучениях весьма большой интенсивности возможно, по видимому, прохождение через хрусталик излучений с длиной волны до 302 $m\mu$. Что касается инфракрасных лучей, то и они поглощаются главным образом в хрусталике.

Подробнее о поглощении невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучей в глазу и действии их на глаз будет сказано в § 27.

§ 11. Световая и темновая адаптация глаза

Глазу приходится работать в самых разнообразных световых условиях и различать светящиеся объекты самых различных яркостей. Наблюдения показывают, что глаз свободно работает днем в условиях освещения солнцем и различает на темном фоне ночного неба сравнительно слабые звезды. Отношение яркостей, которые воздействуют в этих условиях на глаз, достигает значений $10^{12}:1$. Способность светочувствительного аппарата глаза приспособиться к различным яркостям известна под названием адаптации.

Процесс адаптации глаза протекает не моментально, а требует для своего завершения определенного, иногда весьма значительного, времени. Это легко наблюдается при быстрых переходах из хорошо освещенного помещения или с улицы в слабо освещенное помещение (например, зал кинотеатра): в первое время после внезапной смены яркостей, с которыми приходится иметь дело наблюдателю, глаз не различает находящихся перед ним предметов или их деталей, и только по истечении некоторого времени постепенно работоспособность глаза восстанавливается, глаз адаптируется, т. е. получает возможность различать находящиеся перед ним предметы так, как это только вообще возможно для глаза при новых осветительных условиях.

Точно так же глаз, адаптированный к темноте или к слабым яркостям, не сразу перестраивается для работы при яркостях более сильных: в первые моменты времени, после выхода, например, из кинотеатра на улицу, различение окружающих предметов невозможно из-за ослепления. После определенного промежутка времени, однако, работоспособность глаза восстанавливается. Изложенное понятно, если иметь в виду механизм процесса адаптации. При слабых освещенностях работают палочки, светочувствительное вещество в колбочках не разлагается, площадь зрачка глаза велика. При больших яркостях палочки не работают, так как процесс разложения светочувствительного вещества (родопсина) в них идет быстрее, нежели процесс восстановления, зрачок глаза сокращается.

При сравнении сетчатки, подвергшейся значительному засвету, с сетчаткой, находившейся в темноте, возможно заметить в наружном слое первой наличие зерен черного пигмента, который у слабо освещенной сетчатки находится, как уже указывалось на стр. 193, в последнем, прилегающем к сосудистой оболочке, десятом, слое сетчатки. Эти зерна черного пигмента, при нахождении их на пути прохождения света к колбочкам, поглощают излишний свет и, таким образом,

содействуют возможности глаза работать при значительных яркостях. При переходе от сильных яркостей к слабым происходит обратный процесс перемещения зерен черного пигмента из наружного, первого, слоя сетчатки в последний, десятый, слой. Кроме того, при такой переадаптации глаза от сильных яркостей к слабым имеют место процессы восстановления зрительного пурпура в палочках и, следовательно, включения их в работу, а также расширения зрачка. Колбочки при слабых яркостях не работают.

Все эти процессы — восстановления светочувствительного вещества, перемещения зерен черного пигмента и изменения диаметра зрачка — требуют для своего завершения известного времени.

Отсюда понятно, что процесс переадаптации глаза с одной яркости на другую протекает отнюдь не быстро. Типичный ход процесса адаптации к темноте изображается кривой рис. 211. На оси абсцисс этого графика отложено время адаптации, на оси ординат — значения так называемой световой чувствительности глаза — величины, равной $\frac{I}{N}$, где N — так называемый световой порог.

Световым порогом N называется наименьшее количество лучистой энергии, способное вызвать ощущение света. Численно световые пороги выражаются обычно или в $\frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ лучистой энергии, излучаемой источником света, или же в люксах освещенности на зрачке*. Кривая рис. 211 показывает, что после перехода от света к темноте световая чувствительность глаза постепенно растет. Соответ-

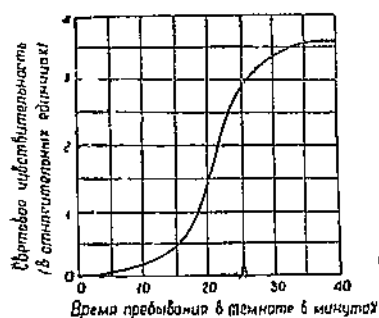


Рис. 211. Кривая темновой адаптации глаза

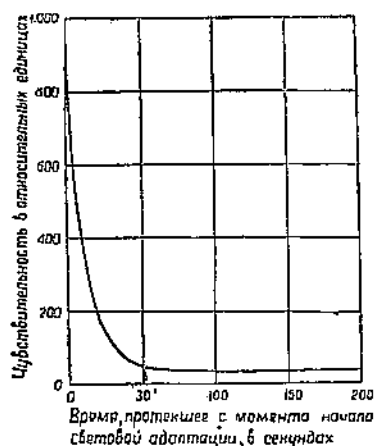


Рис. 212. Кривая световой адаптации глаза

ственно световой чувствительности значения световых порогов убывают. Как видно из рис. 211, по завершении быстрого роста световой чувствительности следует период времени, в течение которого она меняется мало, постепенно приближаясь к некоторому постоянному значению. Световой порог, соответствующий этому постоянному значению световой чувствительности при пребывании в темноте, известен под названием абсолютного светового порога глаза. Световые пороги, соответствующие другим уровням адаптационного состояния глаза, известны под названием относительных порогов. Кривая адаптации для обратного перехода от темноты к свету изображена на рис. 212.

Скорость, с которой протекают процессы адаптации, а также диапазоны возможных изменений световой чувствительности неодинаковы для колбочкового и палочкового аппаратов сетчатки. В то время как для колбочкового зрения, т. е. для зрения помощью фovea, чувствительность в условиях темновой адаптации изменяется в 20—40 раз, а самый процесс изменения световой чувствительности длится 5—8 мин., для палочкового зрения, т. е. при зрении периферией

* Определение люкса — см. I, гл. 1, § 11.

сетчатки, процесс адаптации заканчивается не ранее чем через 60—80 мин. *, чувствительность же меняется при этом примерно в 50 000—100 000 раз. В том случае, когда процесс темновой адаптации начинается с таких яркостей, при которых возбуждены не только палочки, но и колбочки, кривая темновой адаптации имеет перегиб, соответствующий моменту выключения из работы колбочек. Такая кривая изображена на рис. 213. По оси ординат этой кривой отложены логарифмы световых порогов, по оси абсцисс — продолжительность пребывания в темноте в минутах.

§ 12. Световые пороги глаза

Большое значение для ночных наблюдений и работ с оптическими приборами ночного действия имеет величина световых порогов, а также яркостные пределы работы палочек и колбочек.

Величины световых порогов глаза неодинаковы для разных длин волн. Это значит, что глаз обладает вдоль по спектру избирательной световой чувствительностью. Распределение световой чувствительности глаза иллюстрируется кривыми рис. 214 и табл. 33. На рисунке кривая А соответствует работе колбочек,

Таблица 33

Спектральная чувствительность глаза
(в относительных единицах)

I. Дневное (колбочковое) зрение

$\lambda_{\text{м}\mu}$	V_{λ}	$\lambda_{\text{м}\mu}$	V_{λ}	$\lambda_{\text{м}\mu}$	V_{λ}
400	0,0004	530	0,862	660	0,061
410	0,0012	540	0,954	670	0,032
420	0,0040	550	0,995	680	0,017
430	0,0116	560	0,995	690	0,0082
440	0,023	570	0,952	700	0,0041
450	0,038	580	0,870	710	0,0021
460	0,060	590	0,757	720	0,00105
470	0,091	600	0,631	730	0,00052
480	0,139	610	0,503	740	0,00025
490	0,208	620	0,381	750	0,00012
500	0,323	630	0,265	760	0,00006
510	0,503	640	0,175		
520	0,710	650	0,107		

II. Сумеречное (палочковое)
зрение

$\lambda_{\text{м}\mu}$	V_{λ}	$\lambda_{\text{м}\mu}$	V_{λ}
412	0,063	529	0,911
455	0,399	540	0,788
486	0,834	550	0,556
496	0,929	582	0,178
507	0,993	613	0,02
518	0,973		

* кривая В — работе палочек. Из графика рис. 214 нетрудно усмотреть, что в условиях дневного зрения сетчатка максимально чувствительна к излучениям с длиной

* Через 60—80 мин. заканчивается быстрый рост световой чувствительности палочек; новейшие опыты показали, что световая чувствительность изменяется и после 80-минутного пребывания в темноте.

волны в 555 $m\mu$. По мере удаления от этого значения длин волн в обе стороны спектра чувствительность сетчатки быстро падает, и, например, для того, чтобы излучение с длиной волны в 650 $m\mu$ (красное) обеспечило такое же по интенсивности возбуждение светочувствительных элементов сетчатки, как и излучение с длиной волны в 555 $m\mu$ (желто-зеленое), необходимо, чтобы энергетически количество первого излучения превышало в 10 раз количество второго.

Из того же рис. 214 видно, что для палочкового зрения максимальная чувствительность сетчатки приходится не на 555 $m\mu$, а приблизительно на 507 $m\mu$.

Следствие этого — большая чувствительность палочкового зрительного аппарата к излучениям коротких длин волн и практическая нечувствительность его к крайним красным лучам*. Существование различных кривых спектральной чувствительности для палочек и колбочек с различным расположением максимумами известно под названием явления Пуркинье. В результате явления Пуркинье цветные объекты кажутся нам неодинаковыми в отношении распределения яркостей днем, при работе колбочек, и ночью (при свете луны), когда работают палочки.

Величина абсолютного светового порога глаза зависит от ряда причин — длины волны света, места на сетчатке**, величины площади источника света, длительности воздействия излучения на глаз, наличия одновременных раздражений других органов чувств — слухового, вкусового или обонятельного, от индивидуальных особенностей наблюдателей и других причин. Все эти зависимости в настоящее время подробно изучены. Мы не можем здесь, однако, останавливаться на этом вопросе, отметим только, что абсолютные световые пороги глаза представляют собой величины чрезвычайно малые: выраженная в $\frac{эрг}{сек}$ величина абсолютного светового порога сетчатки колеблется в зависимости от ряда причин для разных людей в пределах примерно от $1 \cdot 10^{-10} \frac{эрг}{сек}$ до $3,8 \cdot 10^{-11} \frac{эрг}{сек}$ и даже до $5 \cdot 10^{-12} \frac{эрг}{сек}$. Выражая абсолютный световой поток в люксах освещенности на зрачке глаза, получаем в среднем величину порядка 10^{-9} люкс. Расчеты показывают, что в условиях полной темноты наблюдатель смог бы заметить свет от одной стеариновой свечи, удаленной от него на расстоянии 30 км.

Согласно новейшим исследованиям, даже небольшие группы (несколько десятков) световых квантов способны вызывать ощущение света у глаза, хорошо адаптированного к темноте.

Обычно для применения в практических расчетах приходится пользоваться величинами относительных порогов, соответствующими тому или иному адаптационному состоянию глаза. Соответствующие данные приведены в табл. 34. Что касается областей работы палочкового и колбочкового аппаратов сетчатки, то здесь можно ориентироваться следующими приблизительными данными:

* Кривые спектральной чувствительности глаза известны под названием кривых «видности» излучения.

** Для колбочкового (дневного) зрения наиболее светочувствительным местом сетчатки является фовеа, для палочкового (сумеречного) зрения — участки сетчатки, расположенные на $10-12^\circ$ в сторону от фовеа.

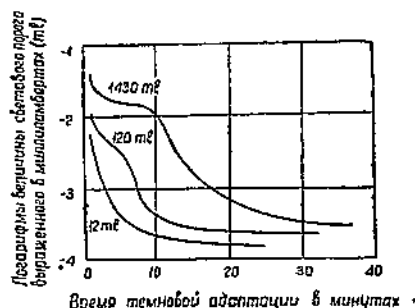


Рис. 213. Различный ход кривых темновой адаптации глаза в зависимости от уровня адаптации в момент начала опыта. Начальный уровень адаптационного состояния глаза дан в миллиламбертах (ml) ($1 ml = 10 асб$)

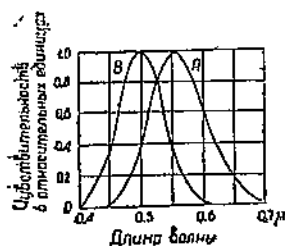


Рис. 214. Кривые видности для дневного (А) и сумеречного (В) зрения

Общий диапазон яркостей, при которых возможна работа глаза 10^{-11} сб — 10 сб
 Область работы колбочек 10^{-7} сб — 10 сб
 То же, для палочек 10^{-11} сб — 10^{-4} сб

Как видно из приведенных выше чисел, в области 10^{-4} сб — 10^{-7} сб имеет место совместная работа колбочек и палочек. Кривая видности для этой области яркостей имеет максимум, лежащий между $\lambda = 555$ $m\mu$ и $\lambda = 507$ $m\mu$.

Таблица 34

Величины световых порогов для различных уровней адаптационного состояния глаза

Продолжительность пребывания в темноте	Величины световых порогов при предварительной адаптации к яркостям (в мсб)			
	0,032	0,32	3,2	32
0 сек.	0,52	2,0	8,0	40
1 "	0,048	0,32	1,59	7,0
2 "	0,024	0,171	0,94	3,2
5 "	0,0101	0,052	0,26	1,10
10 "	0,0046	0,023	0,092	0,73
20 "	0,0032	0,0099	0,032	0,42
40 "	0,0022	0,0048	0,0156	0,20
60 "	0,00186	0,0028	0,0078	0,046
2 мин.	0,00095	0,00191	0,0047	0,024
5 "	0,00067	0,00095	0,00191	0,0065
10 "	0,00064	0,00067	0,00083	0,00134
20 "	0,00046	0,00051	0,00060	0,00080
30 "	0,00040	0,00044	0,00048	0,00054
40 "	0,00032	0,00035	0,00040	0,00048
50 "	0,00031	0,00033	0,00037	0,00040
60 "	0,00028	0,00029	0,00032	0,00032

§ 13. Контрастная чувствительность глаза

Мы различаем объекты благодаря контрасту между их цветом или яркостью и цветом или яркостью фона, на котором он проектируется*. Яркостный контраст характеризуется величиной контрастности

$$K = \frac{B_1 - B}{B}, \text{ где } B_1 \text{ — яркость объекта, а } B \text{ — яркость фона, на котором этот объект проектируется.}$$

В вопросе о видимости объектов на далеких и близких расстояниях большое значение имеет так называемая контрастная чувствительность глаза. Так называется отношение $\frac{B}{\Delta B}$ яркости фона B к минимальной, еще воспринимаемой глазом разности яркостей объекта и фона ΔB .

Обратная величина $\frac{\Delta B}{B}$ называется порогом контрастности: чем меньше порог контрастности и, следовательно, больше контрастная чувствительность наблюдателя, тем более пригодным является он для работы с мало контрастирующими деталями, для наблюдения в ночных условиях и т. д.

Контрастная чувствительность глаза, вообще разная для разных лиц и различная для колбочкового и палочкового зрения, зависит от ряда внешних факторов и, в первую очередь, от яркости поля адаптации. Последняя зависимость иллюстрируется кривой рис. 215 и данными таблицы 35. Оказывается, что с увеличе-

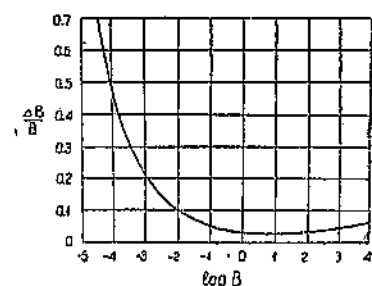


Рис. 215. Зависимость величины порога контрастной чувствительности глаза $\frac{\Delta B}{B}$ от яркости. Значения яркости B взяты в миллиламбертах (ml)

* См. ниже III, гл. 11, § 2.

Контрастная чувствительность глаза для разных яркостей поля адаптации

Яркость поля адаптации (в стильбах)	Величина едва ощутимой разно- сти яркостей $\Delta B = B_0 - B_{\text{ф}}$ (в стильбах)	Контрастная чувствитель- ность $\frac{B_{\text{ф}}}{\Delta B}$	Яркость поля адаптации (в стильбах)	Величина едва ощутимой разно- сти яркостей $\Delta B = B_0 - B_{\text{ф}}$ (в стильбах)	Контрастная чувствитель- ность $\frac{B_{\text{ф}}}{\Delta B}$
1,3	$4,5 \cdot 10^{-2}$	28,9	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	57,9
$6,5 \cdot 10^{-1}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	37,7	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$4,63 \cdot 10^{-5}$	56,3
$2,6 \cdot 10^{-1}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$	38,5	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	53,3
$6,5 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	58,9	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	34,5
$2,6 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	58,2	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$2,47 \cdot 10^{-7}$	26,3

нием яркости поля адаптации контрастная чувствительность растет, достигая максимального значения при 0,013 сб (400 асб). В пределах от 0,013 до 0,64 сб (20 000 асб) контрастная чувствительность не меняется, при яркостях же выше 0,64 — снижается. Снижение контрастной чувствительности при больших яркостях объясняют слепящим их действием.

Далее контрастная чувствительность зависит еще от размеров поля адаптации, угловых размеров объекта (подробнее см. ниже, гл. 10, § 3), наличия в поле зрения слепящих яркостей, одновременного раздражения других органов чувств (побочные раздражители) и т. д.

Для измерения величины контрастной чувствительности глаза применяются специальные приборы. Один из таких приборов, сконструированный и изготовленный в Государственном оптическом институте и предназначенный специально для отбора наблюдателей за самолетами, изображен на рис. 216.

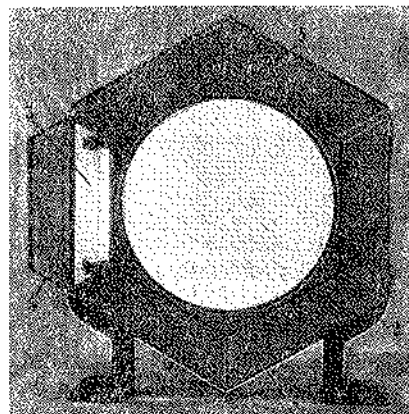


Рис. 216. Прибор для отбора наблюдателей за самолетами:

1 — белый яркий диск с фигурой самолета на нем; диск может вращаться; контрастность фигуры самолета по отношению к фону может плавно меняться от нуля до произвольной величины; 2 — основная коробка прибора; 3 — одна из ламп, освещающих диск; 4 — крышка, закрывающая осветитель; 5 — винт для закрепления крышки

§ 14. Порог ослепления

Вопрос о наибольшей яркости, которую глаз еще способен воспринимать, или о верхнем пределе светового ощущения, является в некоторой мере неопределенным. Действительно, при постепенном увеличении яркости, воздействующей на глаз, происходит включение в процесс восприятия вместо палочек — колбочек, далее сокращение диаметра зрачка и перемещение зерен черного пигмента. При очень значительных яркостях черный пигмент оказывается не в состоянии предохранять колбочки сетчатки от излишнего света, фиксируемая глазом поверхность или объект воспринимаются как слепящие, наблюдается ощущение боли, веки закрываются, наблюдатель не в состоянии спокойно смотреть на объект. Понятно, что ответ на вопрос, является ли та или иная яркость слепящей или нет, вызывает она болевое ощущение или нет, будет всегда носить в значительной степени субъективный характер.

Помимо всего прочего, величина слепящей яркости зависит и от уровня адаптационного состояния глаза. Источник света, который вовсе не слепит при адаптации глаза на какую-либо определенную яркость, может оказаться слепящим, непереносимым, если глаз адаптирован на яркость более слабую. В табл. 36 приведены значения впервые слепящих яркостей для разных уровней адаптационного

состояния глаза. Эти значения могут быть с известной степенью приближения вычислены по формуле

$$g = 8\sqrt[3]{B},$$

где g — впервые слепящая яркость в сб; B — яркость поля адаптации в сб.

Если в этой формуле положить $B = g$, то это будет означать, что само адаптационное поле является слепящим. Найденное при этих условиях значение g следует рассматривать как яркость безусловно слепящую, независимо от адаптационного состояния глаза. Подсчет показывает, что в этом случае $g = 22,5$ сб. Опыт показывает, однако, что уже меньшая яркость — 16,5 сб — может рассматриваться как яркость безусловно слепящая. Величина слепящей яркости зависит еще от угловых размеров слепящего поля, ее положения относительно глаза и т. д.

Таблица 36

Слепящие яркости для разных уровней адаптационного состояния глаза

Яркость поля адаптации (в сб)	Яркость, дающая ощущение ослепления (в сб)
$3,2 \times 10^{-10}$	$6,4 \times 10^{-3}$
$3,2 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-2}$
$3,2 \times 10^{-5}$	$2,18 \times 10^{-1}$
$3,2 \times 10^{-3}$	1,11
$3,2 \times 10^{-1}$	4,62
15,9	15,9

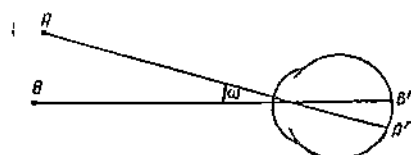


Рис. 217. Схематическое изображение предельного угла ω , при котором две точки A и B видны глазом раздельными. A' и B' — изображения точек на глазном дне

§ 15. Острота зрения

Для суждения о пригодности того или иного лица для наблюдений далеких или мелких объектов или работы с оптическими приборами решающее значение имеет определение остроты зрения.

Под остротой зрения понимают способность глаза различать раздельно две лежащие близко друг к другу точки, линии, квадраты или иные фигуры. Если две точки находятся на сравнительно большом расстоянии друг от друга, то глаз свободно видит разделяющий эти две точки промежуток. При постепенном сближении точек наступает такой момент, когда промежуток между точками перестает быть заметным для глаза и две точки сливаются в одну. Величина, обратная наименьшему угловому расстоянию между двумя точками, при котором глаз видит промежуток между точками, т. е. когда они представляются глазу раздельными, является мерой остроты зрения (рис. 217). Чисто условно считается, что острота зрения v равна 1,00, если минимальный угол ω между двумя точками, при котором точки эти видны раздельными, равен $1'$.

Острота зрения любого глаза оценивается, как отношение остроты зрения этого глаза к остроте зрения глаза, для которого $v = 1,00$.

Таким образом, острота зрения

$$\begin{aligned} v &= 1,00, \text{ если угол } \omega = 1' \\ v &= 2,00, \text{ " " } \omega = 30'' \\ v &= 0,50, \text{ " " } \omega = 2' \\ v &= 0,10, \text{ " " } \omega = 10' \end{aligned}$$

и т. д.

При установлении величины угла, соответствующего остроте зрения $v = 1,00$, предполагалось, что угол $\omega = 1'$ соответствует остроте зрения для среднего глаза. Основанием для такого предположения являлись, между прочим, результаты измерений поперечных размеров светочувствительных шестигранных клеток fovea, заключающих в себе каждый по одной колбочке (рис. 218). Считалось, что для того, чтобы две точки или две линии были видны раздельными, необходимо,

чтобы между двумя клетками или рядами клеток, на которые падают изображения этих точек или линий, одна клетка или ряд клеток оставались нераздраженными. В том случае, когда такой нераздраженной клетки или ряда клеток нет, глаз не видит промежутка между точками или линиями, и эти точки или линии не воспринимаются глазом раздельными.

Если, исходя из данных для среднего (схематического) глаза, рассчитать расстояние между изображениями двух точек или двух линий на сетчатке при угловом расстоянии между ними в $1'$, то получается величина, равная примерно 0,004 мм. Это же число миллиметров получается как средний результат измерения диаметра светочувствительных элементов в фовеа сетчатки.

Исследования последних лет показали, однако, что эта величина $1'$ является для среднего глаза величиной несомненно слишком большой.

Если полагать при $v = 1,00$ угол $\omega = 1'$, то острота зрения здорового человеческого глаза, как правило, оказывается равной не 1,00, а 1,25, 1,50 и даже выше. Случаи, когда острота зрения равна 2,0; 2,5 и 3,0 встречаются далеко не редко*. Соответствующие этим значениям остроты зрения расстояния между изображениями точек или линий на сетчатке значительно меньше средних диаметров светочувствительных элементов сетчатки, в связи с чем в настоящее время обязательное наличие нераздраженной клетки или ряда клеток между раздраженными уже не считается необходимым.

Предельная величина остроты зрения для того или иного глаза связывается со значением величины его контрастной чувствительности. Несовершенства оптической системы глаза (аберрации), астигматизм, явление дифракции и так далее приводят к тому, что изображения объектов, в том числе, например, черных точек и линий, видимых на светлом фоне, обычно не вполне резки. Не существует, следовательно, резкого перехода между яркостями отдельных участков сетчатки: такой переход всегда имеет плавный, постепенный характер. Будут или нет видны две точки или линии раздельными — зависит от того, выше или ниже порога контрастности разность в световых возбуждениях двух соседних колбочек или рядов колбочек.

При наличии достаточного контраста яркостей две точки или линии могут быть видны раздельными и тогда, когда расстояние между изображениями их на сетчатке меньше диаметра одной колбочки.

Возможность рассмотреть те или иные мелкие детали или части близких или далеких предметов, измерить их, сосчитать и т. д. в огромном большинстве случаев связана с вопросом о том, различимы или нет промежутки, отделяющие эти детали или части друг от друга. Отсюда и вытекает большое значение, которое имеют измерения величины остроты зрения для целей профотбора, правильной расстановки рабочей силы, расчета дальности видимости объектов, расчета и конструирования наблюдательных и измерительных оптических приборов, устройства шкал и т. д.

Для практических надобностей измерение остроты зрения проводится с помощью специальных таблиц, содержащих ряды черных знаков на белом фоне. Применяется очень большое число разнообразных знаков, в том числе буквы и цифры. Результаты, получаемые при помощи таблиц с разными типами знаков, несколько различаются между собою. Одной из весьма распространенных видов таблиц для определения остроты зрения является таблица с так называемыми знаками Снеллена (рис. 219). Толщины штрихов и белых промежутков между ними у знаков

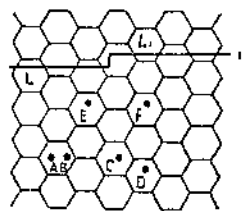


Рис. 218. Схематическое изображение элементов сетчатки. Точки A и B, C и D сливаются как неразделенные одним промежуточным нераздраженным элементом сетчатки, точки E и F видны раздельными

* Наблюдаются случаи, когда острота зрения равна даже 6,0. Большое значение в вопросе роста величины остроты зрения имеет тренировка наблюдателя.

Как показывают наблюдения, случаи особо высокой остроты зрения часто отмечаются у моряков, жителей степей, пустынь и т. д., привыкших к наблюдениям далеких объектов.

Снеллена, как впрочем и у всяких других, делаются такими, чтобы с определенного заданного расстояния они были видны глазу под углом в 1' (весь знак в пять раз по длине и ширине своей больше толщины одного штриха, т. е. виден под

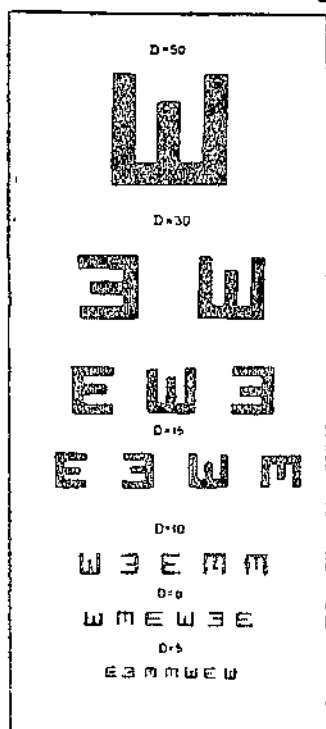


Рис. 219. Таблица для определения величины остроты зрения со знаками Снеллена

углом в 5'). Знаки в таблице сгруппированы в отдельные строки. В каждой строке помещаются разным образом повернутые знаки для одного и того же расстояния. Расстояние, с которого знаки одной и той же строки видны под углом в 1', помечается против каждой строки с левой стороны. С правой стороны, тоже против каждой строки, помечена острота зрения, при наличии которой знаки данной строки должны различаться с расстояния в 5 или 6 м (смотря по устройству таблицы). Для измерения остроты зрения испытуемый помещается на расстоянии 5 или 6 м от таблицы; смотря на таблицу поочередно каждым глазом в отдельности, он читает по порядку строки таблицы сверху вниз. Острота зрения, соответствующая последней, читаемой без ошибок строке, и будет остротой зрения испытываемого глаза.

Одним из других, часто применяемых для определения остроты зрения, знаков является так называемое кольцо Ландольта (рис. 220). Как видно из рисунка, оно имеет разрез. Толщина кольца и разреза равны и выбираются такими, чтобы быть видимыми наблюдателю под углом в 1'. Из колец Ландольта составляются таблицы по образцу таблицы рис. 219.

Как будет ясно из следующего параграфа, большое значение имеет вопрос об освещении таблицы. Результаты, получаемые при определении остроты зрения с помощью таблиц, должны рассматриваться как весьма приближенные.



Рис. 220. Знак Ландольта

Точное определение остроты зрения должно производиться иными, более сложными методами.

§ 16. Факторы, влияющие на остроту зрения

Острота зрения зависит от ряда факторов — как оптических, так и связанных со строением и функционированием сетчатки. Из оптических факторов на остроту зрения влияют те, которые определяют качество изображения на сетчатке. Связь остроты зрения с контрастной чувствительностью глаза (см. стр. 203) требует, чтобы контраст между светом и тенью на сетчатке был по возможности более резким, т. е. изображение на сетчатке внешних объектов было бы вполне отчетливым. Отсюда следует, что некорригированная аметропия и астигматизм, приводящие к размытости изображений на сетчатке, снижают остроту зрения. Из рис. 202 и 204 видно, что упомянутая нерезкость изображений на сетчатке имеет место как для миопического, так и для гиперметропического глаза, если такой глаз рассматривает далекие объекты и не аккомодирует. Если гиперметропия невелика, то при наличии соответствующего объема аккомодации возможно, аккомодируя, привести задний фокус глаза f' на сетчатку и иметь резкое изображение на ней, а следовательно, и высокую остроту зрения. В случае миопии аккомодация не может помочь различению далеких объектов. Для повышения остроты зрения и устранения необходимости непрерывно и значительно аккомодировать необходима коррекция аметропии очковыми линзами (см. § 21). При наблюдениях с помощью оптических приборов при небольших степенях аметропии применение корригирую-

щих линз может быть заменено соответствующей установкой подвижных окуляров прибора *.

Особенно большую роль в смысле снижения остроты зрения играет астигматизм глаза: если соответствующей установкой окуляров оптических приборов или аккомодацией возможно корригировать небольшие степени миопии или гиперметропии, то астигматизм глаза таким путем корригирован быть не может. Поэтому при наличии астигматизма глаза необходимо при работе с оптическими приборами обязательно пользоваться очками с корригирующими линзами.

Если аметропия отсутствует или правильно корригирована, резкого изображения на сетчатке может не быть и в силу ряда иных причин. Основными из них являются: сферическая aberrация глаза, хроматическая aberrация и дифракционные явления при прохождении света через зрачок глаза.

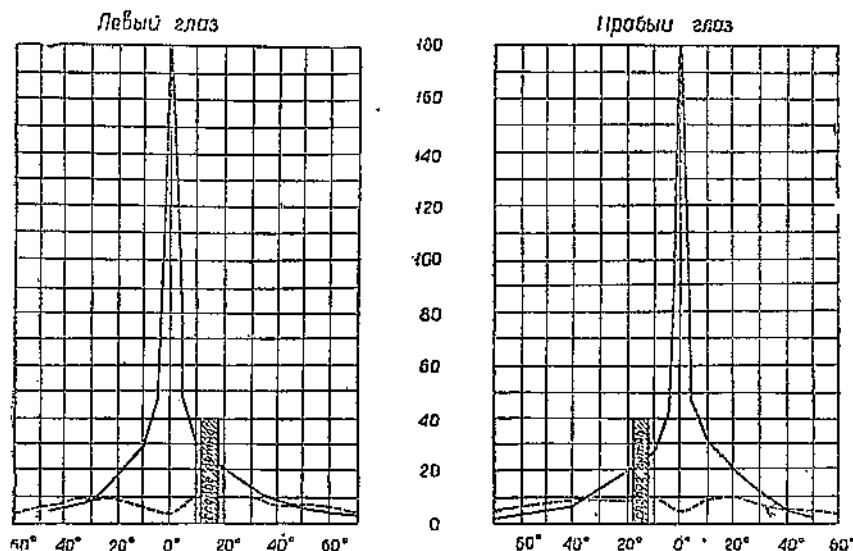


Рис. 221. Зависимость величины остроты зрения от места на сетчатке. На оси абсцисс — удаление от fovea в градусах. На оси ординат — величина остроты зрения в относительных единицах

Как сферическая aberrация, так и дифракционные явления в глазу зависят от диаметра зрачка глаза. Чем больше диаметр зрачка, тем больше нерезкость изображений на сетчатке, являющаяся следствием наличия сферической aberrации. При уменьшении диаметра зрачка возрастает резкость изображения на сетчатке глаза, растет и острота зрения глаза. При малом зрачке, однако, резкость изображения на сетчатке снова падает, на этот раз уже в результате образования дифракционных колец вокруг изображения каждой светящейся точки. Как расчет, так и наблюдения показывают, что максимальная острота зрения имеет место при диаметре зрачка в 3—4 мм. Такой диаметр зрачка, в среднем, имеет глаз в условиях работы в дневное время. При малых освещенностях ночью или в сумерки диаметр зрачка значительно больше, в связи с чем острота зрения в этих условиях ниже.

Хроматическая aberrация глаза также сказывается отрицательно на остроте зрения, поскольку и в этом случае страдает резкость изображения на сетчатке глаза. Как показывают опыты, при использовании в качестве источника света монохроматического излучения, острота зрения повышается. Особенно благоприятным для работы глаза оказывается монохроматический желтый свет ($\lambda = 580 \text{ мμ}$).

Связь остроты зрения со структурой сетчатки делает понятным тот факт, что в разных местах сетчатки острота зрения не одинакова. Согласно кривой рис. 221,

* Подробнее об установке окуляров прибора см. § 22.

в условиях дневного зрения, т. е. при работе колбочек, максимальная острота зрения приходится на *fovea centralis*. По мере удаления от *fovea* острота зрения быстро падает, достигая, например, при удалении от *fovea* на 60° только примерно $\frac{1}{100}$ фовеальной остроты зрения. Для сумеречного, или палочкового, зрения острота зрения имеет максимальное значение не в центральной части сетчатки, а для мест сетчатки, расположенных на $15-20^\circ$ от *fovea*.

Все пространство перед глазом, в котором возможно различение объектов при неподвижном глазе, называется полем зрения. Границы поля зрения неодинаковы у разных глаз и для объектов разных цветов и размеров.

Средние числовые данные для границ поля зрения: для белого света — вверх 60° , вниз 70° , к носу 60° , к виску 100° .

Чрезвычайно большое значение имеет зависимость остроты зрения от интенсивности освещения. Как показали опыты, при росте освещенности до 60—80 асб наблюдается чрезвычайно быстрый рост остроты зрения. При дальнейшем росте освещенности острота зрения растет, но уже значительно медленнее. При освещенности выше 1000 асб рост остроты зрения прекращается (рис. 222).

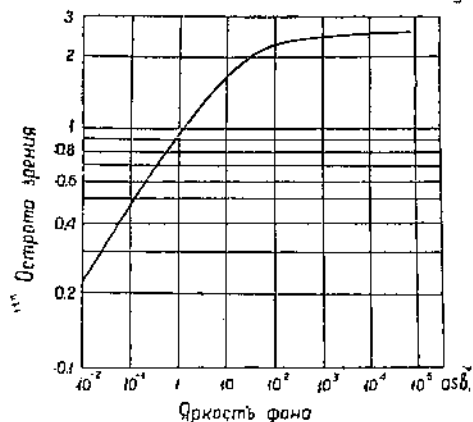


Рис. 222. Зависимость величины остроты зрения от яркости фона

Из числа других факторов, влияющих на остроту зрения, упомянем о так называемых побочных раздражениях. Под побочными раздражениями понимают световые раздражения другого, ненаблюдающего глаза: раздражения слуховые, вкусовые или обонятельные. Как показывают опыты, при наблюдениях темных объектов на светлом фоне острота зрения наблюдающего глаза больше в том случае, если второй глаз засвечен или если в момент наблюдения слух, обоняние или вкус раздражаются со-



Рис. 223. Расположение объектов — линии при испытании величины номинальной остроты зрения

ответственно шумом, запахом или раздражающими вкус веществами. Обратное действие оказывают те же побочные раздражители на остроту зрения при различении светлых объектов на темном фоне. Действием засвета ненаблюдающего глаза и отчасти сокращением зрачка при наблюдениях двумя глазами объясняется известный факт наличия более высокой остроты зрения при бинокулярных наблюдениях по сравнению с остротой зрения при наблюдениях одним глазом.

В заключение упомянем об интересных и важных для практики явлениях особой высокой остроты центрального зрения для случая наблюдения смещения двух, одна под другой расположенных, линий и периферического — для рассматривания движущихся объектов.

В том случае, когда две прямые линии расположены не рядом друг с другом, а так, что одна составляет продолжение другой (рис. 223), и наблюдателю предлагается определить наименьшее смещение этих линий относительно первоначального положения, при котором обе линии сливаются в одну, — острота зрения глаза оказывается особенно высокой, превышая условную единичную остроту зрения в 10—15 и даже 20 раз. Такая высокая чувствительность глаза к смещению двух прямых линий имеет большое значение при пользовании шкалами, нониусами и разными приспособлениями, применяемыми в оптических приборах.

Другой важный, опытным путем установленный факт — это сравнительно высокая острота зрения периферических частей сетчатки для случая движущихся объектов*.

* Отметим, что в тех случаях, когда перед глазом ставится задача решить вопрос: виден объект или нет, без учета его формы или иных отличительных особенностей, мы по существу дела имеем в виду не остроту зрения, а так называемую остроту различения.

Оказывается, что объект, невидимый по своим размерам для периферических частей сетчатки (например, птица, парящая в небе), может замечаться нами в том случае, когда он движется.

§ 17. Возникновение светового ощущения. Последовательные образы. Восприятие мельканий

Было указано, что зрительное ощущение возникает в нашем сознании в результате процессов распада светочувствительного вещества в колбочках и палочках. Эти процессы протекают во времени, отчего моменты действия света на сетчатку и возникновения зрительного ощущения должны быть разделены некоторым промежутком времени. Экспериментальные исследования и в частности изучение электроретинограмм (рис. 208) подтверждают это заключение. Установлено, что время, потребное для возникновения зрительного ощущения, зависит от интенсивности источника света и длины волны излучения. В среднем это время колеблется от 0,1 до 0,25 сек. Возникшее зрительное ощущение не пребывает неизменным в течение всего времени наблюдения; как показывают кривые рис. 224, вначале интенсивность ощущения быстро нарастает, затем по достижении некоторого максимума наблюдается значительно более медленное спадание субъективно воспринимаемой яркости до некоторого ее постоянного уровня.

Если источник света, вызвавший световое ощущение, прекратил свое действие, то вызванное им световое раздражение не исчезает сразу: мы продолжаем видеть этот источник света еще в течение некоторого времени после того, как он исчез. Именно потому быстро движущаяся светящаяся точка (например, ракета) воспринимается нами в виде сплошной светящейся линии.

Посмотрев в течение некоторого времени на яркую электрическую лампочку, а затем на черную бумагу или материю, мы в течение некоторого времени будем на этой бумаге или материи наблюдать светлое пятно, соответствующее по своей форме лампочке. Причина существования таких остаточных, или, как их обычно называют, последовательных, образов лежит в том, что продукты фотохимического распада зрительного пурпура не исчезают мгновенно, а только через определенный промежуток времени. С другой стороны, те места сетчатки, которые подвергались раздражению, оказываются по сравнению с другими менее чувствительными к свету, поскольку запас неизрасходованного светочувствительного вещества в них после окончания раздражения меньше. Это явление легко наблюдается, если после исчезновения первого последовательного образа от электрической лампочки, воспринимаемого в виде светлого пятна на темном фоне, мы переведем наш взгляд на светлую или белую поверхность. На такой поверхности мы в течение сравнительно значительного промежутка времени будем различать уже темное пятно, соответствующее тому участку сетчатки, где чувствительность притупилась в результате предшествовавшего раздражения светом лампочки. Степень такого притупления чувствительности зависит, конечно, от интенсивности раздражителя, т. е. яркости засвечивающего сетчатку источника света. Такие последовательные образы разной интенсивности от ярких источников света или ярких поверхностей мы в процессе зрительной работы имеем постоянно в поле нашего зрения. С существованием их приходится серьезно считаться при проектировании осветительных установок и рационализации условий проведения различных наблюдений как невооруженным глазом, так и при помощи оптических приборов.

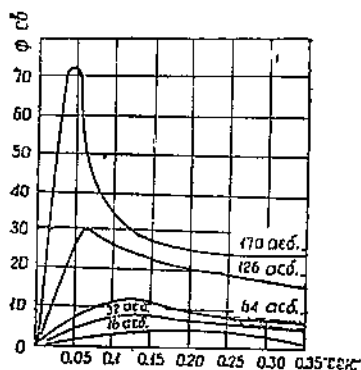


Рис. 224. Развитие светового ощущения во времени. По оси абсцисс отложено время воздействия светового раздражения в секундах, по оси ординат — видимая яркость раздражения в данный момент в фут-свечах (1 фут-свеча = 10,76 асб). Надписи над кривыми — видимая яркость раздражителя при неограниченном времени наблюдения

В связи с вопросом о возникновении и исчезновении световых ощущений стоит вопрос о восприятии глазом так называемых мигающих или мелькающих источников света. Так называются источники света, излучающие свет не непрерывно, а отдельными, периодически повторяющимися, вспышками. Мигающие источники света применяются в морских и воздушных маяках, в сигнальном деле и т. д. Ощущение мелькания, имеющее место при восприятии глазом таких мигающих источников света, при увеличении числа смен света и темноты в единицу времени постепенно исчезает, и источник света кажется глазу излучающим постоянный немигающий свет. Наименьшее число мельканий, при котором глаз начинает видеть источник света излучающим постоянный свет, т. е. перестает различать мелькания, известно под названием критической частоты мельканий. Критическая частота мельканий зависит от интенсивности излучения мигающего источника света, состояния адаптации глаза, места на сетчатке и т. д. Воспринимаемая глазом яркость мигающего источника света при числе мельканий выше критической частоты мельканий, т. е. в условиях, когда мигающий источник представляется глазу излучающим постоянный, немигающий свет, оказывается меньшей, нежели истинная яркость мигающего источника света.

Согласно так называемому закону Тальбота, субъективно воспринимаемая яркость B_c мигающего источника света во столько раз меньше истинной яркости источника света B_0 , во сколько раз длительность одной вспышки источника света t меньше длительности всего периода смены света и темноты, т. е. суммы времен одной вспышки и одного промежутка темноты — T . Таким образом,

$$\frac{B_c}{B_0} = \frac{t}{T}.$$

Для частоты мельканий ниже критической, т. е. когда мелькания источника света заметны, не сливаются в одно непрерывное впечатление света, закон Тальбота уже несправедлив. Однако и в этих условиях эффект мелькания сказывается в виде уменьшения субъективно воспринимаемой яркости мигающего источника света по сравнению с его истинной яркостью.

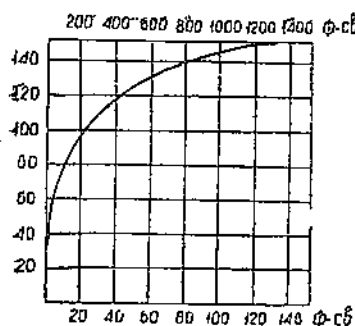


Рис. 225. Зависимость скорости восприятия от освещенности. По оси ординат отложена величина $\frac{1}{T}$, где T — минимальный промежуток времени, необходимый для различения объекта. По оси абсцисс — освещенность фона в фут-свечах. Нижняя шкала соответствует случаю наблюдения черных объектов на белом фоне. Верхняя шкала соответствует случаю наблюдения черных объектов на сером фоне

§ 18. Быстрота восприятия. Устойчивость ясного видения

Проводя опыты по различению глазом мелких объектов, проектирующихся на фоне, по своей яркости в различной степени контрастирующем с яркостью объектов, легко заметить, что на различение объекта, т. е. опознавание его формы, направленности и т. д., требуется известный промежуток времени и что время это зависит, помимо всего прочего, от степени контраста между объектом и фоном, или, иными словами, для случая черных объектов — от яркости или освещенности фона. Соответствующая зависимость этих двух величин изображена в виде кривой рис. 225. Нетрудно видеть, что быстрота восприятия с увеличением освещенности быстро растет, причем замедление этого роста отмечается при освещенностях не ниже 100 люкс.

Те же опыты по различению мелких объектов дают возможность убедиться и в том, что при внимательном рассматривании таких объектов периоды времени, в течение которых объекты эти видны отчетливо, сменяются периодами времени, когда объекты эти видны расплывчато, неясно. Явление это, подобное тому, какое имеет место и при различении весьма слабых звуков, например тиканья часов,

особенно резко проявляется тогда, когда размеры рассматриваемых объектов очень малы и соответствуют предельной остроте зрения данного глаза.

В результате описанного явления, природа которого не вполне ясна, только часть общего промежутка времени, затрачиваемого глазом на рассматривание объектов, оказывается использованным полезно, остальное же время оказывается практически бесполезным. Отношение этих двух времен друг к другу характеризует степень полезного использования глаза в процессе работы, или так называемую устойчивость ясного видения.

Весьма существенным для создания рациональных условий наблюдений является то обстоятельство, что увеличение освещенности оказывает благоприятное действие и на устойчивость ясного видения. Как видно из кривой рис. 226, при увеличении освещенности устойчивость ясного видения растет, достигая оптимальных значений, примерно, уже при 200 люкс.

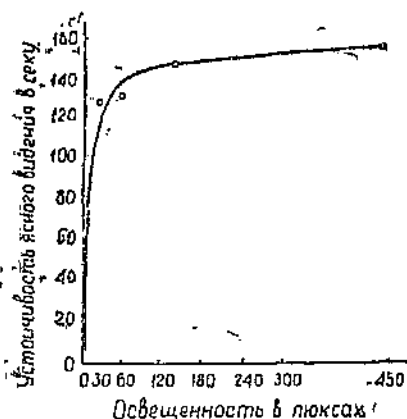


Рис. 226. Зависимость устойчивости ясного видения от освещенности

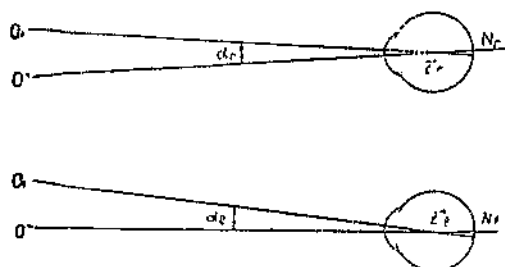


Рис. 227. Бинокулярное зрение на далеком расстоянии:

O и O_1 — рассматриваемые далекие объекты; N_1 и N_2 — fovea centralis; α_1 и α_2 — углы поворота глаза

§ 19. Бинокулярное зрение

При описании всех предыдущих разделов имелся в виду человеческий глаз в отдельности. В настоящем разделе мы коротко коснемся особенностей зрения двумя глазами (бинокулярное зрение).

Отметим прежде всего, что если рассматриваемый объект находится далеко, зрительные оси обоих глаз параллельны (рис. 227). Изображения объектов в каждом глазу получаются на fovea. Опыт показывает, что в этом случае мы видим один объект. Если фиксируемая глазом точка или объект расположены на конечном расстоянии перед глазом, то для того, чтобы ясно видеть их, оба глаза поворачиваются в своих орбитах и принимают такое положение, при котором зрительные оси пересекаются на рассматриваемом объекте или отдельной его детали, на которую в данный момент обращено внимание. Такое положение глаз изображено на рис. 228. В этом случае изображения рассматриваемой точки попадают на fovea centralis каждого из глаз, и объект воспринимается как одиночный. Угол α , составляемый зрительными осями глаз, называется углом конвергенции. Величина его зависит от положения объекта и расстояния между точками $Z'_{\text{пр}}$ и $Z'_{\text{лев}}$, вокруг которых вращаются глаза. Точки $Z'_{\text{пр}}$ и $Z'_{\text{лев}}$ называются центрами вращения глаз.

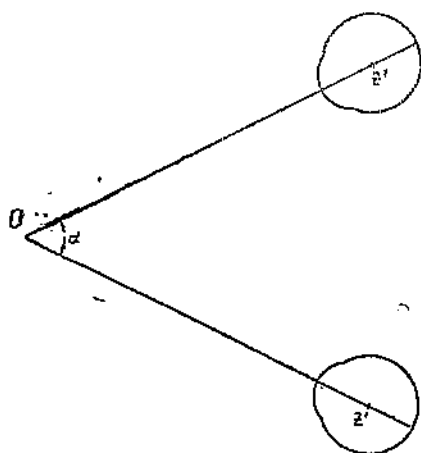


Рис. 228. Бинокулярное зрение на близком расстоянии

Если точка O , в которой пересекаются зрительные оси двух глаз (рис. 229), видна одиночной, то как воспринимаются при этом другие точки пространства, например точки, воспринимаемые уже не центральным, а периферическим зрением?

Опыт показывает, что это зависит от того, какое относительное положение на сетчатках двух глаз займут изображения этих точек, окружающих точку O . Среди точек сетчатки различают так называемые идентичные и диспаратные.

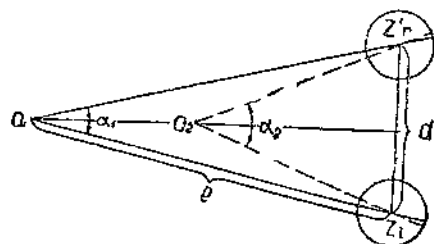


Рис. 229. Углы конвергенции для объектов, находящихся на разных расстояниях перед глазом:

O_1 и O_2 — рассматриваемые объекты; α_1 и α_2 — углы конвергенции; Z_1 и Z_2 — центры вращения глаза; d — расстояние между центрами вращения

Если мы представим себе сетчатку одного глаза смещенной параллельно себе и наложенной на сетчатку другого глаза так, что обе fovea centralis совпадут друг с другом, то все идентичные точки будут лежать друг на друге. Отсюда следует, что идентичные точки одинаково удалены от fovea, и притом в одном и том же направлении. Если для двух точек сетчаток двух глаз это положение не будет иметь места, точки называются диспаратными.

Среди окружающих фиксируемую глазом точку O будут такие, изображения которых упадут на идентичные точки сетчатки, и такие, изображения которых будут находиться на диспаратных точках сетчатки. Точки, дающие изображения, падающие на идентичные места сетчатки, воспринимаются как одиночные, точки же, изображения которых падают на диспаратные места сетчатки, воспринимаются как двойные. В справедливости сказанного можно убедиться, смотря на указательные пальцы двух рук, расположенные так, что один палец ближе к наблюдателю, нежели другой. Если смотреть внимательно на ближайший к наблюдателю палец, т. е. аккомодировать на него, то более удаленный палец будет виден двойным. Наоборот, если фиксировать взгляд на втором, более удаленном пальце, то первый, находящийся ближе к наблюдателю, будет двоиться.

Точки, изображения которых падают на идентичные места сетчатки, располагаются перед наблюдателем на особой поверхности, известной под названием поверхности горютера. Пересечение поверхности горютера горизонтальной плоскостью изображено на рис. 230. Как видно из этого рисунка, лежащие на горютере точки O_1 , O_2 и O_3 дают изображения на идентичных точках сетчатки, точка O_4 , лежащая вне горютера, — на диспаратных. Каждому положению точки O , которую фиксируют глаза и на которой пересекаются зрительные оси глаз, соответствует особая поверхность горютера, имеющая в разных случаях разную форму. Не всегда, однако, в тех случаях, когда изображение точек не лежит на идентичных местах сетчатки, мы ощущаем двоение. Если диспаратность невелика и если при этом в обоих глазах изображения падают на одинаковые половины сетчаток (т. е. обе правые или обе левые), вместо явления двоения точек мы получаем впечатление глубины, т. е. точки кажутся нам расположенными на различных от нас расстояниях. Подробнее об этом в следующем параграфе.

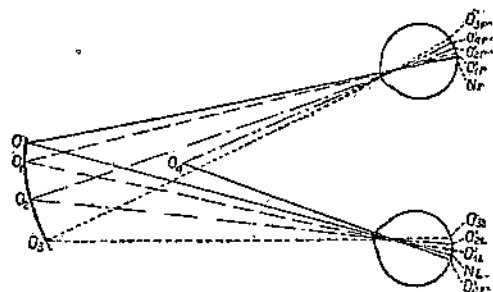


Рис. 230. Кривая горютера:

O — рассматриваемая точка (видна центральным зрением); O_1, O_2, O_3 и O_4 — точки, видимые периферическим зрением глазами, фиксирующими точку O ; O_1', O_2', O_3', O_4' — изображения точек O_1, O_2, O_3 и O_4 на сетчатке правого и левого глаза; N_1 и N_2 — fovea centralis правого и левого глаза

В заключение отметим, что акт конвергенции тесно связан с актом аккомодации. Если смотреть на точку O (рис. 228), расположенную вблизи от наблю-

дателя, то зрительные оси глаз образуют угол конвергенции α . Соответственно этому углу конвергенции α имеется определенное напряжение аккомодации. Конвергировать не аккомодируя и аккомодировать не конвергируя мы не можем.

С актами аккомодации и конвергенции связан еще и третий акт — изменение диаметра зрачка глаза. При рассматривании близких предметов попутно с напряжением мышц, обуславливающих наличие аккомодации и конвергенции, имеет место напряжение мышц, сокращающих зрачок, благодаря чему диаметр последнего уменьшается. Уменьшение диаметра зрачка сказывается положительно на резкости изображений на сетчатке.

§ 20. Восприятие глубинности пространства. Острота глубинного зрения

Восприятие глубинности пространства имеет место при использовании как одного глаза (монокулярно), так и двух глаз (бинокулярно). Достаточно закрыть один из двух глаз и в течение некоторого времени наблюдать им окружающие предметы, а затем открыть второй глаз для того, чтобы убедиться в том, насколько бинокулярное восприятие глубины совершеннее монокулярного.

Относительное расположение объектов при зрении одним глазом оценивается нами по ряду косвенных признаков. К ним относятся: сравнение видимых размеров рассматриваемых объектов с размерами предметов, величина которых известна наблюдателю из опыта, изменения в цвете и расположении света и теней, наложение контуров объектов друг на друга, ощущение разницы в аккомодационном напряжении и др. Чрезвычайно существенным фактором, облегчающим монокулярное восприятие глубины, является относительное параллактическое смещение объектов друг относительно друга, имеющее место при перемещении глаза наблюдателя.

Аккомодируя на какой-то объект, нетрудно заметить, что при смещении головы или корпуса наблюдателя объекты, лежащие ближе или дальше того объекта, который рассматривается глазом, совершают кажущиеся по отношению к рассматриваемому объекту движения, причем более удаленные объекты движутся в ту же сторону, в какую движется глаз наблюдателя, объекты же, расположенные ближе к наблюдателю, совершают движения в обратную сторону. Поскольку скорости таких видимых параллактических движений объектов зависят от отстояний их от фиксируемого глазом объекта, наблюдатель получает возможность использовать описанное явление для заключения об относительном расположении объектов вокруг него.

Немалое значение имеет для суждения о телесности объектов и мысленное сравнение виденной и удерживаемой в памяти картины объектов, соответствующей одному положению глаза, с измененной вследствие смещения центра проекции картиной тех же объектов, видимой при новом положении глаза. Все перечисленные выше факторы, обуславливающие восприятие глубинности пространства одним глазом, остаются в силе, конечно, и для бинокулярного зрения. В условиях последнего, однако, помимо всех этих факторов, имеют место еще два, из которых наиболее важное значение имеет второй, ибо он-то, согласно современным взглядам, и обуславливает собою превосходство бинокулярного зрения над монокулярным.

В условиях бинокулярного зрения каждому положению объекта соответствует определенный угол конвергенции. Если объекты расположены недалеко от наблюдателя, последний может использовать ощущение напряжения обуславливающих конвергенцию глазных мышц для суждения о том, какой объект находится ближе и какой дальше.

Основным фактором, однако, в бинокулярном восприятии глубины является учет в нашем сознании тех различий в изображениях внешних объектов на сетчатке каждого из двух глаз, которые обуславливаются различными положениями глаз и, следовательно, центров проекции. В результате этих различий одна и та же точка или деталь изображений попадает не на идентичные, а на диспаратные точки сетчаток двух глаз. При небольших различиях в изображениях на

сетчатках двух глаз и, следовательно, небольших степенях диспаратности для отдельных точек этих изображений, оба изображения внешних объектов сливаются в нашем сознании в одно представление о находящемся перед нами пространстве, в отношении глубинности и рельефности значительно превосходящее то, которое мы можем иметь при монокулярном зрении.

Способность ощущать глубину и пространственное смещение объектов друг относительно друга у разных людей неодинакова: различная степень такой способности объясняется как особенностями физиологического порядка, так и наличием определенной тренировки.

Численно эта способность оценивать глубинное смещение объектов друг относительно друга оценивается величиной разности двух так называемых параллактических углов. Если точки L и R (рис. 231) будут обозначать соответственно левый и правый глаза наблюдателя, а точки Q и P — два объекта, различно удаленные от наблюдателя, то углы $LQR = \alpha$ и $LPR = \beta$ и будут представлять собою соответственно параллактические углы для объектов Q и P .

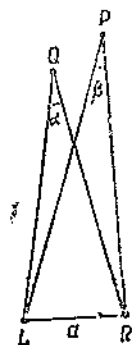


Рис. 231.
Параллактические углы:

R — правый глаз; L — левый глаз; Q и P — рассматриваемые точки; a — расстояние между зрачками; α и β — параллактические углы

Разность двух параллактических углов α и β , соответствующая минимальному расстоянию между объектами, при котором они кажутся смещенными друг относительно друга по глубине, называется порогом глубинного зрения и обозначается буквой δ . Величина порога глубинного зрения в большой степени зависит от условий, в которых она определяется, — от яркости фона, контрастности объектов по отношению к фону и друг к другу, толщины* объектов, расстояний между ними, а также от индивидуальных особенностей наблюдателя. В значительной степени на величину δ влияет тренировка наблюдателя. В связи со сказанным выше, величина порога глубинного зрения при использовании различных методов получается разная. В среднем можно считать ее равной $2-5''$. Приведенные значения порога глубинного зрения относятся к случаю, когда время наблюдений ничем не ограничено. При ограничении времени наблюдений величина порога глубинного зрения растет.

Вопрос о глубинном зрении и в частности о пороге глубинного зрения имеет большое значение для военного дела, поскольку в таких приборах, как стереоскоп, стереодальномер и стереовысотомер, глазу наблюдателя предлагается совмещать по глубине видимые им в поле зрения объекты.

Устройству этих приборов, основанных на использовании способности оценивать смещение объектов по глубине, посвящены главы 23 и 24 настоящей книги (том II).

§ 21. Принцип коррекции аметропического глаза

Одним из условий высокой остроты зрения и хорошей контрастной чувствительности глаза является наличие на сетчатке резких изображений внешних объектов. Некорригированные аметропия и астигматизм могут, и притом очень значительно, портить изображения на сетчатке в отношении их резкости, в связи с чем коррекция аметропии и астигматизма очковыми линзами является совершенно необходимым условием для проведения любой ответственной зрительной работы.

Как уже указывалось, аметропический глаз при покое аккомодации установлен на бесконечность, иначе говоря, — на сетчатке этого глаза собираются параллельные лучи. Сказанное не имеет места для случаев миопического или гиперметропического глаза. Задачей корригирующей аметропию очковой линзы и является обеспечить на сетчатке резкое изображение далеких объектов при покое аккомодации. Нетрудно понять, что достигнуть этого возможно, помещая перед

* Обычно для определения порога глубинного зрения применяются объекты в виде круглых вертикальных стержней.

глазом линзу, задний главный фокус которой совпадает с дальнейшей точкой глаза. В случае миопического глаза (рис. 232) для этой цели должна быть применена отрицательная (рассеивающая) линза, в случае гиперметропии коррекция достигается положительной (собирающей) линзой (рис. 233).

Совпадение заднего главного фокуса корригирующей линзы с дальнейшей точкой глаза является условием правильной коррекции аметропии.

Как видно из рис. 232 и 233, рефракция корригирующей линзы для одного и того же глаза может быть разной, в зависимости от положения очковой линзы относительно глаза. Действительно, поскольку условие совпадения заднего главного фокуса очковой линзы с дальнейшей точкой глаза должно быть соблюдено, всякое изменение положения очковой линзы относительно глаза связано с изменением ее фокусного расстояния, а следовательно, и ее рефракции.

Связь между величиной рефракции корригирующей линзы и ее расстоянием от глаза выражается следующей простой формулой, в справедливости которой нетрудно убедиться, рассматривая рис. 232 и 233:

$$F_1' = \alpha + \delta, \quad (21,1)$$

где F_1' — заднее фокусное расстояние корригирующей очковой линзы;

α — расстояние от передней главной точки глаза до дальнейшей точки и

δ — расстояние от задней главной точки корригирующей линзы до передней главной точки глаза.

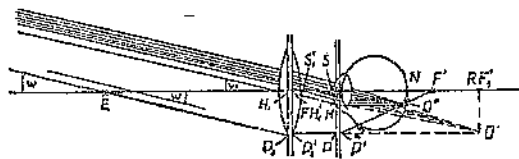


Рис. 233. Принцип коррекции гиперметропического глаза:

F_1' — задний главный фокус глаза; F_1' и F_1 — главные фокусы корригирующей линзы; R — дальнейшая точка глаза; S_1' — задняя вершина корригирующей линзы; S — вершина роговицы; H_1 , H_1' , H и H' — главные точки линзы и глаза; O' — изображение точки O , даваемое глазом; O'' — изображение точки O' , даваемое глазом

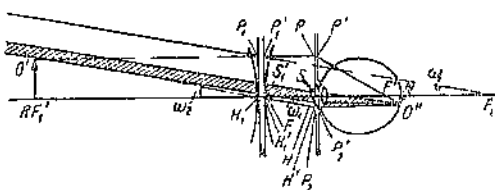


Рис. 232. Принцип коррекции миопического глаза:

F_1' — задний главный фокус глаза; F_1' и F_1 — главные фокусы корригирующей линзы; R — дальнейшая точка глаза; S_1' — задняя вершина корригирующей линзы; S — вершина роговицы; H_1 , H_1' , H и H' — главные точки линзы и глаза; O' — изображение точки O , даваемое линзой; O'' — изображение точки O' , даваемое глазом

Вставляя в эту формулу вместо отрезков их обратные значения в диоптриях, получаем формулу:

$$D_1 = \frac{A}{1 + \delta A}, \quad (21,2)$$

в которой D_1 — рефракция корригирующей линзы;

A — аметропия;

значение же δ — указано выше*.

Из приведенных формул (21,1) и (21,2) видно, что рефракция корригирующей линзы и аметропия глаза не равны по величине и отличаются друг от друга тем больше, чем дальше отстоит линза от глаза. Это обстоятельство следует обязательно иметь в виду при назначении и изготовлении очков.

Среди данных, сообщаемых оптику для изготовления очков, должно быть непременно указано, для какого значения расстояния от очковой линзы до глаза.

* Вместо формул (21,1) и (21,2) часто пользуются формулами

$$v_1' = \alpha + \delta \text{ и } A' \infty = \frac{A}{1 + \delta A}.$$

В этих формулах вместо отрезка δ , отсчитываемого от главной точки глаза, фигурирует отрезок δ , отсчитываемый от передней вершины роговицы.

В соответствии с этим, вместо величин F_1' и D_1 , в эти формулы входят величины v_1' — вершинное фокусное расстояние и $A' \infty$ — вершинная рефракция линзы (см. выше, стр. 180).

δ даются сообщаемые оптику числа диоптрий в рефракции линз. Если при подгонке очковой оправы к лицу не удается сохранить за корригирующей очковой линзой то ее положение относительно глаза, какое указано в предписании оптику, последний обязан, пользуясь приведенными выше формулами или специально рассчитанными таблицами, найти новое значение рефракции линзы, соответствующее новому значению δ. Соответственно результатам пересчета и должна быть выбрана вставляемая в очковую оправу линза. Для измерения расстояния от очковой линзы до глаза применяются специальные несложные приборы.

Коррекция миопического и гиперметропического глаза осуществляется очковыми линзами со сферическими поверхностями. Иное в случае астигматического глаза. Последний имеет не одну, а две дальнейшие точки соответственно двум значениям аметропии в двух главных сечениях глаза. Условие правильной коррекции аметропии должно быть выполнено для обоих главных сечений астигматического глаза. Для каждого из этих сечений задний фокус корригирующей линзы должен совпадать с соответствующей дальнейшей точкой глаза. Для выполнения этого условия необходимо пользоваться линзами, имеющими не одно фокусное расстояние и не одну рефракцию, а две — особые для каждого из главных сечений линзами. Такими линзами являются, как известно, астигматические линзы.

Если астигматическая линза правильно выбрана, т. е. задние фокусы каждого из ее двух главных сечений действительно совпадают с соответствующими дальнейшими точками глаза, то на сетчатке корригированного такой линзой астигматического глаза далекие объекты будут изображаться при покое аккомодации резко, — так, как это имеет место в эметропическом глазу. Существенно и в случае астигматического глаза учитывать роль δ — расстояния между линзой и глазом. Линза, помещенная не на том расстоянии, для которого она рассчитана, не сможет обеспечить резкого изображения на сетчатке, а следовательно, и высокой остроты зрения. Для коррекции астигматического глаза могут применяться как цилиндрические и сферо-цилиндрические, так и сферо-торические линзы.

§ 22. Коррекция аметропии выдвижением окуляра оптического прибора

Для коррекции аметропии глаза часто при работе с визуальными оптическими приборами вместо очков пользуются выдвижным окуляром прибора. При некотором среднем положении окуляра, соответствующем делению 0 диоптрийной шкалы на нем, из окуляра выходят параллельные лучи. Эметропический глаз в этом случае увидит рассматриваемый объект отчетливо при покое аккомодации. При передвижении окуляра в ту или иную сторону форма пучка, выходящего из окуляра, будет меняться: при выдвижении окуляра пучок из параллельного делается сходящимся, при ввинчивании окуляра, наоборот, — расходившимся. Соответственно положению дальнейшей точки перед глазом у близорукого глаза и за глазом для дальнозоркого глаза, возможно корригировать близорукость вместо очков соответствующим ввинчиванием окуляра и дальнозоркость — соответствующим его выдвижением.

Обычно на окулярной трубке прибора бывает нанесена диоптрийная шкала, позволяющая правильно установить окуляр соответственно той или иной степени аметропии глаза. На практике, однако, часто лицо, пользующееся оптическим прибором, устанавливает окуляр не соответственно своей аметропии по диоптрийной шкале окуляра (для чего, конечно, он должен знать величину аметропии своего глаза), а руководствуясь резкостью рассматриваемых через прибор отдаленных объектов или натянутых в фокальной плоскости окуляра нитей. Такая установка окуляра на глаз по резкости видимых через него объектов неправильна, поскольку она не обеспечивает работы глаза в условиях отсутствия напряжения аккомодации. Оказывается, что при такой установке окуляра наблюдатель, как правило, „залезает в область аккомодации“. Это значит, что эметроп устанавливает окуляр не на 0 дптр, а, например, на $-1,0$ дптр, или $-2,0$ дптр,

близорукий с аметропией, например, в $-3,0$ дптр на $-4,0$ дптр или $-5,0$ дптр; гиперметроп — на меньшую гиперметропию, нежели та, которой он обладает в действительности. Величина ошибки в установке окуляров таким способом достигает $3,0$ дптр и больше.

В результате глаз работает не в условиях отсутствия аккомодационного напряжения, как это обычно предполагается, а при наличии напряжения аккомодации.

Если прибор монокулярный, т. е. все наблюдения ведутся одним глазом, наличие описанной выше ошибки в установке окуляров приводит лишь к излишнему напряжению аккомодации при длительных и непрерывных наблюдениях, могущему вызвать утомление зрения. В том случае же, когда работа ведется с бинокулярными оптическими приборами (например, стереодальномерами), несоответствующая аметропии установка окуляров может вызывать значительно более серьезные и неприятные явления.

Связь между актами аккомодации и конвергенции, о которой говорилось на стр. 210, приводит к тому, что наличие напряжения аккомодации, являющееся результатом неправильной установки окуляров, сопровождается соответствующим напряжением мышц, обуславливающих конвергенцию. Конвергентному же положению глаз препятствует обычное параллельное расположение оптических систем прибора. В результате такого разрыва между актами аккомодации и конвергенции имеет место быстро наступающее утомление, болевые ощущения, нарушение правильной совместной работы двух глаз, а при длительной работе — и тяжелые расстройства зрения.

Подвижные окуляры оптических приборов должны устанавливаться по диоптрийной шкале на окулярной трубке на основании заранее раз навсегда измеренной величины аметропии глаз наблюдателя.

Определять аметропию, руководствуясь результатами установки окуляра оптического прибора, нельзя.

§ 23. Различные формы очковых линз

Из всей поверхности сетчатки только весьма ограниченная область *fovea centralis* оказывается предназначенной для точного зрения.

Кривая рис. 221 наглядно иллюстрирует это положение. При таком устройстве световоспринимающего аппарата глаза особое значение для совершенной работы глаза имеет его подвижность в глазной орбите. Движение глаза постоянно используется нами при рассматривании

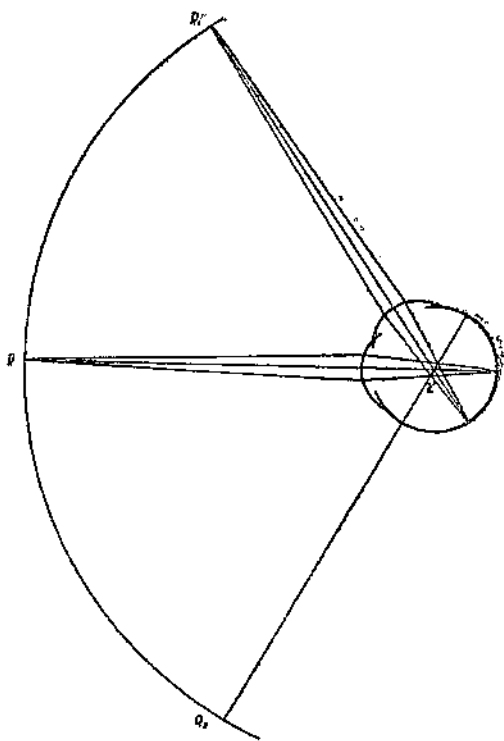


Рис. 234. Сфера дальнейших точек для человеческого глаза

любого объекта, в процессе любой зрительной работы. Движение глаза происходит вокруг так называемого центра вращения глаза Z' — точки, для схематического глаза находящейся внутри глаза на расстоянии 13 мм от вершины роговицы. При вращении глаза вокруг центра вращения дальняя точка глаза не находится в покое, а перемещается, занимая разные положения на так называемой сфере дальнейших точек. Пересечение этой сферы, радиусом которой является отрезок RZ' , с плоскостью чертежа изо-

ображено на рис. 234 (случай миопического глаза) и на рис. 235 (случай гиперметропического глаза) в виде кривой R_1R_2 . Для эметропического глаза сфера дальнейших точек лежит в бесконечности. В случаях миопического или гиперметропического глаза, скорректированного очковой линзой, для любого из возможных направлений взгляда должно быть выполнено условие правильной коррекции аметропии, т. е. задний главный фокус линзы должен совпадать с дальнейшей точкой глаза (см. стр. 213). Отсюда следует, что упомянутая выше сфера дальнейших точек глаза должна быть одновременно и фокальной сферой линзы, т. е. одна и та же поверхность одновременно должна являться геометрическим местом как дальнейших точек, так и задних фокусов корректирующей линзы.

Только при условии выполнения этого требования скорректированный аметропический глаз сможет полностью использовать природную подвижность глаза и

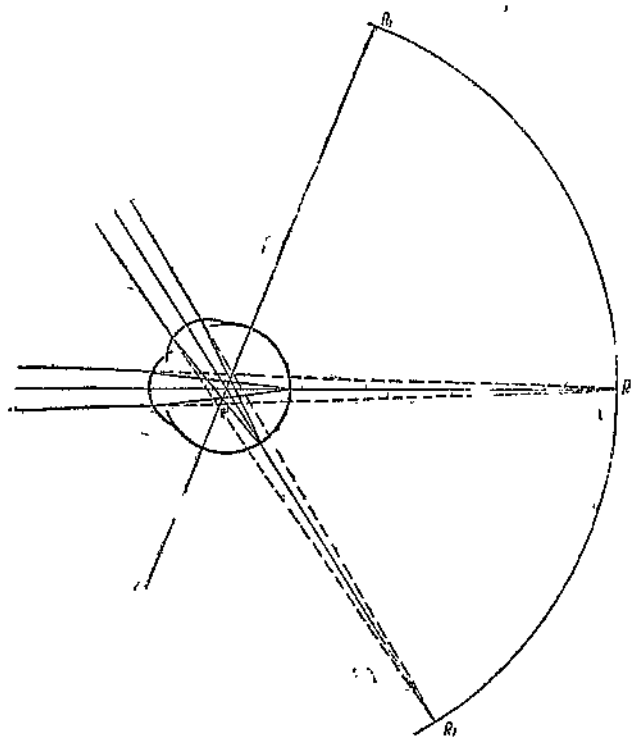


Рис. 235. Сфера дальнейших точек для гиперметропического глаза

различать объекты одинаково хорошо при любом направлении взгляда. Известно, однако (I, гл. 2, § 8), что при падении на линзу пучков лучей, направленных под углом к оптической оси, имеет место явление астигматизма косых пучков лучей: для таких пучков лучей существуют не один, а два фокуса — один для меридиональных, другой — для сагиттальных пучков, в каждом из которых точка изображается не в виде точки, а в виде линии. В результате такого астигматизма косых пучков лучей изображение на сетчатке делается размытым, нерезким.

Для того, чтобы обеспечить скорректированному аметропическому глазу возможность различать объекты отчетливо при любом направлении взгляда, необходимо, во-первых, уничтожить в очковой линзе астигматизм косых пучков лучей и, во-вторых, добиться того, чтобы фокальная поверхность такой линзы была

так же искривлена, как и поверхность дальнейших точек соответствующего аметропического глаза. Как видно из табл. 37, часто применяемые у нас для коррекции аметропии линзы В-формы (двояковыпуклые и двояковогнутые) обладают наибольшим астигматизмом косых пучков лучей, т. е. представляют собою наименее пригодную для коррекции глаза форму линз. Линзы любой иной формы (линзы плосковыпуклые и плосковогнутые и различные выпукло-вогнутые) обладают уже меньшим по величине астигматизмом косых пучков лучей, т. е. более пригодны для коррекции аметропии.

Вопрос о наиболее рациональной форме линзы для коррекции аметропического глаза решается путем специальных расчетов. Оказывается, что удовлетворить сформулированным выше требованиям к очковой линзе, обуславливающей возможность использовать природное движение глаза, возможно, делая обе поверхности линзы сферическими, с кривизной, точно соответствующей результатам расчетов. Такие очковые линзы, свободные от астигматизма косых пучков лучей и дающие на сетчатке резкое изображение объектов при любом направлении

Таблица 37

Рефракция и астигматизм косых пучков лучей на краю очковых линз разных типов

Задняя вер- шин- ная рефрак- ция линз (в дптр)	Выпуклые			Равно-выпуклые			Перископические			Мениски			Плоско-выпуклые		
	рефракция на краю			рефракция на краю			рефракция на краю			рефракция на краю			рефракция на краю		
	толщина (в мм)	сферическое	меридиональное	толщина (в мм)	сферическое	меридиональное	толщина (в мм)	сферическое	меридиональное	толщина (в мм)	сферическое	меридиональное	толщина (в мм)	сферическое	меридиональное
+4	2,6	+4,59	+7,34	+2,75	+4,29	+5,89	+1,60	+4,14	+5,25	+1,11	+3,76	+3,85	+3,0	+3,72	+3,71
+6	3,4	+6,98	+11,79	+4,81	+6,33	+8,46	+2,13	+6,15	+7,63	+1,48	+5,64	+5,79	+4,0	+5,55	+5,52
+8	4,1	+9,49	+17,17	+7,68	+8,85	+10,97	+2,62	+8,11	+9,94	+1,83	+7,55	+7,87	+5,0	+7,44	+7,49
-4	1,2	-4,39	-5,73	-1,34	-4,18	-4,99	-0,81	-4,08	-4,63	-0,55	-3,83	-3,80	+1,2	-3,84	-3,87
-6	1,0	-6,62	-8,63	-2,01	-6,17	-7,05	-0,88	-6,03	-6,59	-0,56	-5,70	-5,53	+1,0	-5,78	-5,76
-8	0,8	-8,90	-11,64	-2,74	-8,12	-8,96	-0,84	-7,95	-8,42	-0,47	-7,56	-7,20	+0,8	-7,70	-7,68
-10	0,7	-11,28	-14,86	-3,58	-10,04	-10,47	-0,73	-9,86	-10,17	-0,31	-9,43	-8,87	+0,7	-9,71	-9,68
-16	0,5	-19,57	-27,34	-7,77	-15,87	-16,09	-0,22	-15,64	-15,41	-0,23	-15,23	-14,18	+0,5	-15,75	-15,76

взгляда наблюдателя, известны под названием астигматических, или пуктальных очковых линз.

Пуктальные очковые линзы имеют выпукло-вогнутую форму (рис. 236). Применяя их, существенно следить за тем, чтобы расстояние между линзой и глазом было, по возможности, близко к 12 мм — числу, которое кладется в основу при расчете пуктальных линз.

Применение пуктальных очковых линз обеспечивает, особенно в случаях высокой аметропии, значительно большую эффективность труда и больший ком-

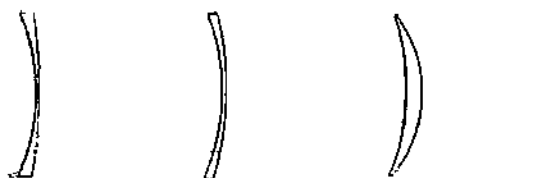


Рис. 236. Вид пуктальных очковых линз

форт для глаза: результат возможности для глаза свободно двигаться, полностью корригировать имеющуюся аметропию, в то время как при использовании иных форм линз полная коррекция аметропии оказывается невозможной. Неполная же коррекция аметропии не может обеспечить для корриги-

рованного глаза высокой степени остроты зрения.

Наиболее рациональной формой очковых линз для случая астигматического глаза следует считать сферо-торическую форму линз. Эти линзы обладают по сравнению с широко применяемыми у нас сферо-цилиндрическими линзами теми же преимуществами, какими обладает пуктальная линза по сравнению с линзами Вt-формы.

§ 24. Очковые линзы для работы на близких расстояниях

Как было сказано на стр. 189, объем аккомодации с возрастом постепенно уменьшается, в результате чего ближняя точка глаза постепенно отодвигается от глаза. Если для эметропического глаза в возрасте 20 лет она отстоит от глаза на расстоянии 10 см, в возрасте 30 лет — на расстоянии 14 см, то для 40 лет она уже отстоит от глаза на расстоянии 22 см, а в 50 лет — на расстоянии 40 см. В связи с недостаточным объемом аккомодации для эметропического глаза в возрасте свыше 40 лет работа с мелкими объектами делается трудной, а после 50 лет и вообще невозможной. Для гиперметропического глаза, не работающего в очках для дали, недостаток аккомодации проявляется раньше, поскольку такой глаз уже для рассмотрения далеких объектов затрачивает часть своего объема аккомодации. Для миопического глаза, дальнейшая точка которого лежит перед глазом, недостаток аккомодации ощущается позднее. Восполнить недостающую аккомодацию возможно, помещая перед глазом собирающую очковую линзу.

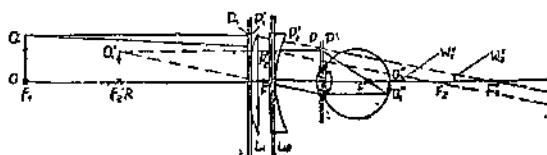


Рис. 238. Принцип назначения корригирующей линзы для близки в случае аметропического (миопического) неаккомодирующего глаза:

L_2 — корригирующая линза для дали; L_1 — добавочная линза для близки; R — дальнейшая точка глаза; F_1 и F_1' — главные фокусы линзы L_1 ; F_2 и F_2' — то же для линзы L_2 ; OO_1 — рассматриваемый объект; O_1' — изображение точки O_1 , даваемое линзой L_1 и L_2 ; O_1'' — изображение объекта OO_1 на сетчатке глаза

собирающей линзы такой силы, чтобы рассматриваемый объект находился в переднем фокусе этой линзы (рис. 237). Если объем аккомодации $A_a = 0$,

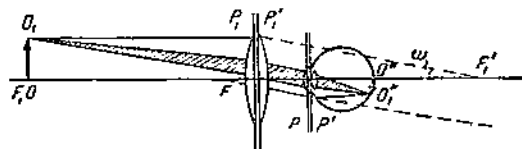


Рис. 237. Принцип назначения корригирующей линзы для близки в случае эметропического неаккомодирующего глаза:

OO_1 — рассматриваемый объект; O_1'' — изображение этого объекта на сетчатке глаза; F_1 — передний фокус линзы; F_1' — задний фокус линзы

Если $A_a = 0$, т. е. глаз утерел способность аккомодировать, то для эметропического глаза работа на близком расстоянии может быть обеспечена помещением перед глазом

Если $A_a = 0$, т. е. глаз утерел способность аккомодировать, то для эметропического глаза работа на близком расстоянии может быть обеспечена помещением перед глазом

глаз же не эметропический, а аметропический, т. е. близорукий или даль-
нозоркий, то при назначении очковых линз для близи исходят из того, что
аметропический глаз вместе с корректирующей линзой для дали образует оп-
тическую систему, задний фокус которой лежит на сетчатке глаза. Отсюда
следует, что очковая линза для близи в этом случае должна иметь рефракцию,
равную суммарной рефракции двух линз — линзы для дали и добавочной линзы
для близи. Линза для близи находится так, как это делается в случае эметро-
пического глаза (рис. 238). Если глаз располагает некоторым, однако, недоста-
точным по величине объемом аккомодации, эта наличная способность аккомоди-
ровать должна быть обязательно учтена при назначении очковых линз для близи.

Существующие для назначения такой коррекции правила предусматривают,
с одной стороны, обязательное использование наличной способности аккомоди-
ровать, с другой же — всегда имеется в виду необходимость избегать работы при
предельном напряжении аккомодации, что ведет к быстрому утомлению глаз,

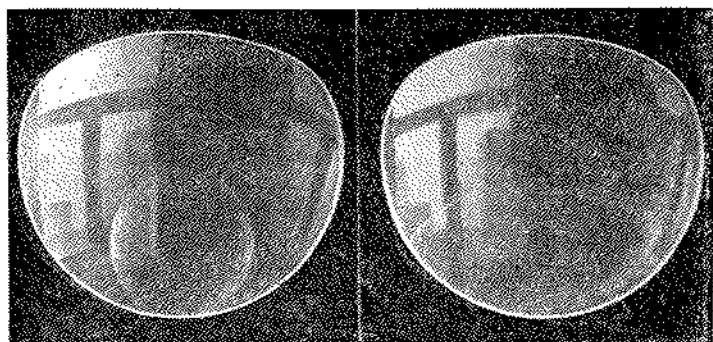


Рис. 239. Вид очков с бифокальными очковыми линзами

головным болям и пр. В тех случаях, когда приходится пользоваться разными
очковыми линзами для дали и для близи, целесообразным является применение
так называемых бифокальных очковых линз, т. е. линз с двумя разными частями:
одна — для зрения вдаль, другая — для работы на близких расстояниях. Такие линзы
изображены на рис. 239; круглая область в нижней части линзы обладает одним
фокусом, остальная — другим.

§ 25. Точность юстировки очковых линз относительно глаза. Очковые оправы

Правильное положение очковых линз относительно глаза имеет чрезвычайно
большое значение для правильного действия очков. Очковые линзы, занимающие
неправильное положение относительно глаз, не только могут снижать остроту
зрения и приводить к ряду существенных ошибок и недоразумений при измери-
тельных работах и наблюдениях, но и являться причиной явлений утомления и
расстройства зрения, головных болей, косоглазия и пр. Выше (стр. 213) уже
указывалось на необходимость обеспечить определенное отстояние очковой линзы
от глаза.

Помимо определенного отстояния очковых линз от глаза, весьма существенна
еще и правильная центрировка очковых линз относительно глаза. Оптические оси
линзы и глаза должны совпадать, для чего оптический центр линзы должен на-
ходиться на оптической оси глаза. Если это не имеет места, линза окажется
децентрированной относительно глаза и будет действовать как призма. На
рис. 240 изображена поставленная перед одним из двух глаз наблюдателя призма
основанием к виску. Как видно из этого рисунка, для того чтобы, как это должно
иметь место при бинокулярном зрении, изображения рассматриваемых далеких

предметов в обоих глазах попали на fovea centralis, левый глаз наблюдателя должен был бы повернуться в направлении, указанном стрелкой. Обратный поворот глаза должен был бы иметь место при направлении призмы основанием внутрь, к носу. Аналогичное явление имеет место, как это можно видеть из рис. 241, если, например, одна из двух положительных линз децентрирована. Таким образом, при децентрации очковая линза начинает действовать как призма, вызывая необходимость для глаз при зрении вдаль или на близких расстояниях занимать неправильное, противоестественное положение.

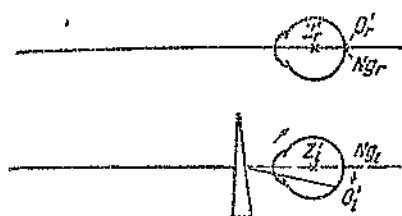


Рис. 240. Действие призмы, поставленной перед глазом:

Z'_r и Z'_l — центры вращения глаза; O'_r и O'_l — изображение рассматриваемой удаленной точки на сетчатке. Стрелки указывают направление вращения глаза, необходимого для устранения двоения.

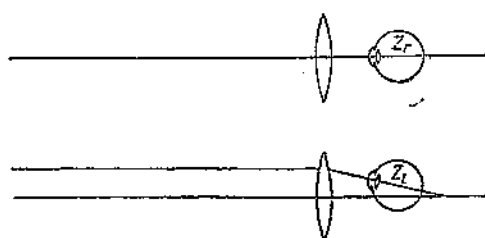


Рис. 241. Призматическое действие децентрированной очковой линзы:

Z'_r и Z'_l — центры вращения глаз. Для устранения двоения левый глаз поворачивается внутрь.

На основании специальных исследований и расчетов установлены следующие допуски на децентрацию очковых линз в любую сторону:

Таблица 38

Задняя вершинная рефракция линзы (в дптр) . Допустимая децентрация (в мм) (в любую сторону)	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 8	± 10	± 12	± 16	± 20
	5,0	2,5	1,7	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25

Из этой таблицы видно, что допуск на децентрацию тем более строг, чем большую рефракцию имеет корректирующая линза. Малые величины допусков на

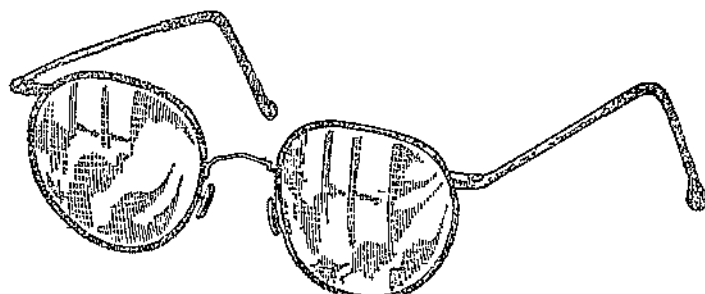


Рис. 242. Современный тип очковой оправы

центрировку очковых линз относительно глаза свидетельствуют о высоких требованиях, предъявляемых к очковой оправе, с одной стороны, и об ответственности и необходимой точности работы лиц, подгоняющих очковую оправу к лицу, — с другой.

За долгие годы своего развития очковая оправа претерпела значительные изменения и постепенно совершенствовалась. На рис. 242 изображена одна из

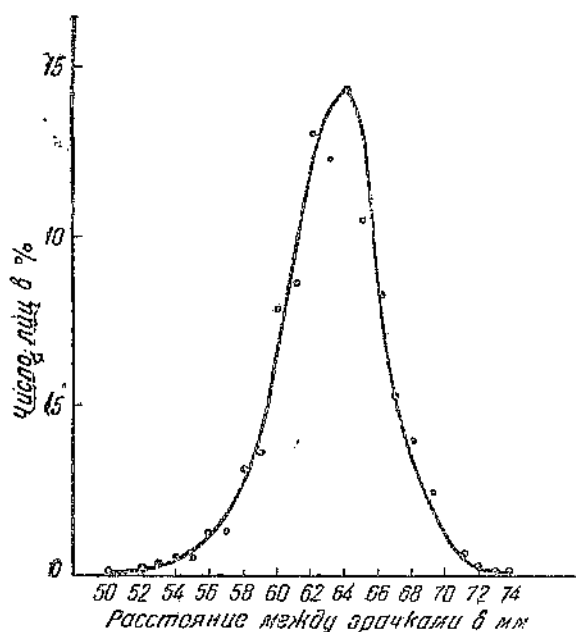


Рис. 243. Кривая распределения различных величин расстояний между зрачками

современных оправ. Более высокое расположение заушников по сравнению со старыми типами оправ и специальные боковые упоры для носа, на которых и покоятся

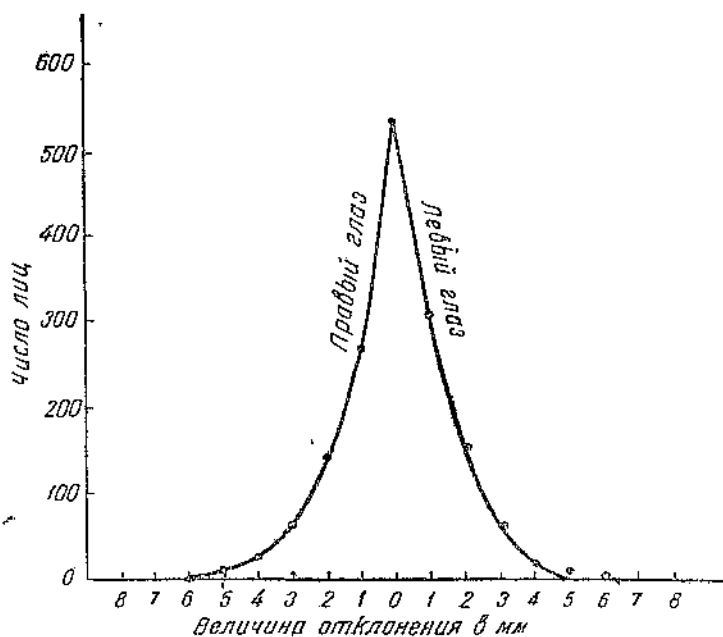


Рис. 244. Кривая распределения отклонений от симметричного расположения зрачков для правого и левого глаза

очки, обеспечивают устойчивость оправы, а достаточное число разных размеров оправ и гибкость металла, из которого изготавливаются носовые упоры и мостик

оправы, позволяют в каждом отдельном случае подогнать оправу к лицу и придать очковым линзам правильное положение относительно глаз.

Лица, осуществляющие подгонку очков и отпускающие их потребителю, должны иметь соответствующее профессиональное образование и обладать навыками, приобретаемыми ими в специальных школах. При подгонке очков к лицу существенно располагать данными о расстояниях от переносы до центра зрачка каждого из двух глаз. Эти же расстояния или сумму их, т. е. общее расстояние между зрачками, важно знать и для конструирования и использования биноклярных оптических приборов. Для безошибочного определения этих расстояний существуют специальные несложные оптические приборы. Измерения показывают, что, как правило, мы имеем несимметричное расположение глаз относительно

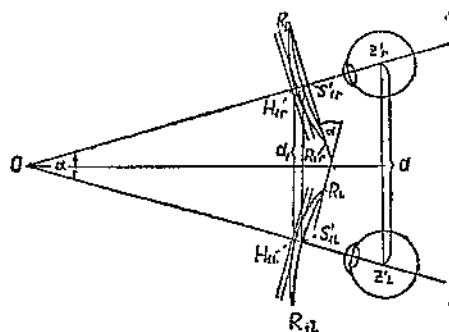


Рис. 245. Правильное расположение очковых линз в очках для близости:

Z' и Z'' — центры вращения глаза; O — рассматриваемая точка; α — угол конвергенции; a — расстояние между центрами вращения; S'_r и S''_r — задние вершины линзы

очковых линз в очках, специально предназначенных для работы на близких расстояниях, приходится очковые линзы располагать под некоторым углом друг к другу, соответствующем углу конвергенции. Такое расположение линз изображено на рис. 245.

При ином расположении линз будет иметь место явление астигматизма косых пучков лучей, даже для зрения через оптический центр линзы.

§ 26. Изменения, вносимые очковой линзой в работу глаза и восприятие предметов внешнего мира. Контактные очковые линзы

Любая корректирующая аметропию линза, в том числе и пунктальная, обеспечивая на сетчатке аметропического глаза резкое изображение рассматриваемых объектов, меняет в целом ряде отношений условия работы глаза и восприятие окружающих нас объектов.

1) Изменение угла поворота глаза и восприятия перспективы. Изменение величины поля взгляда

Аметропический глаз, перед которым стоит корректирующая очковая линза при рассматривании объектов, расположенных вне оптической оси, т. е. сбоку, вверх или вниз от наблюдателя, совершает иные повороты, нежели глаз без очковой линзы, т. е. эметропический: в частности, глаз, смотрящий через положительную очковую линзу, т. е. гиперметропический, вынужден поворачиваться на большие углы, нежели эметропический, а глаз, смотрящий через отрицательную очковую линзу, т. е. миопический, поворачивается на меньшие углы, нежели эметропический глаз. Сказанное ясно из рис. 246 и 247. На рис. 246 изображен гиперметропический глаз, смотрящий через край линзы по направлению O' . Нетрудно видеть, что в результате преломления лучей линзой этот глаз,

оптическая ось которого образует с оптической осью линзы угол ω' , не сможет увидеть объект, расположенный по направлению O' . При указанном угле поворота глаз увидит объект, расположенный ближе к оптической оси, т. е. O . Иное имеет место для миопического глаза (рис. 247): здесь глаз, повернувшийся на угол ω' и смотрящий через край линзы, увидит объект, находящийся не на продолжении линии взгляда, но расположенный дальше от оси, т. е. вместо объекта O' глаз увидит объект O .

Явление разных углов поворота для скорректированных миопического и гиперметропического глаза имеет своим следствием чрезвычайно существенное обстоятельство. Оказывается, что глубинность пространства, или перспектива, оценивается по-разному через отрицательную и положительную линзу: гиперметроп, смотря-

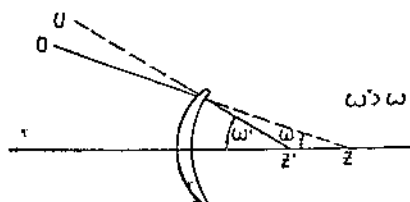


Рис. 246. Положительная линза, $\omega' > \omega$

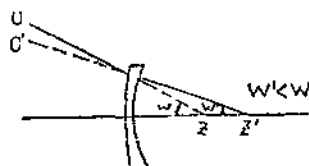


Рис. 247. Отрицательная линза, $\omega' < \omega$

Изменение угла поворота глаза очковой линзой

Z' — центр вращения глаза; ω — угол поворота глаза без линзы; ω' — угол поворота глаза с линзой

ящий через положительную линзу, недооценивает глубинность пространства, видит все менее глубоким, несколько сплюснутым, в то время как миоп, смотрящий через отрицательную линзу, наоборот, переоценивает глубину пространства, видит все вокруг себя более вытянутым в глубину. Исходя из этого, необходимо соблюдать осторожность в первое время пользования очками с линзами значительной рефракции: по получении очков надо в быденной домашней обстановке привыкнуть к новым пространственным впечатлениям и научиться координировать мышечные усилия и напряжения с измененными линзами новыми восприятиями расстояний и глубины.

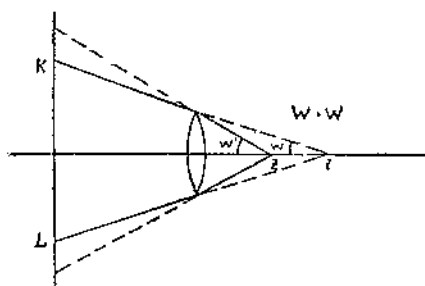


Рис. 248. Положительная линза.

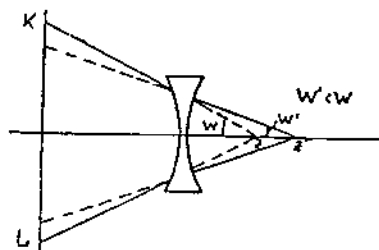


Рис. 249. Отрицательная линза

Изменение поля взгляда при пользовании очковой линзой:

Z' — центр вращения глаза; ω' — угол поворота глаза; KL — поперечник поля взгляда

Если аметропии двух глаз одного и того же лица неравны друг другу, а следовательно, не равны друг другу и рефракции корректирующих оба глаза очковых линз, углы поворота глаз при взгляде вбок, вверх или вниз через очковую линзу будут неравными. Такое неравенство углов поворота двух глаз может переноситься нами без помех для правильного бинокулярного зрения только в том случае, если это неравенство углов не очень велико (не более $3,5^\circ$). В тех случаях, когда аметропии двух глаз отличаются друг от друга на значительное число диоптрий и, следовательно, неравенство углов поворота значительно (превышает $3,5^\circ$), нет возможности скорректировать полностью аметропию обоих глаз, применяя обычные очковые линзы, и острота одного из глаз остается пониженной. В таких случаях применяют особого вида очки, носящие название анизометропических.

Неравенство углов поворота глаз, смотрящих через положительную или отрицательную очковую линзу, тесно связано с различными величинами поля взгляда* через такие очки. Из рис. 248 и 249 можно видеть, что величина поля взгляда больше в очках с отрицательными (рассеивающими) линзами и меньше в очках с положительными (собирательными). При значительной рефракции линз разница между величинами полей через положительную и отрицательную очковые линзы может достигать весьма значительных величин. В табл. 39 даны величины (диаметры) полей взгляда через очковые линзы разных рефракций, помещенных на

Таблица 39

Поле взгляда через очковую линзу (для экрана на расстоянии 5 м от линзы и $x'=25$ мм)

Задняя вершинная рефракция линзы	Диаметр поля взгляда $2d$ для $2h=38$ мм	Задняя вершинная рефракция линзы	Диаметр поля взгляда $2d$ для $2h=38$ мм	Диаметр поля взгляда $2d$ для $2h=29$ мм
+ 2	7,25	— 2	8,03	6,13
+ 4	6,87	— 4	8,41	6,42
+ 6	6,49	— 6	8,79	6,71
+ 8	6,11	— 8	9,17	7,00
+ 10	5,73	— 10	9,55	7,29
+ 12	5,34	— 12	9,93	7,58
+ 14	4,96	— 14	10,31	7,87
+ 16	4,58	— 16	10,69	8,17
+ 18	4,20	— 18	11,07	8,46
+ 20	3,82	— 20	11,45	8,75

расстоянии 12 мм от роговицы глаза. Приводимые в таблице величины диаметров поля взгляда даны относительно экрана, находящегося на расстоянии 5 м от глаза наблюдателя. Как видно из этой таблицы, для линзы в -14 дптр величина поля оказывается вдвое больше, нежели для линзы $+14$ дптр тех же размеров; для линзы -20 дптр величина поля в три раза больше нежели для линзы $+20$ дптр. Вопрос о размерах поля взгляда имеет значение, между прочим, для изготовления и выбора очковых линз и оправ. Малые размеры поля взгляда для положительных линз заставляют стремиться к увеличению размеров линз и оправ. Это имеет смысл, однако, только при пользовании пунктальными очковыми линзами, поскольку в линзах иной формы полное использование краевых частей линз невозможно в результате наличия астигматизма косых пучков лучей.

2) Дисторсия и хроматизм в очковых линзах

Явление дисторсии было описано выше (I, гл. 2, § 8). В таком оптическом приборе, каким является очковая линза, состоящем всего из одной линзы, и притом весьма тонкой и ограниченной сферическими поверхностями, уничтожить дисторсию, конечно, невозможно. Дисторсия — подушкообразная в случае положительной очковой линзы и бочкообразная для рассеивающей линзы — приводит к искажениям в форме объектов, видимых через края линзы. Прямолинейные объекты, видимые периферией сетчатки через краевые части линзы, кажутся в результате наличия дисторсии искривленными, плоские поверхности — выпуклыми или вогнутыми. В результате постоянных поворотов головы при переводе взгляда с одного объекта на другой такое искривление прямых линий и изгиба плоскостей не остается неизменным, а меняется. Лица, носящие очки, ощущают это в виде колебаний или видимых движений окружающих их объектов или поверхностей (в частности, пола, ступенек лестницы и т. д.), что приводит в случаях пользования линзами значительной рефракции к головокружениям, затруднениям при ходьбе и т. д. Дисторсия особенно велика для линз Вi-формы и значительно меньше в линзах пунктальных.

* Под полем взгляда понимают ту часть пространства, находящиеся в которой объекты могут рассматриваться центральным (фовеальным) зрением при полном использовании подвижности глаза.

Подобно тому как нет возможности полностью освободить очковую линзу от дисторсии, нельзя избавиться в очках и от хроматизма. Глаз мало чувствителен к хроматизму положения, зато хроматизм увеличения может быть весьма заметен для него. Белая светящаяся точка (например звезда на небе), рассматриваемая не через оптический центр линзы, а через краевые ее части (например, через верхнюю часть) кажется не точкой, а разноцветной полоской с цветами, следующими в порядке следования цветов в спектре (рис. 250 и 251). Сплошная белая поверхность, однако, не кажется окрашенной при рассмотрении ее через краевые части линзы. Если, однако, на такой белой поверхности имеется черный (темный) объект (например, буквы на листе белой бумаги), то на краях этого объекта замечается цветная кайма.

При положительной линзе на стороне объекта, обращенной к оптической оси линзы, возникает окраска синего цвета, на противоположной стороне, наоборот, красного цвета. Для отрицательной линзы имеет место обратный порядок расположения цветов. Хроматизм вместе с дисторсией при сильных линзах может быть очень неприятным, особенно при чтении: строчки, читаемые не через центральную зону, кажутся изогнутыми и окруженными цветной каймой. Для устранения этого явления, иногда очень раздражающего лиц, пользующихся очками, были предложены ахроматизированные очковые линзы, состоящие из двух склеенных между собою линз из разных сортов стекла. Значительная тяжесть таких линз препятствует их широкому применению.

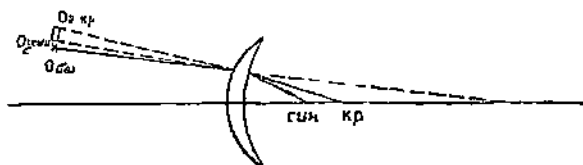


Рис. 250. Хроматическое действие очковой линзы. Положительная линза:

O —наблюдаемая белая точка; O_1, O_2 —видимая вместо точки O в результате хроматического действия линзы спектральная полоска

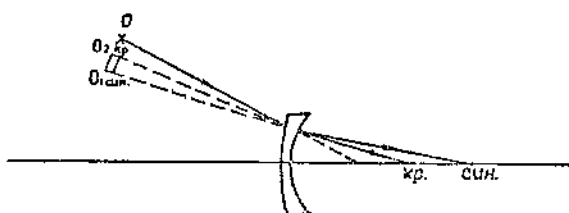


Рис. 251. Хроматическое действие очковой линзы. Отрицательная линза:

O —наблюдаемая белая точка; O_1, O_2 —видимая вместо точки O в результате хроматического действия линзы спектральная полоска

3) Изменение аккомодационного напряжения

Близорукий или дальнозоркий глаз, смотрящий через корректирующую линзу для дали на объекты, расположенные близко от глаза (например, страница книги при чтении), аккомодирует иначе, нежели эметропический глаз. Величина требуемого для получения резкого изображения наблюдаемых объектов на сетчатке аккомодационного напряжения, завися от относительного расположения изображения объекта, которое и рассматривает глаз, и дальнейшей точки глаза, оказывается наибольшим для скорректированного гиперметропического глаза и наименьшим для скорректированного миопического глаза.

Найти величину требуемого аккомодационного напряжения через очковую линзу нетрудно по формуле

$$\overline{Aa} = \frac{1}{H_2 \overline{R}} - \frac{1}{H_2 \overline{P}}, \quad (26, 1)$$

построенной аналогично формуле (6,1), стр. 188, для объема аккомодации. В формуле (26,1): $\overline{Aa}$ —требуемое напряжение аккомодации; $H_2 \overline{R}$ —расстояние от передней главной точки глаза H_2 до точки $\overline{R}$ (изображения дальнейшей точки R , даваемого корректирующей линзой при ходе лучей справа налево, рис. 252); $H_2 \overline{P}$ —расстояние от передней главной точки глаза H_2 до точки $\overline{P}$ (изображения ближней точки P , даваемого корректирующей линзой при ходе лучей справа налево).

Если рассматриваемая точка O является одновременно ближней точкой глаза, то формула (26,1) дает в этом случае величину объема аккомодации, измененного благодаря наличию корригирующей линзы. Подсчет по формуле (26,1) показывает, например, что, в то время как эметропический глаз для объекта, расположенного на расстоянии 25 см от глаза, должен иметь напряжение аккомодации в 4 дптр, миопический глаз с аметропией в -10 дптр, корригированный для дали очковой линзой, находящейся на расстоянии $\bar{d}=12$ мм, должен иметь

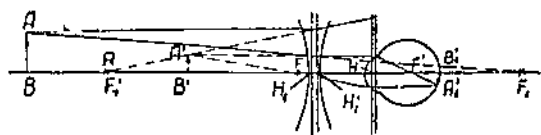


Рис. 252. Изменение напряжения аккомодации при пользовании очковой линзой:

AB — рассматриваемый объект; $A'B'$ — его изображение, даваемое очковой линзой; R — дальнейшая точка глаза; F_1 и F_1' — главные фокусы линзы; F — передний главный фокус глаза; $A'B'$ — изображение объекта AB на сетчатке

напряжение аккомодации в 3 дптр, а при миопии в -20 дптр — даже всего в 2,25 дптр. Для тех же условий гиперметропический глаз с гиперметропией $+8$ дптр должен иметь напряжение аккомодации в 5 дптр.

Как видно из приведенных цифр, разница между напряжениями аккомодации для объекта на одном и том же расстоянии от наблюдателя у гиперметропа и миопы может до-

стигать нескольких диоптрий. Обстоятельство это имеет, между прочим, большое значение для назначения корригирующих очковых линз для близы и объясняет, почему для гиперметропа необходимость иметь специальные очки для близы проявляется раньше, нежели у эметропа, у эметропа же, в свою очередь, раньше, нежели у миопы. Особенно важно учитывать изменения, вносимые очковой линзой в напряжение аккомодации, при назначении коррекции для случая астигматического глаза: астигматический глаз, правильно корригированный для дали, оказывается некорригированным, если он смотрит через очки для дали на близкие предметы. Сказанное понятно, если иметь в виду, что рефракция астигматической линзы разная в разных главных сечениях.

Поскольку изменения, вносимые очковой линзой в напряжение аккомодации, необходимые для различения близких объектов, зависят от рефракции линзы, рефракция же астигматической линзы различна в двух ее главных сечениях, — аккомодационные напряжения, необходимые для пользования такой линзой при работе на близких расстояниях, для каждого из двух главных сечений линзы должны были быть различны. Такое разное в разных главных сечениях напряжение аккомодации, однако, в действительности осуществлено быть не может, в результате чего система глаз + очковая линза в условиях работы на близких расстояниях оказывается астигматической. Этот появляющийся при аккомодации глаза астигматизм может быть легко определен путем подсчета и исправлен назначением специальных очков для близы, несколько отличных от очков для дали.

Вопрос об изменении напряжения аккомодации очковой линзой может рассматриваться как частный случай более общего вопроса об изменении аккомодационного напряжения оптическим прибором вообще.

4) Контактные очковые линзы

Перечисленные выше изменения в восприятии внешнего мира, вносимые очковой линзой, происходят оттого, что неподвижная очковая линза работает в соединении с подвижным глазом, а также и потому, что линза и глаз отделены друг от друга некоторым расстоянием.

В так называемой контактной очковой линзе (рис. 253), надеваемой под веко непосредственно на глазное яблоко и движущейся вместе с глазом, указанные выше изменения в восприятии внешнего мира не имеют места, почему эти линзы и являются оптически наиболее совершенными. Контактные очковые линзы применяются при любых аметропиях и астигматизме. Помощью этих линз возможно обеспечить бинокулярное зрение при любых степенях анизометропии, в том числе и при так называемой односторонней афакции, т. е. тогда, когда в одном глазу

имеется хрусталик, в другом же его нет. То обстоятельство, что контактные очковые линзы применяются без всякой оправы, не запотевают и невидимы для постороннего глаза, заставляет считать их применение особенно важным при пользовании противогазом, под полетными очками и в ряде профессий, в которых применение обычных очков невозможно (например, певцы и актеры на сцене, спортсмены, пловцы и т. д.).

§ 27. Защитные очковые линзы

В свете, падающем на глаз, находятся обычно, помимо видимых излучений, вызывающих ощущение света, еще и излучения невидимые, к ним относятся ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Лучи видимой части спектра (400—800 $m\mu$), согласно сказанному на стр. 195, проходят, теряя очень мало в своей интенсивности по пути через роговицу, камерную влагу, хрусталик и стекловидное тело, и, достигнув сетчатки, вызывают в результате сложных химических и электрических процессов по пути к мозгу ощущение света. Чрезмерная интенсивность излучения видимой части спектра вызывает болевые ощущения и снижает контрастную чувствительность глаза, а следовательно, и его остроту зрения (см. стр. 206). Ультрафиолетовые лучи длиной волны меньше примерно 313 $m\mu$ сильно поглощаются в роговице и соединительных оболочках глаза, вызывая при значительных дозах их воспаления, сопровождающиеся сильными болями и проявляющиеся не сразу после действия этих лучей на глаза, а лишь по прошествии ряда часов.

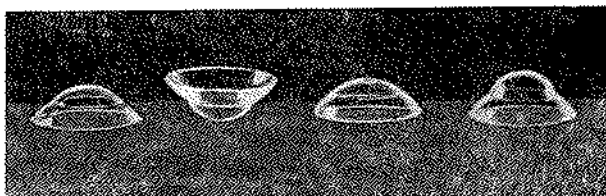


Рис. 253. Вид контактных очковых линз

Иначе ведут себя ультрафиолетовые лучи с длинами волн, большими 313 $m\mu$: в роговице и камерной влаге эти лучи поглощаются очень мало, значительная доля этих лучей задерживается хрусталиком, который под влиянием этих лучей начинает сильно флуоресцировать. При наличии больших доз этого вида излучения некоторая часть его может достигнуть и сетчатки, не оказывая, однако, согласно исследованиям Фогга, даже при значительных интенсивностях вредных для зрительного аппарата действий.

Иначе обстоит дело с инфракрасным излучением: так называемые короткие инфракрасные лучи с длинами волн от 800 до 1350 $m\mu$, падая на глаз, мало задерживаются роговицей, камерной влагой, хрусталиком и стекловидным телом и достигают сетчатки, где, поглощаясь, превращаются в теплоту. Это тепловое действие инфракрасных лучей обычно безвредно для сетчатки, поскольку глазное дно хорошо омывается кровью, и только в исключительных случаях, например при длительных наблюдениях за солнцем незащищенным глазом, может иметь место гибель (сгорание) сетчатки в месте, где образуется изображение источника излучения (солнца). Инфракрасное излучение с длинами волн свыше 1350 $m\mu$ сильно поглощается роговицей и камерной влагой, вызывая нагревание последней. В результате длительного соприкосновения нагретой камерной влаги с хрусталиком последний, как показали опыты, теряет свою прозрачность и мутнеет. Часто встречающаяся катаракта * стекловидных тел, обслуживающих доменные печи, и др. объясняется длительным воздействием длинных инфракрасных лучей на глаз.

Необходимо отметить, что вредное действие лучей тех или иных длин волн зависит, конечно, от количества или дозы, в которых они присутствуют в падающем на глаз свете. В этом вопросе решающим фактором является, повидимому,

* Старческая катаракта — болезнь глаз, проявляющаяся в утрате хрусталиком прозрачности. Для восстановления зрения при катаракте прибегают к операции извлечения хрусталика.

состав солнечного излучения у поверхности земли, к которому глаз приспособлен в результате своего исторического развития.

Ультрафиолетовые лучи с длинами волн короче 300 $m\mu$ в солнечном излучении у поверхности земли обычно вообще не встречаются, так как поглощаются в верхних слоях атмосферы. Этот факт, а также все сказанное выше о действиях ультрафиолетовых лучей на ткани глаза заставляет считать, что лучи короче 324 $m\mu$ вообще вредны для глаза и в свете, падающем на него от искусственных источников света, присутствовать не должны.

Что касается излучений других длин волн — более длинных ультрафиолетовых лучей и инфракрасных, — то они могут присутствовать в свете, падающем на глаз, однако в количествах, не больших тех, в каких они присутствуют в солнечном излучении у поверхности земли. И в отношении видимых лучей мы должны в соответствии со сказанным на стр. 196 требовать, чтобы интенсивность их не превосходила некоторой определенной границы, связанной с адаптационным состоянием глаза.

В процессе своей производственной работы, в военном деле и т. д. глазу приходится иметь дело с источниками света, излучающими свет самого различного состава. Если в состав этого излучения входят лучи, заведомо вредные для глаза (см. выше), или интенсивность отдельных групп длин волн или всего излучения в целом выше того, что считается безвредным для глаза, необходимо применение при работе или наблюдениях специальных защитных очков. Последние состоят из очковых линз афокальных или фокальных (в зависимости от того, какой глаз — эмметропический или аметропический), изготовленных из специальных сортов стекла, задерживающих отдельные группы длин волн совсем или только частично пропускающих их. Для того, чтобы выбрать тот или иной тип защитных очковых линз, необходимо знать их кривую пропускания по спектру, а также и спектральную кривую излучения источника света.

Существуют специальные защитные очковые линзы для защиты от излучений, богатых инфракрасными лучами — пламя доменных печей, раскаленное стекло (работа стеклодувов) и т. д. Стекло таких линз, поглощая в известной степени видимые и ультрафиолетовые лучи, которые имеют в упомянутых источниках света излишнюю интенсивность, обладают особенно большим поглощением в области инфракрасных лучей.

Для работы с прожекторами при электросварочных работах и других защитные очковые линзы должны, уменьшая интенсивность видимых лучей, обладать особенно сильным поглощением в ультрафиолетовой области спектра, поскольку в этих случаях интенсивность ультрафиолетового излучения особенно велика. Иные требования предъявляются к защитным очкам, предназначенным для защиты от яркого солнечного света в условиях горного зимнего спорта (альпинизм), при пребывании в полярных условиях и т. д. В этом случае очковые линзы должны равномерно ослаблять всю область видимых лучей, задерживая в известной степени и ультрафиолетовые лучи, интенсивность которых в указанных выше условиях может быть излишне велика. Весьма существенно, чтобы видимые лучи различных длин волн ослаблялись в одно и то же число раз; если это условие не выполнено, очки будут менять окраску наблюдаемых предметов.

Упомянем, наконец, о том, что в ряде случаев глазу может угрожать опасность не от вредных излучений, но от сильных струй воздуха или летящих механических частиц. И в этих случаях защита глаза достигается специальными видами очков (летные очки, очки для шоферов и др.).

§ 28. Очки для слабовидящих

Ряд глазных заболеваний, а также ранения и травмы на войне сопровождаются болезненными изменениями в световоспринимающем аппарате глаза, вызывающими понижение остроты зрения. Острота зрения таких глаз, известных под названием амблиопических, может быть повышена путем применения специального типа очков, преследующих цель не только обеспечить получение на сетчатке изобра-

жений внешних объектов резких, но и притом увеличенных по сравнению с изображениями, даваемыми обычными очками. При таком увеличении изображения острота зрения повышается в число раз, соответствующее увеличению. Таким средством, повышающим остроту зрения в случаях амблиопии, являются так называемые телескопические очки.

Телескопические очки для эметропического глаза представляют собой телескопическую систему типа галилеевского бинокля, состоящую из двух линз (рис. 254) — собирающей и рассеивающей. Последняя делается обычно склеенной из двух линз. Параллельные лучи, входящие в такую систему, выходят из нее тоже параллельными, но составляющими другой угол с оптической осью. В случае аметропического глаза система телескопических очков строится так, чтобы даваемые этой системой изображения помещались в дальнейшей точке глаза. Такие системы для случаев гиперметропического и миопического глаза изображены на рис. 255 и рис. 256. Увеличение телеско-

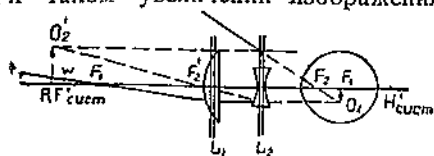


Рис. 254. Принцип действия телескопических очков для миопического глаза:

L_1 — собирающая линза системы; L_2 — рассеивающая линза системы; F_1 — задний главный фокус системы; R — дальняя точка глаза; H_1 — задняя главная точка системы

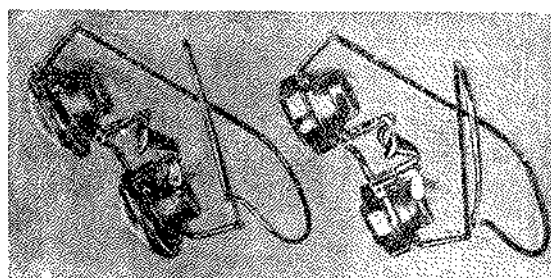


Рис. 255. Телескопические очки для гиперметропического (слева) и миопического (справа) глаза



Рис. 256. Применение телескопических очков

пических очков обычно делается равным $1,8\%$. Возможно иметь системы и с большим увеличением, однако они получаются более тяжелыми и громоздкими.



Рис. 257. Телескопическая лупа на головном укреплении

Для различения объектов на близких расстояниях на основную систему телескопических очков надеваются со стороны объекта добавочные собирающие линзы с фокусными расстояниями, соответствующими рабочим расстояниям. Рефракция этих добавочных линз обычно равна $+2$, $+3$, $+4$, $+5$, $+6$, $+8$, $+10$ или $+12$ дптр. При надетых добавочных линзах увеличение телескопических очков будет больше, достигая при добавочной линзе $+12$ дптр значения $5,4\%$, если увеличение основной системы равно $1,8\%$. Таким образом, человек, который в обычных очках имеет остроту зрения всего в $0,1$, при использовании телескопических очков с добавочной линзой $+12$ дптр будет иметь остроту зрения $0,5$, позволяющую ему свободно читать и писать.

Телескопические очки исправлены не только в отношении астигматизма косых пучков лучей и дисторсии, но и на хроматизм. Изготавливаются они для всех необходимых значений рефракций (от -40 дптр до $+15$ дптр), а также и для астигматических глаз. При очень значительных степенях ослабления зрения, вместо телескопических очков применяют телескопические лупы. Последние пред-

ставляют собой специального вида призматический бинокль с особыми добавочными линзами к нему. Линзы эти надеваются на бинокль со стороны объекта тогда, когда лупой пользуются для работы на близких расстояниях. Увеличение телескопической лупы для близких расстояний может достигать $30\times$ при расстоянии от объекта до лупы в 5 см. Таким образом, амблиопический глаз с остротой зрения в обычных очках, например в 0,015, может с телескопической лупой иметь для близких расстояний остроту зрения 0,45, т. е. можно свободно читать обычный печатный шрифт. Телескопические лупы укрепляются на голове посредством специального приспособления (рис. 257). Возможно также помещать их и на специальных штативах (рис. 258).



Рис. 258. Телескопическая лупа на штативе

Помимо телескопических очков и луп, существует целый ряд других очковых приборов*, предназначенных для пользования лиц с нормальным зрением в целях увеличить дальность видимости объектов (например, в военных условиях — наблюдения с самолетов, судов и т. д.) или повысить эффективность глаза при работе с мелкими объектами (чтение карт, изготовление точных измерительных приборов и т. д.). В качестве примера укажем на так называемые очки-бинокль для дали (рис. 259) и лупу Гульєстранда для работы на близких расстояниях (рис. 260).

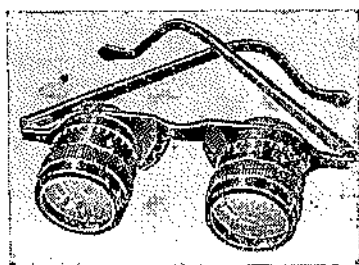


Рис. 259. Очки-бинокль



Рис. 260. Лупа Гульєстранда

§ 29. Цвет и цветоощущение

Выше указывалось, что в качестве света глаз воспринимает излучения с длинами волн, в среднем, примерно в пределах от 780 до 380 $m\mu$ **. Если излучение, попадающее в глаз, имеет сложный состав и содержит в себе все длины волн, т. е. дает сплошной спектр, причем кривая распределения энергии близка к кривой распределения энергии в солнечном излучении или в излучении черного тела в пределах, примерно, от 5000 до 6000° К, то глаз наш получает впечатление белого цвета. Впечатление той или иной цветности создает излучение, в котором часть световых волн, имеющих в солнечном спектре, отсутствует, и если и имеется, то со значительно меньшими интенсивностями. Такие излучения, воспри-

* Очковыми приборами в отличие от очков называют предназначенные для коррекции глаза оптические приборы, состоящие не из одной линзы, как очки, а из большего числа линз.

** Согласно новейшим данным, глаз видит излучения до 302 $m\mu$ в сторону коротких волн спектра и до 950 $m\mu$ и даже дальше в сторону длинных волн спектра. Для того, однако, чтобы глаз воспринимал такие короткие и длинные излучения, последние должны обладать очень значительной мощностью.

нимаемые нами как цветные, возможно иметь, выделяя из тем или иным образом полученного сплошного спектра отдельные его участки или пользуясь светофильтрами.

Помимо прозрачных, кажущихся нам окрашенными, тел, нас окружают еще и цветные непрозрачные тела. Цветность этих последних обуславливается свойством их поверхности избирательно поглощать лучи. Таким же свойством избирательного поглощения обладают цветные пигменты и краски. Если растворить их в бесцветных жидкостях или нанести на ту или иную поверхность, они сообщают жидкости или поверхности определенный цвет.

Заметим, что, как уже указывалось выше, глаз получает ощущение цвета только в условиях работы колбочкового аппарата сетчатки. При яркостях, лежащих ниже порога возбуждения колбочек, когда работают только палочки, сплошной спектр воспринимается нами только как различные градации серого цвета. Относительная чувствительность как колбочек, так и палочек к излучениям разных длин волн иллюстрируется кривыми видности, приведенными на рис. 214.

Сравнивая между собою различные цвета, мы, прежде всего, разделяем их на две группы — ахроматические и хроматические. В группу ахроматических цветов входят черный, белый и все лежащие между ними различные по оттенку серые цвета. В группу хроматических цветов входят все наблюдаемые нами прочие цвета, кроме черного, белого и серых. Все эти прочие цвета отличаются друг от друга в отношении цветового тона, яркости (светлоты) и насыщенности.

Под цветовым тоном подразумевается то качество цвета, которое отличает любой хроматический цвет от ахроматического: красный цвет от зеленого, желтый от фиолетового и т. д. Ахроматические цвета цветового тона не имеют. Обычно считают, что спектр состоит из 8 основных цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубовато-зеленого, голубого, синего и фиолетового.

Такое разделение разных цветов спектра на 8 основных носит, однако, совершенно условный характер. На самом деле глаз способен различать значительно большее число цветовых тонов в спектре — всего свыше 100. Два цвета одного и того же цветового тона могут быть один светлее или ярче другого.

Помимо цветового тона и светлоты, цвета отличаются друг от друга еще в отношении их насыщенности. Под насыщенностью разумеется степень разбавления данного цвета белым, или, иными словами, то, что отличает данный цвет от одинакового по светлоте серого цвета. Для иллюстрации укажем, что голубой цвет разной насыщенности имеют разные участки безоблачного неба: в зените цвет неба обладает значительно большей насыщенностью, нежели ближе к горизонту, где он белесоватый, т. е. значительно менее насыщенный. Примером цветов одинакового цветового тона, но разной насыщенности, могут служить в различной степени выгоревшие на солнце материи или окрашенная бумага: цвет свежее отпечатанного плаката будет более насыщенным, чем цвет того же плаката, когда он выгорит на солнце и запылится.

Цветовой тон, светлота и насыщенность являются основными характеристиками цвета. На практике, вне лабораторных условий, нашему глазу, как правило, приходится иметь дело с излучениями не монохроматическими, а сложными, заключающими в себе лучи разных длин волн. Действуя на сетчатку одновременно, эти лучи разных длин волн вызывают в глазу какое-то одно определенное цветовое впечатление.

Вопрос о правилах или закономерностях, которые лежат в основе смешения цветных излучений или просто цветов, имеет весьма существенное практическое значение. В дальнейшем мы коснемся только немногих отдельных положений этого обширного и интересного вопроса.

Отметим прежде всего тот факт, что в сплошном спектре мы имеем непрерывный переход цветов из одного в другой. На краях спектра находятся красный и фиолетовый цвет. Смешение их, как показывает опыт, дает пурпурный цвет. Если присоединить к спектральным цветам еще и пурпурный, то, начав с одного какого-нибудь цвета, возможно, идя вдоль спектра от одного цветового тона

к другому, вернуться снова к тому цвету, с которого мы начали обход цветов по спектру. Пурпурный цвет замыкает, таким образом, имеющийся в спектре разрыв, и со включением его мы получаем непрерывный замкнутый цветовой ряд, весьма удобно располагаемый в виде круга.

Переходя к вопросу о смешении цветов, отметим прежде всего, что возможно иметь такие два хроматических цвета, которые при смешении дают ахроматический — белый или серый. В табл. 40 помещены названия цветов с соответствующими им длинами волн, дающие при смешении белый цвет. Такие цвета называются дополнительными цветами. В свойстве дополнительных цветов давать при смешении друг с другом ахроматический цвет возможно убедиться или с помощью одного из многочисленных видов спектральных аппаратов (см. выше I, гл. 1, § 5), или с помощью быстро вращающегося диска с нанесенными на нем разноцветными секторами, окрашенными в два дополнительных цвета. При быстром вращении диска (до 1800—2000 об/мин.) каждый участок сетчатки получает быстро чередующиеся и не успевающие исчезнуть зрительные впечатления, соответствующие нанесенным на сектор цветам, в результате чего глаз и видит диск окрашенным в ахроматический цвет.

Таблица 40

Дополнительные цвета

Красный	(0,656 μ)	и синева-зеленый	(0,492 μ)
Оранжево-красный	(0,608 μ)	и голубовато-зеленый	(0,490 μ)
Желтый	(0,585 μ)	и синий	(0,485 μ)
Желто-зеленый	(0,574 μ)	и синий	(0,482 μ)
Зелено-желтый	(0,564 μ)	и фиолетовый	(0,433 μ)

Два спектральных цвета, лежащие в ряду спектральных цветов между двумя смежными дополнительными цветами, дают при смешении цветовой тон, лежащий в ряду спектральных цветов между смешиваемыми цветами. Чем ближе друг к другу лежат эти смешиваемые цвета, тем большую насыщенность имеет цветовой тон цвета, получаемого в результате их смешения. Это правило смешения цветов может быть проверено с помощью спектральных приборов или на вращающемся диске.

Заметим, что совсем другие результаты получаются при смешении красок. Так, например, если смешение желтого и синего спектральных цветов дает желтый цвет, то при смешении желтой и синей краски (пигментов) мы не получаем желтого или синего цвета, а получаем зеленый. Объясняется это тем обстоятельством, что при смешении двух спектральных цветов мы имеем дело с суммированием (аддитивностью) составных излучений, поскольку в смеси мы найдем длины волн обоих смешиваемых компонентов, в то время как при смешении красок происходит явление совсем другого рода. Действительно, при падении белого света на поверхность, окрашенную желтой краской, отражается излучение желтого цвета, причем в этом желтом излучении, помимо желтых лучей, находятся еще в известном количестве красное и зеленое излучения. Точно так же при освещении белым светом поверхности, окрашенной в синюю краску в отраженном свете, имеющем синий цвет, мы найдем как синие, так отчасти и зеленые лучи. Если имеется смесь этих красителей, то белый свет, падающий на поверхность, окрашенную этой смесью, поглощается обоими красителями, и, следовательно, отраженный свет будет содержать в себе только те составные части белого излучения, которые не поглощаются ни первой, ни второй краской, т. е. зеленые. Таким образом, свет, отраженный от смеси двух красителей, содержит в себе результат двукратного вычитания из состава падающего излучения тех его компонентов, которые поглощаются смешиваемыми красителями.

Отметим, что явление дополнительных цветов возможно еще наблюдать следующим образом. Если пристально смотреть на поверхность, окрашенную в насыщенный цвет, например красный, а затем перевести взгляд на поверхность белого цвета, то на этой белой поверхности мы будем видеть в течение некоторого времени последовательный образ этого объекта, окрашенный в дополнительный, т. е.

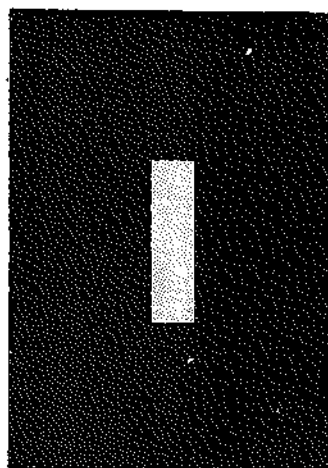
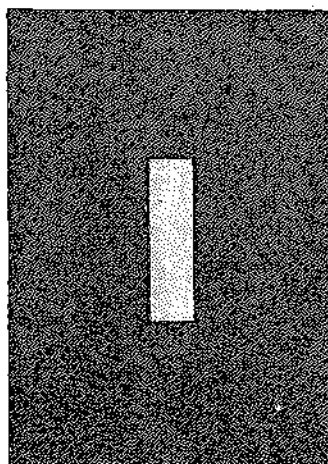
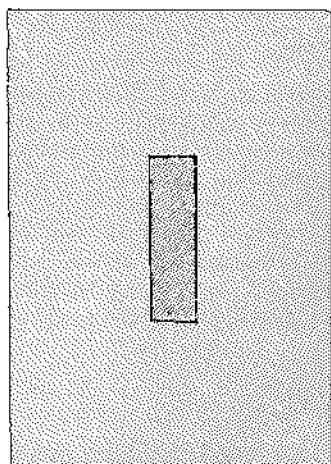


Рис. 261. Явление одновременного цветового контраста.

в данном случае голубовато-зеленый цвет. Небольшой белого цвета объект, помещенный на цветное поле, кажется окрашенным в цвет дополнительный к цвету поля. Так, белый объект на красном поле будет казаться имеющим синеватую окраску. Окраска двух смежных объектов, окрашенных в дополнительные друг к другу цвета, кажется более интенсивной, нежели тогда, когда соседний объект отсутствует (рис. 261). Описанное вкратце явление одновременного цветового контраста имеет большое значение в восприятии цветов окружающих нас объектов.

В заключение отметим, что при маскировке и камуфляже часто используется еще один вид смешения цветов, иногда называемый пространственным. Здесь имеется в виду ощущение определенного однородного цвета, которое появляется, если с достаточно большого расстояния смотреть на поверхность, покрытую мелкими пятнами или полосками разных цветов. Приходится предполагать, что эти полоски или пятна дают на сетчатке изображения настолько малых размеров, что, умещаясь на одной колбочке, они вызывают ощущение одного цвета, и притом такого же, какой мы восприняли бы, например, при смешении этих же цветов на вращающемся диске. Явление пространственного смешения цветов широко используется в текстильном производстве (цвет тканей), в живописи, в печатном деле.

§ 30. Цветовой треугольник

Как указывалось выше, два любых цветовых тона, лежащих в круге цветов ближе, нежели дополнительные, дают при смешении цветовой тон, лежащий между ними. Отсюда следует, что из трех цветов можно получить всевозможные цветовые тона. Это дает возможность построить так называемый цветовой треугольник, позволяющий быстро ориентироваться в результатах смешения цветов. Один из таких треугольников изображен на рис. 262.

Треугольник этот равносторонний. Каждая точка внутри него соответствует определенному цвету. Вершины его соответствуют красному, зеленому и синему цвету, а середина — белому цвету. Основания высот соответствуют пурпурному, желтому и голубому (голубовато-зеленому) цвету. Спектральные цвета — красный, оранжевый, желтый, желто-зеленый, зеленый и голубой — лежат вдоль первой и параллельно второй из равных сторон треугольника. Фиолетовому цвету соответствует точка вне треугольника, несколько ниже точки, соответствующей синему цвету. Насыщенные цвета лежат вдоль сторон треугольника и даже вне его. Менее насыщенные цвета попадают внутрь треугольника. Идя по одной из высот треугольника от ее основания к центру треугольника, мы будем иметь плавный, постепенный переход от насыщенного цвета через менее насыщенные, белесоватые, к чистому белому цвету.

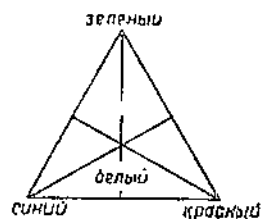


Рис. 262. Цветовой треугольник

Для того, чтобы найти результат смешения каких-либо двух цветов, интенсивности которых относятся как m к n , точки, соответствующие этим двум цветам, соединяются прямой, и положение точки, соответствующей цвету смеси, находится по правилу нахождения центра тяжести, т. е. соединяются эти цвета, прямая делится в отношении m к n , причем цвет смеси ближе к тому из двух цветов, интенсивность которого больше. Поскольку красный и зеленый цвета, будучи взятыми в равных количествах, дают желтый цвет, точка, соответствующая желтому цвету, находится посередине между этими двумя цветами.

Из цветового треугольника видно, например, что, желая получить белый цвет из желтого и синего цветов, надо, чтобы желтый цвет по своей интенсивности вдвое превышал синий. Из цветового треугольника видно также, что почти все существующие цвета могут быть получены путем смешения в разных пропорциях красного, зеленого и синего цветов с присоединением к смеси разного количества белого цвета. Благодаря такому их свойству эти цвета называют основными или первичными.

Уравнение, которым может быть определен каждый цвет C через три первичные цвета — красный (R), зеленый (G) и синий (B), имеет следующий вид:

$$C = \alpha R + \beta G + \gamma B,$$

где α , β и γ — коэффициенты, выражающие количества трех цветных компонентов. Ненасыщенные цвета образуются путем разбавления цвета C определенным количеством белого цвета. Для практической работы в области подбора и смешения цветов большое значение имеют так называемые атласы цветов.

§ 31. Теория цветного зрения. Аномалии в восприятии цветов

Существующие закономерности в вопросе смешения цветов, а также результаты изучения встречающихся у ряда лиц аномалий в цветовом восприятии послужили основанием для создания ряда теорий цветного зрения, имеющих своей целью облегчить понимание наблюдаемых подчас довольно сложных явлений.

Наиболее распространенной и удачной из этих теорий считается теория трехцветного зрения Юнга—Гельмгольца. В соответствии с возможностью получать всевозможные цвета путем смешения трех основных, или первичных, цветов, согласно этой теории, в сетчатке глаза предполагается наличие трех видов кол-

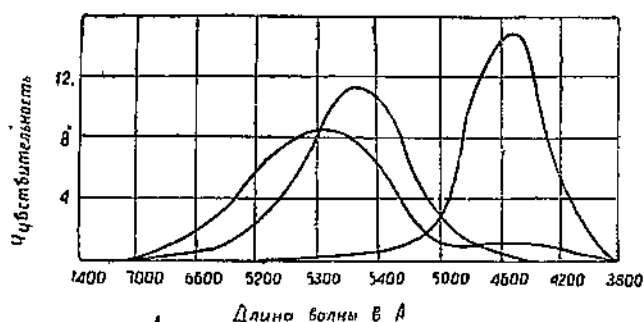


Рис. 263. Кривые основных возбуждений

бочек с тремя родами находящегося в них светочувствительного вещества, каждое из которых разлагается под действием излучения одной и той же длины волны в различной степени. Кривые чувствительности в зависимости от длины волны падающего излучения для каждого из трех упомянутых выше видов светочувствительных элементов сетчатки, известные под названием кривых основных возбуждений глаза, даны на рис. 263.

Как видно из кривых этого рисунка, каждое из трех родов светочувствительных элементов сетчатки, часто коротко называемых красным, зеленым и синим центрами, реагирует на возбуждения самых различных длин волн и только максимумы их чувствительностей занимают разные положения и соответствуют трем выбранным первичным, или основным, цветам — красному, зеленому и синему. Если на сетчатку падает красный свет, то возбуждается в максимальной степени красный центр, в ничтожной степени возбуждается зеленый и совсем не возбуждается синий. В результате падающий на глаз свет воспринимается как красный. Если на сетчатку падает желтый свет, то, как видно из рис. 263, в сетчатке возбуждаются красный и зеленый центры, в результате чего глаз получает ощущение желтого цвета. Белый свет вызывает одинаковые и притом сильные возбуждения всех трех центров. Если возбуждения одинаковы, но слабы, получается впечатление серого цвета. Если возбуждены все три центра, причем один из них больше, нежели два других, получается впечатление одного из цветов с разбавлением белым, т. е. виден ненасыщенный цвет.

Трехцветная гипотеза цветного зрения, созданная Юнгом и Гельмгольцем и в дальнейшем разработанная Максвеллом и Кенигом, хорошо объясняет все наблюдаемые явления смешения цветов и ряд других явлений, относящихся к области восприятия цветов (цветные последовательные образы, одновременный цветовой контраст и др.). Так же хорошо объясняются этой теорией часто имеющие место у отдельных лиц аномалии в восприятии цветов. Предполагается, что у лиц, страдающих такой аномалией, отсутствуют совсем или функционируют, но в ослабленной степени, один или даже два из трех цветовых центров. В результате такие

лица не видят различия между цветами, путают их, в то время как другие цвета ими ясно различаются. Особенно часто такие лица не видят различия между красным и зеленым цветами. Такого рода недостатком зрения страдал известный английский химик Дальтон, подробно изучивший это явление, почему оно называется часто дальтонизмом.

С практической точки зрения вопрос об аномалиях в цветном зрении имеет значение для пользования цветной сигнализацией.

В железнодорожном деле, где применяются зеленые и красные сигнальные очки, вопрос о дальтонизме имеет исключительное значение. Дальтоники не могут быть допущены к занятию должностей машинистов, поскольку они не видят различия между красным и зеленым сигнальным огнем. Помимо описанного выше случая аномалии в восприятии цветов, встречаются и другие. Много реже наблюдаются случаи полной цветовой слепоты, когда окраска окружающих объектов вообще не воспринимается. Аномалии в цветном зрении встречаются сравнительно часто: ими страдают до 9% мужчин и 0,5% женщин.

Поскольку люди, страдающие таким аномальным зрением, далеко не всегда знают о наличии у них недостатков в восприятии цветов, большое значение с точки зрения профотбора имеет вопрос о методике испытания цветного зрения.

Существующими в настоящее время методами наличие аномалий в цветовом восприятии может быть установлено с достаточной достоверностью и точностью.

§ 32. Пути и значение рационализации зрительных условий работы

Приведенные выше данные об устройстве и работе глаза дают возможность сделать ряд выводов и заключений относительно условий повышения производительности работы глаза. Заметим, что повышение эффективности работы глаза не должно ни в коем случае сопровождаться возрастанием степени утомления глаз. Сказанное существенно как для работы невооруженным глазом, так и для пользования теми или иными визуальными оптическими приборами. Судить о том, растет или уменьшается зрительное утомление в результате тех или иных изменений в условиях работы глаза, возможно, если существует способ численно характеризовать степень зрительного утомления. Последний вопрос, т. е. возможность численной характеристики утомления нашего органа зрения, является предметом многочисленных научных исследований последних лет, однако решенным его считать еще нельзя.

Известно, что из двух аппаратов глаза, играющих основную роль в процессе зрения, — мышечного, обуславливающего возможность аккомодации, конвергенции, изменения диаметра зрачка и подвижности глазных яблоков и световоспринимающего аппарата, — преимущественно утомляется, т. е. снижает свою работоспособность в процессе непрерывной зрительной работы, первый. Явления усталости или утомления сетчатки в том смысле, в каком мы говорим об усталости или утомлении мышечного аппарата глаза, обнаружить не удастся; сетчатка, если она здорова, всегда готова к работе, т. е. всегда реагирует на падающий на нее свет. Чувствительность же ее в данный момент, как мы знаем, помимо ряда иных причин зависит от световых условий, в которых она находилась в предшествовавшие моменты времени: всякий засвет сетчатки снижает ее чувствительность, и это снижение чувствительности сетчатки иногда называют ее утомлением.

Все сказанное выше позволяет считать, что, создавая рациональную обстановку работы глаза, надлежит стремиться к тому, чтобы утомление мышечного аппарата глаза было минимальным, сетчатка же имела бы максимально возможную при данных световых условиях чувствительность. К этим условиям добавим еще одно — третье, вполне понятное на основании всего изложенного выше, а именно: необходимо обеспечить четкое изображение рассматриваемых объектов на главном дне.

Что же следует делать для того, чтобы три условия были соблюдены возможно более строго?

Если глаз не эметропический, а гиперметропический, миопический или астигматический, то, независимо от того, рассматривает глаз далекие или близкие

объекты, необходимо правильно корректировать аметропию или астигматизм, применяя при этом очковые линзы, свободные от астигматизма косых пучков лучей. При недостаточном объеме аккомодации глаза должно пользоваться при работе на близких расстояниях очковыми линзами для близости, отличными от таковых для дали. Если работа производится не невооруженным глазом, а с помощью какого-либо оптического прибора, корректировать аметропию (не астигматизм!) возможно и путем соответствующей установки подвижных окуляров прибора. В этом случае важно следить за тем, чтобы такая установка окуляров проводилась не на глаз, а путем использования диоптрийной шкалы на окулярной трубке прибора, на основании заранее определенной величины аметропии.

Если глаз работает ночью или в сумерках при слабых освещенностях, важно до начала работы или наблюдений обеспечить сетчатке необходимое состояние адаптации: с этой целью наблюдатель должен, прежде чем начать работу, побыть в темноте или при слабых освещенностях не менее 25—30 мин. По завершении такой предварительной адаптации глаза и во время работы или наблюдений должно избегать действия на глаз каких бы то ни было ярких источников света, могущих ослеплять сетчатку, снижать ее чувствительность и вызывать появление последовательных образов.

При работе в дневных условиях существенно следить за тем, чтобы уровень освещенности на рабочем месте мог обеспечить наличие высоких степеней остроты зрения, контрастной чувствительности, быстроты восприятия и устойчивости ясного видения. Для мелких работ оптимальным значением освещенности следует признать освещенность в 1000 люкс. Снижение освещенности ниже 500—600 люкс, как ясно из всего изложенного выше, может уже существенным образом отразиться на темпах и качестве работы.

Говоря об уровне освещенности на рабочем месте или видимой яркости в поле прибора, существенно заметить, что очень важно следить за тем, чтобы в поле зрения глаза отсутствовали значительные контрасты в яркостях; с этой точки зрения недопустимым является, например, наличие на рабочем месте необходимых, согласно предыдущему, значительных яркостей при одновременном отсутствии верхнего света и, следовательно, значительно меньших яркостей вокруг рабочего места. При неизбежных в процессе работы движениях глаз зрачок глаза будет часто расширяться и сужаться, что вызывает соответственные напряжения мышц, обуславливающих аккомодацию и конвергенцию, и приводит к утомлению глаз. Также недопустимым является наличие в поле зрения наблюдателя ярких незащищенных арматурой источников света, ярких бликов на металлических поверхностях или просто ярких светлых пятен или поверхностей, сильно контрастирующих с окружающим фоном. Такие поверхности, блики или источники света вызывают изменения в адаптационном состоянии глаза, а также могут обусловить появление последовательных образов. И то и другое притупляет чувствительность глаза к свету и контрастам в яркостях и снижает, таким образом, эффективность работы глаза.

Если глазу приходится иметь дело с объектами или деталями объектов весьма малых размеров, важно, помимо достаточного уровня освещенности, подобрать фон, по цвету и яркости хорошо контрастирующий с рассматриваемыми объектами. Для уменьшения часто имеющих место при работе с мелкими деталями значительных напряжений аккомодации и конвергенции полезно в таких случаях использовать применение одного из видов бинокулярных луп.

Таковы в самых общих чертах основные мероприятия, которые важно осуществлять для того, чтобы работа глаза протекала возможно эффективнее, производительнее.

Роль, которую играет зрение при любого рода работе, измерениях при наблюдениях и особенно наблюдениях военного характера, настолько велика, что усилия и старания по проведению вкратце описанных выше мероприятий являются всегда оправданными. Разработка полного перечня таких мероприятий по рационализации зрительных условий работы всегда возможна на базе основных положений физиологической оптики, изложение которых и было дано в настоящем разделе книги.

СВЕТОВЫЕ УСЛОВИЯ НОЧЬЮ И ВИДЕНИЕ В ТЕМНОТЕ

§ 1. Источники естественного освещения ночью. § 2. Возможность восприятия при низких освещенностях. § 3. Видение в оптические приборы при низких освещенностях. § 4. Видение в невидимых лучах.

Современная тактика ведения войны настоятельно требует возможности видеть в темноте, не выдавая себя противнику. Этого можно достичь, или используя естественное ночное освещение, создаваемое природными источниками света, или применяя искусственное освещение (невидимыми лучами)*.

§ 1. Источники естественного освещения ночью

Главными природными источниками света являются небесные тела. Сила света в астрономии исчисляется в звездных величинах. Это понятие сложилось исторически; мы укажем только, что звезда первой величины дает освещенность на зрачке глаза в $8,3 \cdot 10^{-7}$ люкса** и что разница в пять звездных величин соответствует стократному изменению освещенности. Следующая таблица дает представление об освещенностях, создаваемых различными небесными телами:

Таблица 41

Солнце	100 000 люкс
Полнолуние, ясное небо	0,2 люкс — свеча на расстоянии 2,8 м
Венера в максимальной фазе	$1,1 \cdot 10^{-4}$ люкс — свеча на расстоянии 100 м
Сириус	$9 \cdot 10^{-6}$ люкс — свеча на расстоянии 330 м
Звезда 1-й*** величины	$8 \cdot 10^{-7}$ люкс — свеча на расстоянии 1100 м
Звезда 6-й*** величины (граница видимости невооруженным глазом)	$8 \cdot 10^{-9}$ люкс — свеча на расстоянии 11 км
Звезды 21-й величины (граница обнаружения при помощи фотографии в мощные телескопы)	$8 \cdot 10^{-16}$ люкс — свеча на расстоянии 1100 км

В безлунную ясную звездную ночь большая часть света, попадающего на земную поверхность, приходит, однако, не от видимых звезд и планет. Оказывается, что все видимые звезды эквивалентны 148 звездам первой величины. Половина их всегда находится под горизонтом, вторая половина хотя и расположена над горизонтом, но распределена равномерно по всему небосводу, поэтому освещенность, создаваемую каждой звездой, нужно умножить на косинус угла падения луча (зенитное расстояние звезды). Чтобы определить среднее значение косинуса, нужно разделить небосвод на две равные по площади части: прилегающие к зениту и к горизонту. Если бы все звезды были сосредоточены на линии раздела, они произвели бы такое же освещение горизонтальной поверхности, как и при равномерном распределении по всему небосводу. Из геометрии известно, что линия, делящая площадь полусферы пополам, проходит на расстоянии 60° от вершины, следовательно среднее значение косинуса для полусферы равно половине. Таким образом, все видимые звезды дадут освещенность около $0,3 \cdot 10^{-4}$ люкса.

Звезды, невидимые невооруженным глазом, также дадут свою долю в общей освещенности, но только их свет воспринимается нами как равномерное свечение небосвода. С помощью телескопа можно подсчитать количество звезд каждого класса вплоть до 21 величины. Так, оказывается, что все невидимые простым гла-

* Для первых двух параграфов настоящей главы использован материал статьи П. Боум а (Р. I. Bouma), Естественная освещенность и видимость ночью, Philips technische Rundschau, 5, 285, 1940.

** О люксе и стильбе см. I, гл. 1, § 11.

*** Вообще освещенность, создаваемая звездой величины m , находящейся в зените, равна

$$E = 10^{\frac{14,2 + m}{2,5}}.$$

зом звезды эквивалентны 540 звездам первой величины. Рассуждая, как и раньше, можно получить, что их доля в общей освещенности составляет около $1,1 \cdot 10^{-4}$ люкса.

На первый взгляд казалось бы, что планеты должны давать порядочную долю общего освещения, так как четыре самых ярких из них — Меркурий, Венера, Марс и Юпитер — по яркости значительно превосходят звезды первой величины и, будучи одновременно в зените, дали бы освещенность в $1,45 \cdot 10^{-4}$ люкса. Однако вследствие того, что орбиты всех планет находятся приблизительно в плоскости экватора, в наших широтах планеты никогда не поднимаются высоко над горизонтом. Поэтому все планеты вместе могли бы дать самое большее $0,75 \cdot 10^{-4}$ люкса. Учитывая же еще, что все планеты и в особенности Венера и Меркурий появляются на небе на очень короткое время, среднюю освещенность, даваемую ими, приходится оценивать еще ниже, а именно около $0,1 \cdot 10^{-4}$ люкса.

Кроме прямого света от звезд и планет, на земную поверхность падает также и свет, рассеянный атмосферой. Для оценки его доли воспользуемся аналогией с дневным освещением. В яркий безоблачный день в наших широтах яркость неба равна приблизительно 0,4 стильба. Примем радиус небосвода за единицу, тогда его площадь будет 2π квадратных единиц, а сила света $2\pi \cdot 0,4$ свечи.

Умножая, как и раньше, на среднее значение косинуса, получим освещенность на земной поверхности, даваемую небосводом, равной $2\pi \cdot 0,4 \cdot 0,5$ фота или 12 600 люксов. Это приблизительно в восемь раз меньше того, что дает прямой солнечный свет. Считаю, что это соотношение сохраняется для всех небесных тел, получим долю света звезд и планет, рассеянного атмосферой, равную приблизительно $0,2 \cdot 10^{-4}$ люкса.

Все перечисленные до сих пор источники дают в сумме освещенность $1,7 \cdot 10^{-4}$ люкса. На самом деле, как показывают измерения, освещенность ясной звездной безлунной ночью — величина непостоянная, и даже в одном месте, в течение одной ночи может меняться в несколько раз. Самое низкое значение, приводимое в литературе (повидимому преуменьшенное), составляет около $3 \cdot 10^{-4}$ люкса, следовательно не менее $1,3 \cdot 10^{-4}$ люкса нужно приписать другим причинам (отблески северных сияний, зодиакальный свет, свечение ночного неба). Сопоставим результаты в виде следующей таблицы:

Т а б л и ц а 42

И с т о ч н и к	Освещенность (в люксах)	Относитель- ная доля (в %)
Прямой свет видимых звезд	$0,3 \cdot 10^{-4}$	10
„ „ невидимых звезд	$1,1 \cdot 10^{-4}$	37
„ „ планет (среднее знач.)	$0,1 \cdot 10^{-4}$	3
Рассеянный свет звезд и планет	$0,2 \cdot 10^{-4}$	7
Прочие источники света	$1,3 \cdot 10^{-4}$	43

Только 13% всего света исходят от видимых точечных источников, остальные же 87% воспринимаются нами как собственная яркость ночного неба. Она оказывается равной $8,4 \cdot 10^{-3}$ стильба, что приблизительно в 300 раз выше порога чувствительности глаза. Этот фон ставит предел адаптации глаза и, в частности, обуславливает то, что мы видим звезды только шестой величины, а не восьмой, как это следовало бы из абсолютного порога чувствительности глаза*.

§ 2. Возможность восприятия при низких освещенностях

Способность глаза увидеть объект на каком-то фоне зависит от того, насколько угловая величина и контраст объекта с фоном далеки от порога чувствительности

* По вопросам ночной освещенности и ее использования для светомаскировочных расчетов см. статьи П. П. Феофилова (Доклады АН СССР, 34, 252, 1942; Известия АН СССР, серия географическая и геофизическая; Труды ГОИ, сб. статей по светомаскировке).

глаза к этим факторам. Минимальные угловые размеры объекта, еще видимого глазом, и контрастная чувствительность, т. е. минимальная процентная разница в яркостях объекта и фона, зависят друг от друга и от степени адаптации глаза. Чтобы охарактеризовать способность восприятия наблюдателя, например летчика, при интересующих нас обстоятельствах, рассмотрим три случая световых условий:

- 1) при полной луне,
- 2) при предельном, еще допустимом освещении во время затемнения и
- 3) в ясную безлунную звездную ночь.

Освещенность на земной поверхности в этих трех случаях будет соответственно:

- 1) 0,2 люкса, 2) 0,004 люкса и 3) 0,0003 люкса.

Примем средний коэффициент отражения земной поверхности в 15% , тогда оказывается, что глаз летчика должен адаптироваться на следующие яркости:

- 1) 10^{-6} стильба, 2) $1,9 \cdot 10^{-8}$ стильба и 3) $1,5 \cdot 10^{-9}$ стильба.

На таком фоне, в наиболее благоприятных условиях глаз способен различать достаточно большой темный объект в том случае, если его яркость соответственно на

- 1) 16% , 2) 46% и 3) 74% меньше яркости фона (см. III, гл. 7, § 13).

Эти значения получены в лабораторных условиях; в естественных же, в особенности в тех трудных условиях, в которых находится летчик на самолете, восприятие гораздо хуже, так что можно высказать следующее заключение: в безлунную звездную ночь летчик не может увидеть даже большие объекты; во время освещения, допустимого при затемнении, при благоприятных условиях объекты могут как раз достигать границы восприятия, в то время как при полной луне темные объекты на фоне земной поверхности удастся видеть довольно часто.

Совершенно иначе обстоит дело с объектами, которые кажутся более светлыми, чем окружающий фон. При затемнении этот случай желательно устранять, но в безлунные звездные ночи такие объекты неизбежно появляются. Подобно тому как в этих условиях при хорошей адаптации мы очень отчетливо различаем силуэты домов и деревьев на светлом фоне неба, так и летчик легко может обнаружить большие объекты, если их яркость сколько-нибудь сравнима с яркостью ночного неба. Этот случай встречается при наблюдении больших водных поверхностей, отражающих небо под достаточно большим углом. Известно, что в безлунные звездные ночи берега моря, большие озера и широкие реки ясно различимы. Очень светлые улицы (с коэффициентом отражения $25-30\%$) при особенно благоприятных условиях могут также достигать порога восприятия.

Возможность распознавания объектов определяется разрешающей способностью глаза, т. е. минимальным угловым расстоянием двух точек или штрихов, видимых как отдельные, не сливающиеся друг с другом точки или штрихи. Разрешающая способность глаза зависит от яркости и контрастности наблюдаемой картины, уменьшаясь при низкой освещенности и недостаточной контрастности. Например, при чтении в сумерки приходится подносить книгу близко к глазам; мы инстинктивно стараемся компенсировать недостаток освещенности увеличением угла зрения. Известно также, что шитье нитками того же цвета, что и материал, требует большего освещения, чем шитье белыми нитками черного материала или наоборот. В то время как в нормальных условиях принимается, что глаз может разрешить угол в $1'$, в наших трех случаях для объекта вдвое более яркого, чем фон, разрешающая способность будет соответственно:

- 1) $4'$, 2) $40'$ и 3) $1^\circ 50'$,

а для предметов в десять раз более ярких, чем фон:

- 1) $2'$, 2) $20'$ и 3) $55'$.

Предположим, что в реальных условиях разрешающая способность вдвое ниже лабораторных значений, тогда оказывается, что при лунном свете с высоты в 500 м летчик еще может различить, в зависимости от контраста, детали размером от 1,2 до 0,6 м. В условиях затемненного города можно обнаружить объекты раз-

мером от 12 до 6 м; поэтому светлые предметы необходимо маскировать. В безлунную звездную ночь можно заметить только объекты, значительно превосходящие по яркости окружающий фон. Детали размером в 16 м оказываются как раз на пределе разрешающей способности. С этой оценкой хорошо согласуется тот факт, что узкие ручьи с самолета не видны, широкие же реки можно проследить на всем течении.

В лабораторных условиях наименьшая освещенность, которую точечный источник должен создать на зрачке глаза для того, чтобы быть на пределе восприятия, в наших трех случаях имеет следующие значения:

1) $3 \cdot 10^{-8}$ люкса, 2) $6 \cdot 10^{-9}$ люкса и 3) $2 \cdot 10^{-9}$ люкса.

В практических условиях порог будет приблизительно в шесть раз выше, т. е. 1) $1,8 \cdot 10^{-7}$ люкса, 2) $6 \cdot 10^{-8}$ люкса и 3) $1,2 \cdot 10^{-8}$ люкса.

Хотя это и далеко уступает абсолютной чувствительности глаза (10^{-9} л), все же чувствительность глаза позволяет летчику видеть свечу в первом случае с высоты свыше 2000 м, во втором — свыше 4000 м и в третьем — свыше 9000 м. Отсюда ясно, как важно маскировать точечные источники света, и тем тщательнее, чем ниже общая освещенность.

§ 3. Видение в оптические приборы при низких освещенностях

Посмотрим теперь, насколько применение оптических приборов может улучшить видение при малых освещенностях. Здесь нужно различать два случая: наблюдение картины конечных размеров и наблюдение точечного источника света.

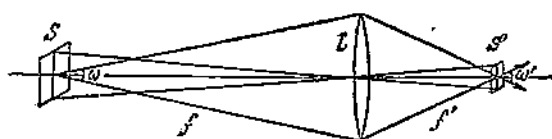


Рис. 264.

Геометрическая оптика учит, что если пренебречь отражением света от поверхности линз и поглощением в стекле, то яркость изображения, даваемого любой оптической системой, всегда равна яркости объекта. В самом деле, пусть s (рис. 264) небольшой участок изображаемой

поверхности, s' — его изображение, даваемое линзой L , f и f' соответственно расстоянию предмета и изображению. Обозначим через φ световой поток, попадающий в линзу; тогда для небольших относительно отверстий яркость предмета будет $\varphi/s\omega$, а яркость изображения $\varphi/s'\omega'$, где ω и ω' соответственно телесные углы, под которыми видна линза из точек предмета и изображения. Так как $\frac{s'}{s} = f'^2/f^2$, а $\omega'/\omega = f^2/f'^2$, то отношение яркостей всегда будет равно единице. Несколько сложнее доказательство этого положения для больших углов ω или ω' , но оно справедливо для любой оптической системы, а также и для совокупности оптического прибора и человеческого глаза.

Зрительное впечатление определяется освещенностью изображения на сетчатке, т. е. полным количеством света, попадающего на единицу поверхности изображения. Следовательно, при заданной яркости объекта зрительное впечатление зависит только от величины телесного угла, в пределах которого свет собирается к каждой точке изображения на сетчатке. Предельная величина этого угла ограничивается размерами зрачка глаза, который при полной адаптации достигает 8 мм. Для достижения максимального зрительного впечатления пучок света, выходящий из прибора, должен полностью заполнить зрачок глаза. Как только это условие выполнено, картина, наблюдаемая в прибор, будет казаться такой же яркой, как и при наблюдении невооруженным глазом. Всякое дальнейшее увеличение линз только утяжелит прибор, но не принесет пользы, так как свет, проходящий через периферические части линз, все равно не попадет в глаз. Призмённые бинокли чаще всего имеют зрачок выхода диаметром в 3—5 мм, в то время как галилеевы трубы, как, например, театральные бинокли, в большинстве случаев — 6 мм и

больше. Последние поэтому являются более пригодными для употребления ночью, чем первые.

Так обстоит дело, если пренебрегать потерями на отражение и поглощение. Однако в то время как потери на поглощение действительно невелики, отражением в сколько-нибудь сложных системах отнюдь нельзя пренебрегать. Количество света, отражаемого поверхностью линзы, зависит от сорта стекла, длины световой волны и угла падения лучей. В среднем принимается, что на каждой поверхности отражается от 3 до 4% падающей энергии (и проходит 96,5%). В призмённом бинокле, например, имеется двенадцать поверхностей, следовательно в построении изображения участвует только 57% падающей световой энергии ($0,965^{12} = 0,57$), остальные же 43% поглощаются стенками или выходят из трубы, частью также попадая в глаз и создавая фон, уменьшающий контраст. Театральный бинокль имеет только четыре преломляющих поверхности; потери в нем составляют всего лишь 17%. Это опять делает его более подходящим для ночных условий, нежели призмённый.

В настоящее время разработаны способы понижения коэффициента отражения стеклянных поверхностей до долей процента. Сложные приборы с такой „просветленной“ оптикой пропускают значительно большую долю поступающего света и дают заметный выигрыш в яркости по сравнению с обыкновенными.

Что касается до увеличения приборов, предназначенных для ночной работы, то оно должно быть возможно большим. В самом деле, как сказано выше, разрешающая способность глаза при низких освещенностях сильно зависит от освещенности. Поэтому чем больше увеличение, тем больше деталей можно различать, а следовательно, тем легче распознать объект. С этой точки зрения призмённые бинокли, наоборот, более подходят для ночных условий, чем театральные, так как обычно дают большее увеличение. Поэтому нельзя заранее сказать, какой тип бинокля следует применять ночью. В каждом конкретном случае необходимо, сравнивая два бинокля, учитывать и потери света и увеличения*.

Совершенно иначе обстоит дело в случае наблюдения точечных источников света. Как только угловая величина источника делается настолько малой, что его изображение умещается на одном светочувствительном элементе сетчатки, глаз воспринимает его как точку. Зрительное впечатление зависит только от полного количества энергии, попадающей на этот элемент, поэтому для того, чтобы собирать больше света, оптический прибор должен иметь как можно больший зрачок входа при зрачке выхода, не превышающем размеров зрачка глаза. В точку изображения на сетчатке будет собираться света во столько раз больше по сравнению с невооруженным глазом, во сколько раз площадь входного зрачка прибора больше площади зрачка глаза. С другой стороны, всякий источник приходится наблюдать на каком-то фоне. Увеличивается только яркость изображения источника, яркость же фона, как мы уже сказали выше, не увеличивается, и, следовательно, контраст повышается. Поэтому, в противоположность случаю наблюдения картины конечных размеров, оптический прибор может очень сильно повысить возможность видения слабых источников света. Именно этими причинами объясняется то, что мощные телескопы с объективами в десятки и сотни сантиметров позволяют видеть звезды в десятки тысяч раз более слабые, чем видит невооруженный глаз.

§ 4. Видение в невидимых лучах

Если естественная освещенность недостаточна, то единственный способ производить наблюдение, не выдавая себя противнику, состоит в том, чтобы освещать объект невидимыми лучами, получать невидимое изображение и каким-нибудь образом преобразовывать его в видимое. В качестве невидимых лучей могут быть использованы как ультрафиолетовые, так и инфракрасные; для преобразования изображений в разное время предлагался целый ряд способов, но только немногие

* Подробно этот вопрос разобран в статье А. А. Гершуна (Доклады АН СССР, 34, 32, 1942).

из них были разработаны настолько, что могли найти практическое применение. Несомненно, что разработка способов преобразования изображений ведется во всех странах, но сведений в печать о них почти не поступает; поэтому мы рассмотрим все способы, которые в настоящее или в будущее время могут иметь какое-либо значение.

Преобразование ультрафиолетового изображения в видимое представляет сравнительно простую задачу, так как кванты ультрафиолетового света несут больше энергии, чем видимые, и могут быть преобразованы без дополнительного источника энергии. Можно, например, воспользоваться явлением флуоресценции, т. е. свечением некоторых веществ под действием ультрафиолетовых лучей. Как легко себе представить, такой преобразователь должен состоять из объектива для ультрафиолетовых лучей, флуоресцирующего экрана и обыкновенного окуляра.

Несмотря на чрезвычайную простоту этого способа, подобный преобразователь изображений не получил практического значения, вероятно, вследствие того, что близкая ультрафиолетовая область видима простым глазом, в более же далекой области нет удобных и экономичных источников света.

Видение в инфракрасных лучах привлекало гораздо больше внимания.

Кванты инфракрасного света несут меньше энергии, чем видимые, поэтому в преобразовании инфракрасных лучей в видимые обязательно должен принимать участие дополнительный источник энергии.

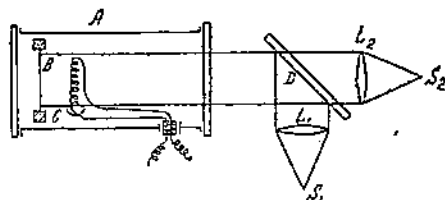


Рис. 265. Схема метода Черни

Один из способов преобразования инфракрасных изображений в видимое, с принципиальной стороны известный очень давно, был подробно исследован В. Л. Левшиным, В. В. Антоновым-Романовским и Л. А. Турмерманом. Он основан на влиянии инфракрасного облучения на явление фосфоресценции, вызванное видимым или ультрафиолетовым светом („тушение“ или „высвечивание“ — см. I, гл. I, § 9).

Основанный на этом принципе преобразователь изображений должен содержать фосфоресцирующий экран, на который поочередно бросается равномерное возбуждающее освещение (видимое или ультрафиолетовое, смотря по роду экрана) и проектируется инфракрасное изображение. В ярких местах изображения нормальная фосфоресценция нарушается, и мы увидим видимое изображение, негативное или позитивное, смотря по тому, какое явление используется — тушение или высвечивание. Специальный затвор должен открывать экран для глаза только на то время, пока на нем видно изображение.

До сих пор этот способ не имел большого значения вследствие малой чувствительности, но не исключена возможность, что с открытием новых, более эффективных фосфоресцирующих веществ такого рода преобразователи смогут оказаться достаточно практичными.

Другой метод преобразования инфракрасного изображения в видимое был предложен немецким физиком Черни. Этот метод был разработан для фотографирования инфракрасных спектров, но в принципе его можно применить и для видения в инфракрасных лучах. Идея его состоит в следующем (рис. 265).

В замкнутом сосуде А, снабженном двумя прозрачными окнами, подвешена тонкая целлулоидная пленка В, зачерненная с одной стороны. Из сосуда С, снабженного электрическим нагревателем, испаряется какое-нибудь подходящее вещество и в виде тонкого слоя конденсируется на незачерненной стороне пленки. С той же стороны, при помощи полупрозрачного зеркала D и линзы L₁ от вспомогательного источника S₁ на пленку бросается параллельный пучок света, так что при наблюдении из S₂ на пленке видны цвета тонких пластинок. Толщина конденсированного слоя выбирается так, чтобы давать минимум отраженного света. Если теперь на зачерненную сторону пленки спроектировать инфракрасное изображение, то в светлых местах пленка нагреется, конденсированный слой испарится и интерференция уже не даст полного уничтожения лучей, вследствие чего появится

отраженный свет. Так как параллельный пучок собирается глазом в точку, то для того, чтобы на сетчатке появилось изображение, необходимо рассматривать его через линзу L_2 , фокус которой совпадает с зрачком глаза.

При этом методе используется тепловое действие инфракрасных лучей; здесь встречаются изображения нагретых тел в собственном излучении, которые могут служить для обнаружения кораблей, самолетов и танков по нагретым частям (дымовые и выхлопные трубы, моторы). Но теория показывает, что преобразование лучистой энергии в тепло есть наименее выгодный способ ее обнаружения, поэтому от этого способа нельзя ожидать большой чувствительности. Кроме того, так как на нагревание пленки и испарение слоя жидкости требуется некоторое время, такого рода преобразователь должен обладать заметной инерцией.

Переходим, наконец, к наиболее новому, но давшему наилучшие результаты способу преобразования изображений, а именно к так называемому электронно-оптическому*. Он состоит в том, что невидимое оптическое изображение при помощи фотоэлектронной эмиссии преобразуется сначала в электронное изображение, а затем на флуоресцирующем экране снова в оптическое, но уже в видимое.

Если не считать патентных заявок, впервые такой преобразователь был осуществлен в Голландии (в лаборатории фирмы Филипс) Холстом, де-Буром, Тевесом и Венемансом. Преобразователи, действующие на этом принципе, были затем построены в Германии, Франции и Америке. Введенные более поздними авторами конструктивные изменения не оправдали большей сложности в изготовлении и обращении, и мы ограничимся описанием электронно-оптического преобразователя Холста, называемого иначе „стаканом Холста“.

Он представляет собой стеклянный стакан с двойными стенками и дном (рис. 266). На внутреннюю сторону наружного доньшка нанесен полупрозрачный серебряный слой, очувствленный цезием.

Этот слой является фотокатодом, работающим на просвет, т. е. свет, падающий на него сквозь стеклянное основание снаружи, вырывает электроны, вылетающие с противоположной стороны. На другое доньшко нанесен флуоресцирующий экран. Между катодом и экраном приложено высокое напряжение, ускоряющее электроны. Если на катод спроектировать инфракрасное изображение, то из каждой точки фотокатода будут вылетать электроны, число которых пропорционально интенсивности инфракрасного света в этой точке. Таким образом, оптическое изображение превращается в электронное. Электрическое поле между катодом и экраном заставляет электроны двигаться по прямым, перпендикулярным к катоду, поэтому электронное изображение в неизменном виде переносится на экран, где и возникает видимое изображение.

Казалось бы, что чувствительность такого прибора определяется только чувствительностью фотокатода, полезным выходом экрана и приложенным напряжением и что, повышая последнее, можно увеличивать чувствительность. Оказывается, однако, что некоторое количество электронов вылетает из катода даже в полной темноте. Эти электроны дают на экране равномерный фон, который, с одной стороны, не позволяет глазу адаптироваться на полную темноту, а с другой — уменьшает контрастность изображения. При повышении напряжения яркость фона увеличивается вместе с яркостью изображения. Минимальная различимая глазом контрастность ограничивает наименьшую освещенность объекта. Другим мешающим обстоятельством является освещение катода рассеянным светом экрана, что также вызывает электронную эмиссию, не связанную с изображением.

Разрешающая способность прибора определяется однородностью катода, мелкозернистостью экрана и приложенным напряжением. В первых приборах она была

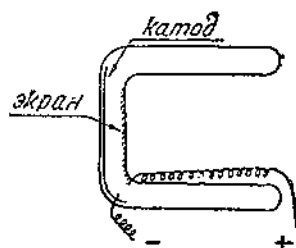


Рис. 266. Стакан Холста

* Об электроннооптических преобразователях, в частности о приборе Зворыкина, см. в книге: Е. Брюхе и О. Шерцёр, Геометрическая электронная оптика, пер. под редакцией и с дополнениями Б. А. Остроумова, Лениздат, 1943, стр. 410.

невелика, но затем ее удалось сильно повысить, так что получаемые изображения по качеству сравнимы с хорошим книжным клише.

Данных о минимальной освещенности объекта, видимого при помощи преобразователя Холста, так же как и каких бы то ни было эксплуатационных характеристик, в литературе не приводится. Из косвенных соображений (свойства фотокатодов и экранов) нужно заключить, что она должна быть порядка нескольких люкс^{ов} (в белом свете)*.

Относительно внешнего оформления прибора можно предположить, что он должен состоять из светосильного объектива, преобразователя, оборачивающего окуляра и источника высокого напряжения. Так как потребляемая мощность ничтожна, прибор можно питать от сухих элементов, повышая напряжение трансформатором типа катушки Румкорфа.

Описанные в литературе электронно-оптические преобразователи не были разработаны настолько, чтобы могли быть поставлены на вооружение. Но так как с 1937 г. публикация работ по их усовершенствованию прекратилась, нужно заключить, что им придается большое военное значение и эти работы засекречены. Достоверных сведений о применении их в охватившей сейчас весь мир войне нет, тем не менее нужно считаться с возможностью их появления в армии какой-либо из воюющих стран.

Глава 9

ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ И ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ

§ 1. Видимость и ее значение. § 2. Структура приземного слоя воздуха. § 3. Ослабление света воздухом. § 4. Теория горизонтальной видимости. § 5. Методы непосредственного определения прозрачности атмосферы. § 6. Методы косвенного определения прозрачности атмосферы.

§ 1. Видимость и ее значение

В военном деле вопросы видимости имеют большое и часто решающее значение. Так, например, в сражении при Ватерлоо французы из-за плохой видимости не смогли своевременно опознать прусские войска и дали им возможность соединиться с войсками англичан, что решило исход боя. Во время первой империалистической войны было немало случаев, когда исход операций зависел от условий видимости (танковый прорыв англичан у Камбрэ в 1917 г. под прикрытием дымовой завесы, выход немецкой эскадры из Ютландского боя и т. д.).

Плохая видимость была использована немцами при занятии Норвегии в апреле 1941 г. Доставка морем и высадка десанта в Нарвике прошли успешно из-за того, что значительно более мощный английский флот вследствие плохой видимости был практически небоеспособен.

Плохая видимость снижает интенсивность действий авиации, затрудняя прицельное бомбометание, сильно влияет на эффективность артиллерийского, пулеметного и ружейного огня. Из-за плохой видимости увеличиваются погрешности в определении расстояний как глазомерно, так и с помощью дальномеров, ухудшаются условия работы с прожекторами, затрудняется распознавание сигнальных огней и знаков и т. д. и т. п.

Знание причин, обуславливающих видимость и знакомство с основными методами определения дальности видимости, необходимо каждому командиру и может помочь ему в практической боевой обстановке.

Видимость объекта определяется следующими факторами.

1. Свойства объекта. К свойствам объекта наблюдения относятся его геометрические размеры, форма и фотометрические характеристики: цвет, яркость, коэффициент отражения (альбедо).

* Сказать, какова должна быть освещенность в инфракрасном свете, нельзя, так как освещенность есть понятие, имеющее смысл только для видимых лучей. Приблизительно можно сказать, что, убирая видимый свет фильтром для сохранения прежней яркости изображения, нужно увеличить силу света осветителя по крайней мере в десять раз.

2. Оптические свойства среды, находящейся между наблюдателем и объектом. Среда ослабляет лучи света, идущие от объекта к наблюдателю, причем ослабление света может быть вызвано как поглощением, так и рассеянием света, что ведет к уменьшению контраста между объектом и фоном. Оптическая неоднородность среды может исказить видимую форму предмета или сделать ее нечеткой (мерцания).

3. Условия наблюдения. Видимость зависит от того, ведутся ли наблюдения днем или ночью, от величины и спектрального состава освещения объекта, фотометрических свойств фона, на котором объект наблюдается, расстояния до объекта и от объекта до фона.

4. Средства наблюдения. Имеют значение: чувствительность приемника лучистой энергии (глаз, светочувствительный материал, фотоэлемент), разрешающая способность, контрастная чувствительность и т. д.

Из изложенного видно, что видимость определяется большим числом самых разнообразных и тесно связанных между собой факторов.

Однако основным фактором, влияющим на видимость любых наземных объектов при любых условиях наблюдения, являются оптические свойства нижних слоев атмосферы, а именно их способность ослаблять и рассеивать свет, идущий от объекта к наблюдателю. Поэтому прежде всего необходимо ознакомиться с структурой приземного слоя воздуха и теми оптическими явлениями, которые происходят при прохождении света через эту среду.

§ 2. Структура приземного слоя воздуха

Атмосфера представляет собой коллоидную систему, в которой воздух и водяной пар являются средой со взвешенными в ней частицами самого разнообразного происхождения. Это могут быть продукты конденсации атмосферной влаги, дым, пыль, органические частицы и т. д.

Одной из основных характеристик коллоидной системы является степень дисперсности, т. е. размер взвешенных частиц. В нижних слоях атмосферы размер взвешенных частиц колеблется в широких пределах — от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ см. Более крупные частицы встречаются сравнительно редко, так как они в спокойном воздухе быстро оседают на землю. Скорость оседания зависит от размера и удельного веса вещества частиц.

Т а б л и ц а 43
Скорость оседания водяных частиц

r см	V см/сек	V м/час
$1 \cdot 10^{-3}$	1,2	43,2
$1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,432
$1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,0043

В табл. 43 приведены значения скорости оседания V водяных капелек различных радиусов r при неподвижном воздухе. Из таблицы видно, что частицы с радиусом $r = 1 \cdot 10^{-3}$ см оседают в 10 000 раз быстрее частиц с радиусом $r = 1 \cdot 10^{-5}$ см.

Наиболее распространены светорассеивающие частицы, образовавшиеся вследствие конденсации атмосферной влаги, т. е. капельки воды.

При охлаждении воздуха содержащийся в нем водяной пар может переходить в воду, когда упругость его достигает упругости насыщающего пара. Однако упругость водяного пара, насыщающего какое-либо пространство, зависит от радиуса кривизны поверхности, у которой это пространство находится; чем меньше радиус кривизны поверхности, тем выше должна быть упругость насыщающего пара. В табл. 44 дана зависимость отношения упругости насыщающего пара P_1 над выпуклой поверхностью к упругости насыщающего пара P_0 над

плоской поверхностью при различных радиусах выпуклой поверхности и при разных температурах.

Таблица 44

r см	$\frac{P_1}{P_0}$ при 0° С	$\frac{P_1}{P_0}$ при 20° С
$5 \cdot 10^{-8}$	10,96	8,55
$5 \cdot 10^{-7}$	3,31	2,92
$5 \cdot 10^{-6}$	1,024	1,021
$5 \cdot 10^{-5}$	1,0024	1,0021
$5 \cdot 10^{-4}$	1,00012	1,00011

Из этой таблицы видно, что для конденсации влаги на молекулах воздуха, имеющих радиус кривизны $r = 5 \cdot 10^{-8}$ см, требуется почти одиннадцатикратное пересыщение пара, в то время как на частицах с $r = 5 \cdot 10^{-6}$ см конденсация влаги происходит почти так же, как и на плоскости.

Следовательно, при удалении от поверхности земли для конденсации влаги необходимо наличие каких-либо частиц более крупных, чем молекулы воздуха, которые явились бы ядрами конденсации.

Подобными ядрами конденсации являются ионы, частицы пыли и главным образом гигроскопические частицы веществ, обладающих химическим сродством к воде. Такими веществами являются: частицы солей (хлористый натрий и хлористый магний), попадающие в атмосферу из морской воды при ее разбрызгивании, твердые гигроскопические частицы и гигроскопические газы, попадающие в атмосферу в результате сгорания топлива.

Конденсация влаги на частицах солей облегчается тем, что над образовавшимся при этом водным раствором солей упругость насыщающего пара меньше, чем над чистой водой. Поэтому не редко образование туманов при относительной влажности порядка 92%.

Образовавшаяся на ядре конденсации капелька покрывается тонким слоем поглощенного воздуха, образующего пленку, препятствующую слиянию частиц.

Число ядер конденсации, содержащихся в воздухе, зависит от местных условий. В высоких горах, а также над океаном их меньше 100 в 1 см³, а в крупных промышленных центрах либо при сильном запылении атмосферы число ядер конденсации достигает 100 000—150 000 в 1 см³.

От числа ядер конденсации, содержащихся в данном объеме воздуха, зависит размер частиц, образующихся при конденсации атмосферной влаги. При большом числе ядер конденсации образуются весьма мелкие частицы так называемой дымки, имеющие диаметр около $5 \cdot 10^{-5}$ см. При меньшем числе ядер конденсации могут образоваться туманы, имеющие диаметр частиц, в среднем, порядка $5-9 \cdot 10^{-4}$ см. Облака состоят из частиц с диаметром порядка сотых долей миллиметра, а диаметр капель мелкого дождя — около 0,2 мм.

Схема классификации туманов, в зависимости от условий образования, приведена на рис. 267.

Туманы разбиваются на две основные группы: внутримассовые и фронтальные. Внутримассовые туманы разделяются на туманы радиационные и адвективные. Радиационные туманы образуются вследствие сильного лученспускания почвы и частиц, находящихся в влажном воздухе, в результате чего воздух оказывается пересыщенным, и происходит конденсация влаги на ядрах конденсации. Адвективные туманы образуются вследствие перемещения влажного воздуха над более холодной поверхностью.

Фронтальные туманы образуются в связи с фронтом перемещающихся воздушных масс в воздухе, насыщенном осадками. При понижении давления влажный воздух охлаждается вследствие адиабатического расширения, и происходит конденсация влаги.

Все последующие градации туманов ясны из их названий и пояснений, приведенных на схеме.

В метеорологии принята следующая терминология: если в результате конденсации атмосферной влаги горизонтальная дальность видимости черных предметов днем менее 1 км, то в воздухе имеется туман. Если же дальность видимости более одного километра, то сконденсировавшаяся влага образует дымку.

§ 3. Ослабление света воздухом

Проходя через толщу воздуха, лучистая энергия ослабляется как из-за поглощения воздухом и водяным паром, содержащимся в атмосфере, так и из-за рассеяния молекулами воздуха и взвешенными в воздухе частицами. В результате ослабления, количество яркости луча B , достигшего наблюдателя, меньше исходной яркости B_0 .

Ослабление яркости пучка чистым (сухим и беспыльным) воздухом — не велико, и для такой „идеальной“ атмосферы коэффициент прозрачности τ , т. е. отношение $\frac{B}{B_0}$, рассчитанное на 1 км, составляет 0,987.

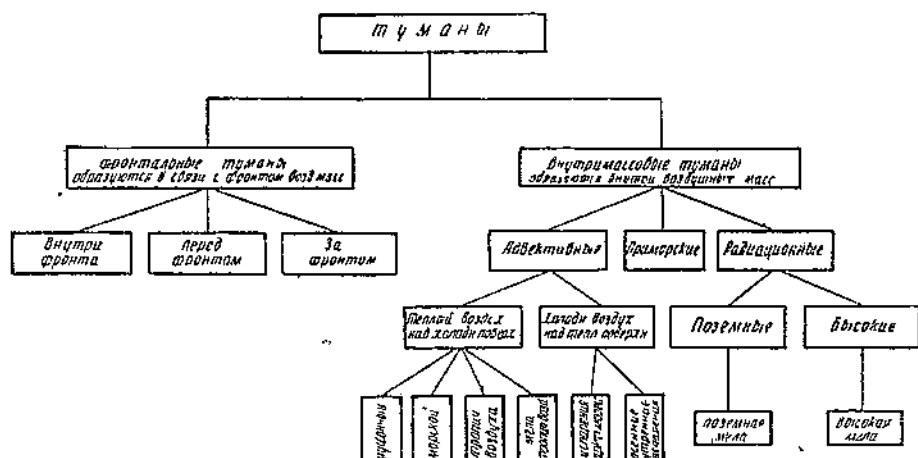


Рис. 267. Классификация туманов (по Виллет)

В нижних слоях атмосферы подобная прозрачность бывает в исключительных случаях, так как приземный слой воздуха обычно загрязнен взвешенными частицами и вызываемое ими рассеяние света является основным фактором, обуславливающим прозрачность атмосферы. Из-за рассеяния света коэффициент прозрачности может уменьшаться до весьма малой величины.

Например, при сильном тумане, когда днем черные предметы видны на расстоянии до 250 м, коэффициент прозрачности на 1 км равняется $1 \cdot 10^{-7}$; в этом тумане ночью необходим прожектор с силой света в 10 миллионов свечей, чтобы создать на расстоянии 1 км такую же освещенность, какую создает источник света в 1 свечу при хорошей прозрачности атмосферы.

Законы ослабления света вследствие рассеяния энергии на частичках мутной среды весьма сложны. Для молекулярного рассеяния (например, молекулами воздуха) имеем зависимость Рэлея:

$$R = \frac{2\pi^2(n-1)^2}{N\lambda^4} (1 + \cos^2 \varphi), \quad (3,1)$$

где n — показатель преломления вещества частицы;

N — число частиц в 1 см^3 среды;

λ — длина волны света;

φ — угол между направлениями падающего и рассеянного лучей.

Коэффициент $(1 + \cos^2 \varphi)$ показывает, что молекулярное светорассеяние симметрично, т. е. энергия, рассеянная по направлению луча, такая же, как и в обратном направлении, и в два раза больше, чем в перпендикулярном направлении. На рис. 268 показана в полярных координатах зависимость светорассеяния от угла (подобные диаграммы носят названия индикатрисс рассеяния).

В видимой части спектра закону Рэлея подчиняются частицы, имеющие диаметр не выше $0,1 \mu$, в частности частицы, образующие „дымку“. По этой причине дымка рассеивает сильнее коротковолновые лучи и представляется светящейся голубоватым светом. Путем измерения спектрального состава дымки с самолета * установлено два класса дымки, спектральные кривые которых приведены на рис. 269. Дымка I класса (голубая) по характеру спектральной зависимости яркости близка к тому, что должно было бы дать молекулярное рассеяние. Дымка II класса (серая) обусловлена рассеянием на смеси крупных и мелких частиц.

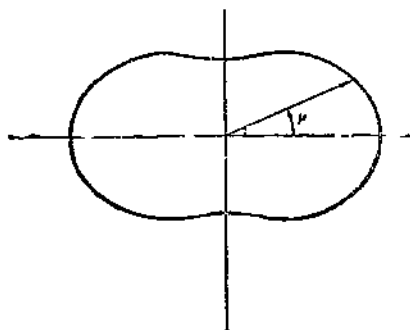


Рис. 268. Индикатрисса рассеяния

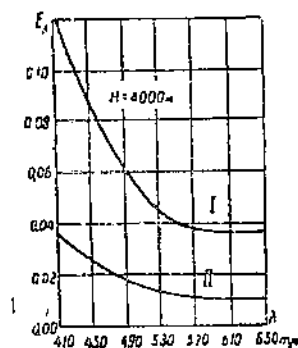


Рис. 269. Спектральный состав дымки (два класса)

По мере увеличения радиуса частиц и приближения его к длине волны падающего света законы рассеяния усложняются. Закономерности, связывающие интенсивность рассеяния с длиной волны падающего света, размером частиц и направлением рассеяния, полученные Густавом Ми ** на основе теоретических предположений Рэлея, выражаются весьма сложными формулами, позволяющими произвести вычисление лишь для некоторых конкретных случаев.

По теории Рэлея—Ми характер и интенсивность рассеяния зависят не от абсолютных величин радиуса r частицы и длины волны падающего света λ , а от их соотношения, а именно от величины α , равной

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}. \quad (3,2)$$

По мере увеличения α меняется форма индикатриссы рассеяния и соотношение между интенсивностями рассеяния света различной длины волны.

Зависимости индикатриссы рассеяния от α даны на рис. 270, 271 и 272, из которых видно, что по мере увеличения α симметрия индикатриссы нарушается и энергия рассеивается, главным образом, в направлении, противоположном источнику света. В табл. 45 приведены численные значения величин, характеризующих отношение яркости пучка B_0 , рассеянного по направлению падающих лучей, к яркости пучка B_{180° , рассеянного в направлении к источнику света, а также отношение светового потока, рассеянного в полусфере в сторону источника света $F_{\text{ист}}$ к полному рассеянному световому потоку F_0 , в зависимости от α . При α , близких к нулю, т. е. при радиусе частиц, весьма малом по отношению к длине волны

* Е. С. Майзель, Сб. ЦНИГА и К, № 1, стр. 35 и 45, 1939.

** См. Шулейкин [71], часть 6, § 4; Борн, Оптика, стр. 369.

света, происходит молекулярное рассеяние. Индикатрисса рассеяния симметрична, $\frac{B_{0^\circ}}{B_{180^\circ}} = 1$, а $\frac{F_{\text{исг}}}{F_0} = 0,5$. При α , близком к бесконечности, имеет место обычное преломление и отражение света на частицах; доля энергии, рассеянной назад, составляет лишь 8% от всей рассеянной энергии.

Таблица 45

α	$\frac{B_{0^\circ}}{B_{180^\circ}}$	$\frac{F_{\text{исг}}}{F_0}$
0	1	0,5
1	2,37	0,4
3	10,7	0,2
9	17,1	0,11
∞	24,2	0,08

В прожекторном деле иногда пользуются закономерностями светорассеяния, вычисленными Рокаром* приближенным методом, в предположении, что в нижних слоях атмосферы имеются частицы различного диаметра, причем распределение частиц по диаметру происходит по определенному закону.

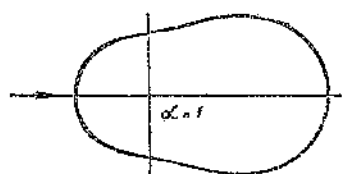


Рис. 270.

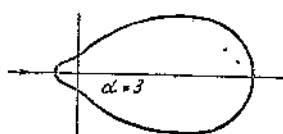


Рис. 271.

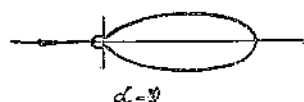


Рис. 272.

Зависимость индикатриссы рассеяния от $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$

По Рокару зависимость ослабления света от длины волны падающего света, выражается дробью $\frac{1}{\lambda^{2,5}}$, вместо $\frac{1}{\lambda^4}$ по Рэлею, а индикатрисса рассеяния имеет форму, приведенную на рис. 273.

Однако справедливость методики вычислений Рокара и принятого им закона распределения частиц оспаривается многими учеными, и вычисленные им закономерности могут быть применены лишь к отдельным частным случаям.

Шёнберг** дает следующую эмпирическую формулу зависимости яркости пучка лучей B_φ от угла φ :

$$B_\varphi = B_0 \delta (1 + p \cos \varphi + q \cos^3 \varphi), \quad (3,3),$$

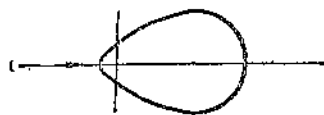


Рис. 273. Индикатрисса рассеяния по Рокару

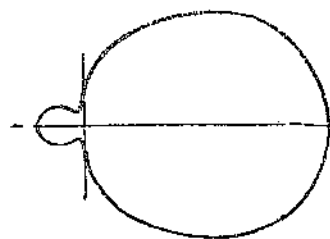


Рис. 274. Индикатрисса рассеяния по Шёнбергу

где δ — коэффициент рассеяния; p и q — постоянные, равные, для облаков и туманов, $p = 2,7$ и $q = 3,0$. Индикатрисса рассеяния по Шёнбергу дана на рис. 274.

Страттон и Хоутон***, пользуясь теорией Рэлея—Ми и некоторыми улучшениями этой теории, введенными Дебаем и Йобстом, вычислили зависимость коэффи-

* См. Хвостиков [69].

** Schoenberg, Handb. f. Astrophysik, II, 1929.

*** См. Хвостиков [69].

коэффициента ослабления света от величины α для случая тумана из чистой воды (коэффициент преломления 1,33), считая, что ослабление света происходит только за счет рассеяния и что капельки тумана имеют правильную сферическую форму и все одного радиуса. Кроме того, принималось, что отсутствует вторичное рассеяние.

По Страттону и Хоутону яркость пучка, прошедшего через слой l тумана, равняется

$$B = B_0 e^{-2\pi r^2 l N k}, \quad (3,4)$$

где B_0 — яркость пучка, вошедшего в слой тумана;

e — основание натуральных логарифмов;

r — радиус частиц в см;

N — число частиц в см³;

l — толщина тумана;

k — коэффициент, связывающий ослабление света с величиной α .

Вычисленная Страттоном и Хоутоном зависимость k от α дана на рис. 275, где величины α отложены по оси абсцисс, а значения k отложены по оси ординат.

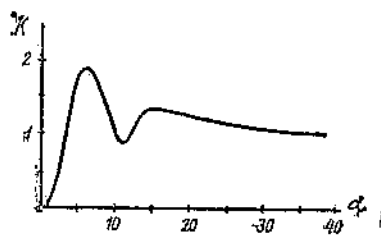


Рис. 275. Зависимость коэффи-
циента ослабления k от $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$

Характерной особенностью этой кривой является наличие максимумов и минимумов ослабления света при различных α . При α , равном 6,28, что соответствует равенству между радиусом частиц и длиной волны света, имеется максимум ослабления, после чего, по мере увеличения α , наступает минимум ослабления и потом вторичный максимум. При больших α , т. е. при радиусе частиц значительно большем длины волны падающего света, ослабление света практически не зависит от α .

Экспериментальная проверка правильности вычислений Страттона и Хоутона, в широком диапазоне дисперсностей туманов, не производилась,

главным образом, вследствие трудностей в получении совершенно однородного тумана и точного измерения радиуса частиц. Однако имеющийся экспериментальный материал, относящийся к отдельным участкам дисперсности, в основном подтверждает закономерности, выведенные Страттоном и Хоутоном.

На рис. 276 приведены три кривые, построенные Фойцником по данным Страттона и Хоутона, показывающие зависимость коэффициента относительного ослабления от радиуса частиц для трех участков спектра: красного, зеленого и синего. При частицах, радиус которых меньше 0,5 μ , синие лучи ослабляются больше, чем красные. При радиусе частиц около 0,5 μ ослабление синих и красных лучей одинаково, затем, по мере увеличения радиуса частиц, наступает максимум ослабления для красных и минимум для синих лучей, после чего соотношение вновь меняется, и при частицах с радиусом более 5 μ ослабление света практически одинаково для всех участков спектра.

Характерные особенности ослабления света в туманах различной структуры необходимо учитывать при решении тех или иных вопросов, связанных с дальностью видимости цветных объектов и огней, а также при сигнализации на невидимых (инфракрасных) лучах.

При применении теоретических данных к реальным туманам считается, что туманы лучше пропускают в длинных волнах, чем в коротких, так как, по закону Рэлея, ослабление света в мутной среде обратно пропорционально четвертой степени длины волны.

При этом не учитывается, однако, что закон Рэлея применим лишь к очень мелким частицам, диаметры которых много меньше длины волны (так называемая „воздушная дымка“); туманы, частицы которых имеют диаметр от 100 $m\mu$ до 500 $m\mu$, т. е. порядка длины волны, подчиняются более сложным зависимостям Страттона — Хоутона, которые, как мы видели, в некоторых случаях приводят к лучшему пропусканию даже в синей части. Однако и эти зависимости в чистом виде не

всегда соблюдаются, так как реальные туманы в большинстве случаев состоят из частиц разных диаметров.

Даже если допустить, что в тумане, наряду с крупными частицами, будут присутствовать мелкие частицы, подчиняющиеся закону Рэлея (т. е. дымка), то

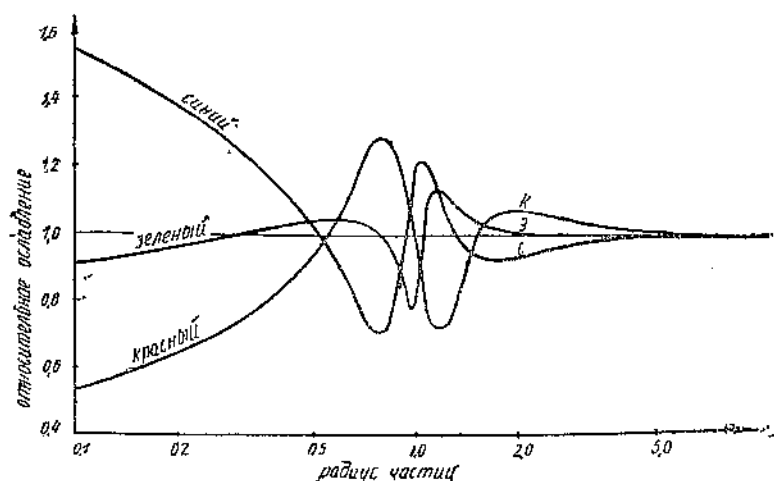


Рис. 276. Зависимость коэффициента относительного ослабления от радиуса частиц для красного, синего и зеленого участков спектра

нельзя упускать из виду абсолютную величину ослабления света, которая в густых туманах достигает громадной величины. Так, для густого тумана, дальность видимости которого днем составляет 100 м, имеем для видимой части спектра (λ около $0,5 \mu$) прозрачность на 1 км, равную 10^{-17} . Если бы все частицы под-

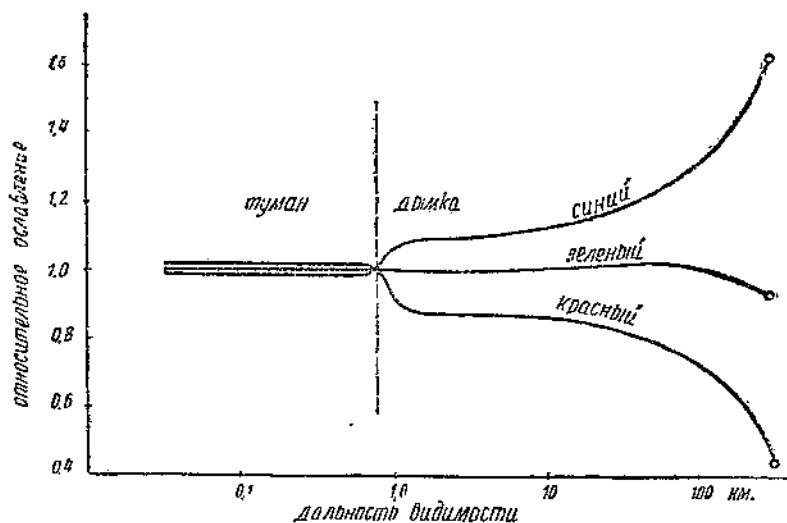


Рис. 277. Зависимость коэффициента относительного ослабления света от дальности видимости

чинялись закону Рэлея, то для $\lambda = 1 \mu$ мы имели бы увеличение прозрачности только в 16 раз, т. е. получили бы $1,6 \cdot 10^{-16}$; таким образом, практически нет выгоды применения инфракрасных лучей в таком густом тумане.

Для „дымки“ с мелкими частицами и большой величиной пропускания использование длинноволновой части спектра действительно может существенно улучшить результат наблюдений.

В связи с этим Фойцик предложил понятия „туман“ и „дымка“ связывать не с условной дальностью видимости, как это делается сейчас (см. выше § 2), а с спектральной прозрачностью нижних слоев атмосферы, являющейся определенным и важным для практики физическим свойством среды, и считать, что „дымка“ характеризуется меньшим ослаблением красных лучей, а „туман“ — либо несколько меньшим ослаблением синих лучей, либо нейтральным ослаблением в пределах всего видимого спектра. В подтверждение целесообразности подобного определения Фойцик* приводит кривые (рис. 277), показывающие зависимость коэффициента относительного ослабления света в различных участках спектра от дальности видимости, полученные как средние из многочисленных измерений Фойцика и Миддлетона. Последние точки, обозначенные кружками, соответствуют ослаблению света по Рэлею.

§ 4. Теория горизонтальной видимости[†]

Для того, чтобы несамосветящийся объект достаточных угловых размеров был виден, необходимо, чтобы контраст между объектом и фоном был выше порога контрастной чувствительности глаза**, т. е. той минимальной разности яркостей, которую в состоянии различить глаз наблюдателя.

Если порог контрастной чувствительности глаза обозначить через ϵ , то условие невидимости может быть записано в следующем виде:

$$\frac{B_{\phi} - B_0}{B_{\phi}} \leq \epsilon. \quad (4,1)$$

Кошмидером детально разработана теория горизонтальной видимости в нижних слоях атмосферы, основанная на предположении, что атмосфера однородна по своему составу и равномерно освещена солнечным светом, причем поверхность земли принимается за плоскость.

Краткое содержание этой теории таково. Пусть днем наблюдается объект, находящийся на расстоянии l от наблюдателя и имеющий яркость B_0 , а фон имеет яркость B_{ϕ} и находится на расстоянии Δl от объекта. Из-за рассеяния света в воздухе, на объект и фон наложится дополнительная яркость воздушной дымки, которая увеличит видимую яркость объекта и фона и уменьшит контраст между ними.

Яркость воздушной дымки β_0 , образующейся в слое воздуха протяженностью в l км, составляет некоторую часть яркости B_{∞} бесконечно большого слоя воздуха и связана с коэффициентом прозрачности τ следующей зависимостью:

$$\beta_0 = B_{\infty}(1 - \tau^l). \quad (4,2)$$

Если расстояние до объекта и фона различно, то яркость дымки, налагающаяся на фон и объект, также будет различна: на объект наложится дымка с яркостью $\beta_0 = B_{\infty}(1 - \tau^l)$, а на фон — дымка с яркостью $\beta_{\phi} = B_{\infty}(1 - \tau^{l+\Delta l})$.

Но одновременно с увеличением яркости объекта и фона вследствие дымки будет происходить уменьшение этих яркостей за счет ослабления света при прохождении его через воздух. Из-за ослабления света яркость объекта уменьшится до величины $B_0\tau^l$, а яркость фона — до величины $B_{\phi}\tau^{l+\Delta l}$.

Совместное действие ослабления света и наложения дополнительной яркости создаст кажущуюся яркость объекта B'_0 и фона — B'_{ϕ} , причем

$$B'_0 = B_0\tau^l + B_{\infty}(1 - \tau^l) \quad (4,3)$$

$$B'_{\phi} = B_{\phi}\tau^{l+\Delta l} + B_{\infty}(1 - \tau^{l+\Delta l}). \quad (4,3a)$$

* L. Foizik, Deutsche Reich. Reichsamt. f. Wetterdienst Wiss. Abh. B. IV, № 5, 1933.

** См. выше I, гл. 7, § 13.

В результате видимый контраст k' будет равен

$$k' = \frac{B_{\phi}' - B_0'}{B_{\phi}'} = \frac{B_{\phi} \tau^l + \Delta^l + B_{\infty} (1 - \tau^l + \Delta^l) - B_0 \tau^l - B_{\infty} (1 - \tau^l)}{B_{\phi} \tau^l + \Delta^l + B_{\infty} (1 - \tau^l + \Delta^l)}. \quad (4,4)$$

Раскрывая скобки и преобразуя выражение (4,4), получим для контраста в общем виде:

$$k' = \frac{\tau^l [B_{\infty} - B_0 - \tau^{\Delta^l} (B_{\infty} - B_{\phi})]}{B_{\infty} - \tau^l + \Delta^l (B_{\infty} - B_{\phi})}. \quad (4,4a)$$

Приравняв k' порогу контрастной чувствительности глаза ε и решая уравнение (4,4a) относительно l , получим то расстояние, при котором объект становится невидимым, т. е. дальность видимости, которую обозначим S :

$$S = \frac{1}{\lg \tau} \lg \frac{\varepsilon B_{\phi}}{B_{\infty} - B_0 - \tau^{\Delta^l} (B_{\infty} - B_{\phi}) (1 - \varepsilon)}. \quad (4,5)$$

Выражение (4,5) в таком виде слишком громоздко для практических вычислений, но в отдельных частных случаях оно может быть значительно упрощено. Весьма часто объект и фон находятся на одном расстоянии от наблюдателя. Тогда $\Delta l = 0$, и видимый контраст будет равен

$$k'_{\Delta l = 0} = \frac{\tau^l (B_{\phi} - B_0)}{B_{\infty} - (B_{\infty} - B_{\phi}) \tau^l}, \quad (4,6)$$

а дальность видимости

$$S_{\Delta l = 0} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \frac{\varepsilon B_{\infty}}{B_{\phi} - B_0 + \varepsilon (B_{\infty} - B_{\phi})}. \quad (4,6a)$$

На практике часто бывают известны не абсолютные значения B_{∞} , B_{ϕ} и B_0 , а их отношения. В этом случае формулу (4,6) удобнее преобразовать, выразив яркость объекта B_0 через контраст k и яркость фона B_{ϕ} , так как $B_0 = B_{\phi} - k B_{\phi}$. Тогда выражение (4,6a) примет следующий вид:

$$S_{\Delta l = 0} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \frac{1}{1 + \frac{B_{\phi}}{B_{\infty}} \left(\frac{k}{\varepsilon} - 1 \right)}. \quad (4,6b)$$

Этой зависимостью можно пользоваться для определения дальности видимости объектов, находящихся в непосредственной близости к фону, зная коэффициент прозрачности атмосферы, истинный контраст K и соотношение между яркостью фона и яркостью бесконечного слоя дымки.

Если фоном является бесконечно большой слой воздуха, то из формулы (4,4a) видимый контраст будет равен

$$k'_{B_{\phi} = B_{\infty}} = \tau^l \frac{B_{\infty} - B_0}{B_{\infty}} = \tau^l k, \quad (4,7)$$

т. е. при наблюдении объекта на фоне бесконечно большого слоя воздуха видимый контраст равен истинному контрасту, умноженному на прозрачность слоя воздуха между объектом и наблюдателем.

Соответственно этому, дальность видимости будет равна

$$S_{B_{\phi} = B_{\infty}} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \frac{\varepsilon}{k} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \varepsilon \frac{B_{\infty}}{B_{\infty} - B_0}. \quad (4,7a)$$

Яркость бесконечно большого слоя воздуха может быть с достаточной точностью приравнена к яркости B_n безоблачного неба у горизонта, так как в гори-

горизонтальном направлении толщина атмосферы приблизительно в 35 раз больше толщи атмосферы в зените. Тогда формула (4,7а) может быть переписана в следующем виде:

$$S_{B\Phi=B_0} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \varepsilon \frac{B_n}{B_n - B_0}. \quad (4,76)$$

Таким образом, зная истинный контраст яркости между объектом и небом у горизонта, можно легко вычислить дальность видимости при различных коэффициентах прозрачности воздуха.

Яркость объекта зависит от его освещенности и коэффициента отражения (альбедо). Освещенность объекта зависит от положения его относительно направления солнечных лучей, состояния неба и т. д.

В табл. 46 приведены, по данным измерений * в Киле (Германия), отношения

Таблица 46

Положение относительно солнца Состояние неба				
	„Юг“	„Восток“	„Запад“	„Север“
Пасмурно	0,53	0,42	0,42	0,38
Ясно	1,84	0,31	0,30	0,24
Среднее за год	0,985	0,383	0,381	0,342

освещенностей вертикальной (E_n) и горизонтальной (E_r) поверхностей при различных состояниях неба и при различной ориентировке вертикальной поверхности относительно направления солнечных лучей, причем под „югом“ принимается направление на солнце. Из табл. 46 видно, что в солнечный день освещенность вертикальной поверхности, ориентированной на „юг“, в 7 раз больше освещенности при диаметрально противоположной ориентировке, в то время как в пасмурную погоду эти освещенности отличаются лишь в 1,4 раза.

При достаточной мутности атмосферы и при небе, равномерно покрытом облаками, можно принять, что объект освещается равномерно со всех направлений. Тогда его яркость будет равна половине яркости фона (неба у горизонта), умноженной на альбедо A объекта, т. е.

$$B_0 = \frac{B_n A}{2}. \quad (4,8)$$

В этом случае выражение (4,76) примет следующий вид:

$$S = \frac{1}{\lg \tau} \lg \varepsilon \frac{B_n}{B_n - \frac{B_n A}{2}} = \frac{1}{\lg \tau} \lg \frac{\varepsilon}{1 - \frac{A}{2}}. \quad (4,9)$$

В случае же непосредственного освещения объекта солнечными лучами, либо при частичной облачности, необходимо пользоваться формулой (4,76), учитывая соотношение между яркостью неба и горизонта и яркостью объекта.

Все расчеты дальности видимости значительно упрощаются, если наблюдается черный или достаточно темный объект, яркость которого по отношению к яркости неба у горизонта настолько мала, что ею можно пренебречь, считая $B_0 = 0$ и контраст $k = 1$. Тогда видимый контраст k' будет равен:

$$k'_{B=0} = \tau^l. \quad (4,10)$$

* См. Оболенский [68], часть 2, стр. 60.

При $k'_{D_0} = 0 \ll \epsilon$ объект будет невидим. Следовательно, черные объекты перестают быть видимы на фоне неба у горизонта при прозрачности толщи воздуха, численно равной порогу контрастной чувствительности глаза.

При этом дальность видимости не зависит от яркости фона и условий освещения и равна:

$$S = \frac{\lg \epsilon}{\lg \tau}, \quad (4,10a)$$

или, заменяя τ через σ и D , получим:

$$S = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\epsilon} = \frac{3,91}{\sigma}, \quad (4,10б)$$

$$S = \frac{1}{D} \lg \frac{1}{\epsilon} = \frac{1,7}{D}. \quad (4,10в)$$

(при $\epsilon = 0,02$).

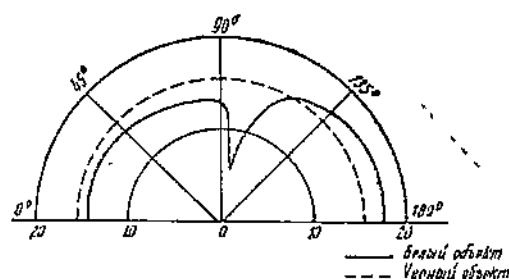


Рис. 278. Зависимость дальности видимости от азимута

На рис. 278 дана теоретическая зависимость дистанции видимости белого объекта с альбедо, равным 1, и черного объекта с альбедо, равным 0, от азимута, т. е. угла, образованного вертикальной плоскостью, проходящей через солнце и

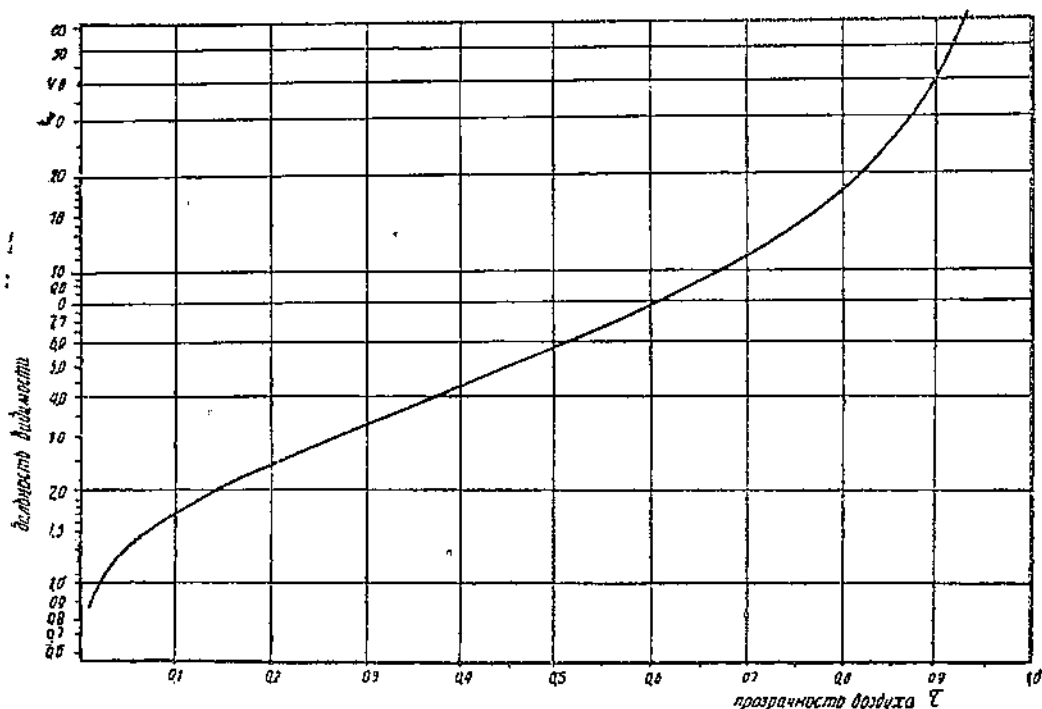


Рис. 279. Зависимость дальности видимости черных объектов от коэффициента прозрачности атмосферы

зенит, и направлением визирования, для атмосферы с коэффициентом прозрачности $\tau = 0,76 \text{ км}^{-1}$.

Как видно из рисунка, дальность видимости плоского белого объекта в направлении солнца (азимут 0°) несколько меньше дальности видимости черного объекта. По мере увеличения азимута дальность видимости белого объекта падает и после 90° достигает минимума. Этот минимум объясняется тем, что при определенной ориентировке объекта по отношению к солнцу яркость его приближается к яркости

неба у горизонта и контраст сильно уменьшается. При дальнейшем увеличении азимута освещенность и, следовательно, яркость белого объекта начинает увеличиваться за счет прямого освещения его лучами солнца, и при 150° дальность видимости белого объекта достигает максимума, после чего идет незначительное уменьшение дальности видимости по мере увеличения азимута. Дальность видимости черного объекта, как и указывалось выше, не зависит от азимута.

Зависимость дальности видимости черных объектов от коэффициента прозрачности атмосферы при пороге контрастной чувствительности глаза, равном 0,02, дана на рис. 279, где по оси абсцисс отложены коэффициенты прозрачности на 1 км, а по оси ординат — соответствующие дальности видимости в километрах.

Достаточно темными объектами наблюдения могут являться хвойные леса, потемневшие от времени строения, темные горы и утесы и т. д. Вот значения альbedo для некоторых объектов:

Хвойные леса	0,05
Смешанные леса	0,07
Темные породы дерева	0,15
Светлые породы дерева	0,35

Подобные естественные объекты используются при метеорологических наблюдениях над дальностью видимости.

В метеорологических сводках сведения о дальности видимости даются в баллах международной шкалы.

При пользовании этими данными необходимо твердо помнить, что метеорологическая дальность видимости определяется путем наблюдений над черными или достаточно темными объектами больших угловых размеров, проектирующихся на фоне неба у горизонта, и эти данные нельзя распространять на видимость не черных объектов или объектов, наблюдаемых на каком-либо другом фоне.

Зависимость между баллом видимости по коду, дальностью видимости S и коэффициентом прозрачности τ дана в табл. 47.

Таблица 47

Балл по коду	Дальность видимости S	Коэффициент прозрачности	Глазомерная оценка
0	50 м	—	Очень сильный туман
1	200 "	—	Сильный туман
2	500 "	0,0004	Средний туман
3	1 км	0,02	Слабый туман
4	2 "	0,14	Очень сильная дымка
5	4 "	0,38	Сильная дымка
6	10 "	0,67	Слабая дымка
7	20 "	0,82	Удовлетворит. видим.
8	50 "	0,92	Хорошая видимость
9—10	50 "		Исключительно хорошая видимость

Для „идеальной“ атмосферы, обладающей коэффициентом прозрачности $\tau = 0,987$ на км^{-1} , дальность видимости, вычисленная по формуле (4,10а), равна:

$$S = 296,7 \text{ км.}$$

Для сравнения интересно привести наибольшие зарегистрированные дальности видимости. Так, Черное море видно с Эльбруса на расстоянии 140 км и иногда с Арарата на расстоянии 250 км. Отмечена видимость гор Алжира из Испании на расстоянии 270 км. Это свидетельствует о весьма высокой прозрачности воздуха, обусловленной малым содержанием влаги и неблагоприятными условиями для ее конденсации.

Из всего изложенного с очевидностью следует, что во всех случаях дальность видимости обуславливается, прежде всего, коэффициентом прозрачности атмосферы.

Поэтому при любых расчетах, связанных с определением конкретной дальности видимости того или иного объекта, прежде всего необходимо знать коэффициент прозрачности атмосферы.

В настоящее время существует большое число самых разнообразных методов и приборов для определения прозрачности атмосферы*, которые могут быть разбиты на две основные группы. К первой группе относятся методы непосредственного определения прозрачности атмосферы, при которых коэффициент прозрачности вычисляется из прямых измерений ослабления света определенной толщей воздуха.

Ко второй группе относятся методы косвенного определения прозрачности атмосферы, при которых о величине прозрачности судят по явлениям, сопутствующим ослаблению света в атмосфере, как-то: по дальности видимости, яркости воздушной дымки, интенсивности светорассеяния и т. д.

§ 5. Методы непосредственного определения прозрачности атмосферы

Методы непосредственного определения прозрачности атмосферы заключаются в измерении силы света I какого-либо источника или яркости B пучка лучей до и после прохождения света через определенную толщу воздуха. Коэффициент прозрачности τ или коэффициент экстинкции σ вычисляются по формулам

$$\frac{I}{I_0} = \tau^L = e^{-\sigma L}, \quad (5,1)$$

или

$$\frac{B}{B_0} = \tau^L = e^{-\sigma L}, \quad (5,1a)$$

где I_0 и B_0 — соответственно исходные сила света или яркость;

I и B — сила света или яркость на расстоянии L км.

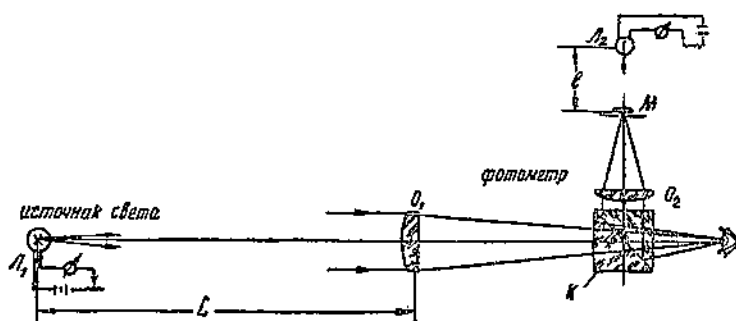


Рис. 280. Схема измерения прозрачности атмосферы звездным фотометром Максвелла

Измерения производятся несколькими способами, из которых мы рассмотрим следующие.

1. Измерение при помощи звездного фотометра по Максвеллу. Лучи света от удаленного источника $Л_1$ (рис. 280) с постоянной силой света, пройдя через толщу воздуха L , попадают на объектив $О_1$ фотометра, в фокальной плоскости которого помещается глаз наблюдателя. При этом наблю-

* См. также В. В. Шаронов, Журн. техн. физики, 12, 879, 1942.

датель видит объектив как равномерно светящийся диск, яркость которого зависит от освещенности объектива и может быть сравнена с какой-либо известной яркостью. Для этого между объективом и глазом помещается кубик Луммера k , с помощью которого создается поле сравнения, образуемое линзой O_2 , малым участком молочной пластинки M и лампой J_2 .

Перемещением лампы можно менять яркость молочной пластинки и таким образом фотометрировать источник. Произведя измерения на двух расстояниях L_1 и L_2 , получим два положения лампы J_2 относительно молочной пластинки, при которых будет наступать положение фотометрического равновесия. Обозначим эти положения соответственно l_1 и l_2 . Тогда можно написать два уравнения, соответствующие положениям фотометрического равновесия:

$$\frac{I_1}{L_1^2} \tau^{L_1} = C \frac{I_2}{l_1^2} \quad (5,2)$$

и

$$\frac{I_1}{L_2^2} \tau^{L_2} = C \frac{I_2}{l_2^2}, \quad (5,3)$$

где I_1 и I_2 — силы света ламп J_1 и J_2 ;

τ^{L_1} и τ^{L_2} — соответственно прозрачности толщи воздуха L_1 и L_2 ;

C — постоянная фотометра.

Совместное решение этих равенств дает

$$\left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \tau^{L_2} - L_1 = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2, \quad (5,4)$$

откуда

$$\tau^{L_2} - L_1 = \left(\frac{l_1 L_2}{l_2 L_1}\right)^2 \quad (5,5)$$

и, после логарифмирования:

$$\lg \tau = \frac{1}{L_2 - L_1} 2 \lg \frac{l_1 L_2}{l_2 L_1}. \quad (5,6)$$

Звездный фотометр, по Максвеллу, даст возможность измерять очень малые освещенности, так как им используется весь световой поток, попавший на объектив фотометра, и предельная чувствительность этого метода определяется порогом чувствительности глаза. Однако, наряду с высокой чувствительностью, этот метод имеет ряд недостатков, основным из которых является снижающее точность измерений плохое качество фотометрических полей. Оно обусловливается тем обстоятельством, что лучи света проходят через небольшой участок хрусталика глаза; из-за неравномерностей в хрусталике в поле зрения появляются перемещающиеся полосы и пр. Кроме того, необходимо, чтобы на зрачке изображения источника света и светящейся части молочной пластинки совпадали и были меньше некоторого предельного значения, равного примерно 0,5 мм. В противном случае видимая яркость полей сравнения будет зависеть не только от относительной силы света, но и от размеров изображения, что увеличит погрешность измерений. Это обусловливается так называемым эффектом Стайлса и Кроуфорда, которые нашли, что световое ощущение, вызываемое узким пучком света и проходящим через участок зрачка глаза, различно для разных участков зрачка, вследствие чего видимая яркость источника света не пропорциональна площади зрачка.

При соблюдении этих условий и тщательном проведении измерений точность измерений прозрачности атмосферы при помощи звездного фотометра может быть доведена до 5% .

2. Схема измерений ГОИ. Условия фотометрирования значительно улучшаются, когда производится измерение не точечных источников, а равномерно

светящихся площадей. В связи с этим Гуревичем была предложена следующая схема измерения прозрачности воздуха (рис. 281).

В качестве равномерно светящегося экрана используется отражатель прожектора, в фокусе которого помещается равномерно освещенная пластинка молочного стекла. Тогда для наблюдателя, находящегося в некотором удалении, отражатель будет казаться равномерно светящимся диском достаточно больших угловых размеров и фотометрирование такого диска при помощи телефотометра может быть произведено с достаточной точностью. Методика измерений аналогична методике измерений с фотометром Максвелла. Обработка результатов измерений производится по формуле

$$\lg \tau = \frac{1}{L_2 - L_1} \lg \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \quad (5,7)$$

где α_2 и α_1 — отсчеты по фотометру при расстояниях L_2 и L_1 .

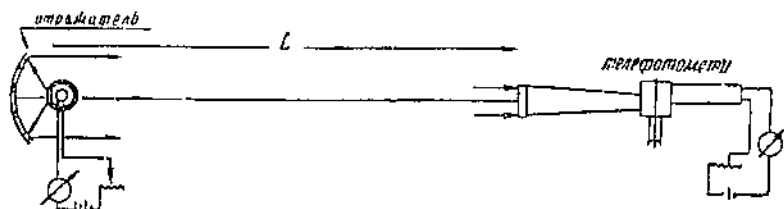


Рис. 281. Схема измерения прозрачности атмосферы

Эта установка была осуществлена в ГОИ*.

3. Измеритель видимости по Кошмидеру фирмы Цейсс. Измеритель видимости по Кошмидеру, выпускаемый фирмой Цейсс (рис. 282), представляет собой фотометр Пульфриха, приспособленный для измерения прозрачности атмосферы.

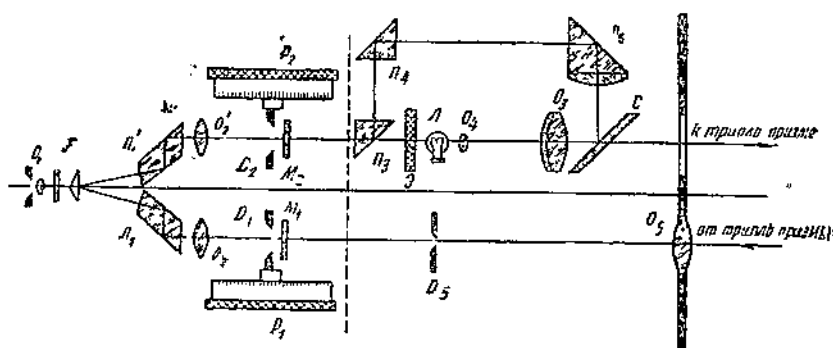


Рис. 282. Схема измерения видимости по Кошмидеру

Источником света служит кинопроекционная лампа L , находящаяся в фокусе оптической системы, состоящей из линзы O_4 и объектива O_3 . Выходящий из объектива O_3 параллельный пучок лучей проходит через наклонную плоскопараллельную пластинку C и падает на трипсель-призму, удаленную примерно на 100 м.

Трипсель-призма представляет собой трехгранную пирамиду с взаимно перпендикулярными гранями (рис. 283) и обладает тем свойством, что лучи света, падающие со стороны основания пирамиды, после преломления возвращаются обратно к источнику света, и это свойство призмы не зависит от поворота ее в широких пределах. Вследствие этого трипсель-

* Г. К. Устюгов, Измерение коэффициента пропускания нижних слоев атмосферы при помощи телефотометра Курпьянова и прожекторного отражения, Оптико-механ. пром., № 2, 1941.

призма является как бы зеркалом, не требующим точкой ориентировки для отражения лучей обратно к источнику света*.

После преломления в трипель-призме свет возвращается обратно, попадает в объектив O_3 и, пройдя диафрагму D_3 , освещает молочное стекло M_1 , расположенное перед измерительной диафрагмой D_1 фотометра Пульфриха. Часть света, отраженная пластинкой C , проходя через систему линз и призм, освещает пластинку M_2 , расположенную у второй измерительной диафрагмы D_2 . Таким образом, в поле зрения фотометра видны два поля сравнения, образованные молочными пластинками M_1 и M_2 . Яркость поля, образованного пластинкой M_2 , постоянна, а яркость поля, образованного молочной пластинкой M_1 , зависит от прозрачности атмосферы. В окуляре фотометра могут быть помещены цветные светофильтры F для измерений в различных участках спектра.

Площади отверстий измерительных диафрагм могут меняться при помощи рукояток P_1 и P_2 , снабженных шкалами, деления которых пропорциональны площадям отверстий. Установка нулевого положения диафрагм D_1 и D_2 производится при заведомо хорошей прозрачности атмосферы. Диафрагма D_2 ставится на максимальное раскрытие (100 делений), а диафрагмой D_1 устанавливается положение фотометрического равновесия. При ухудшении прозрачности атмосферы для установки

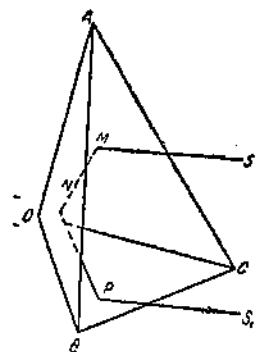


Рис. 283. Трипель-призма

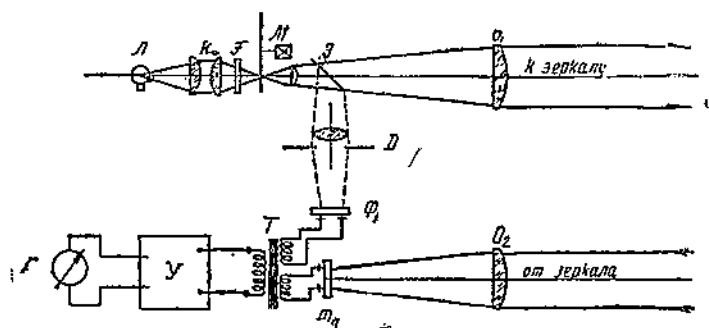


Рис. 284. Схема измерения прозрачности атмосферы по Бергманну

фотометрического равновесия необходимо уменьшить отверстие диафрагмы D_2 , отсчет по шкале этой диафрагмы даст значение прозрачности в двойной толщ (порядка 200 м) воздуха.

Пользуясь подобным измерителем видимости, Фойцик (в Германии) провел многочисленные измерения прозрачности воздуха для различных участков спектра (красного, желто-зеленого и синего), с одновременным определением структуры туманов.

4. Измерение прозрачности атмосферы по Бергманну. Описанные выше методы определения прозрачности атмосферы основаны на визуальных измерениях и являются субъективными, причем точность этих измерений зависит от порога контрастной чувствительности глаза. Кроме того, эти методы дают возможность измерять прозрачность атмосферы только ночью.

Предложенная Бергманном схема измерения с помощью фотоэлементов дает возможность объективного измерения прозрачности атмосферы не только ночью, но и днем, и как в видимой части спектра, так и в ближайших — ультрафиолетовом и инфракрасном участках.

Схема установки Бергманна изображена на рис. 284, и действие ее таково. Лучи света от лампы накаливания $Л$ при помощи конденсора $К$ собираются в узкий пучок и проходят через отверстия вращающегося диска $М$, прерывающего свет с частотой 500 пер/сек.

* Подробнее см. Тудоровский [5], стр. 97.

Далее свет попадает на полупрозрачное зеркало Z , установленное под углом 45° к оптической оси, которое разделяет основной пучок на 2 части. Отраженная от зеркала часть света проходит через диафрагму D с переменным отверстием и попадает на фотоэлемент Φ_1 . Часть света, прошедшая через зеркало Z , попадает на объектив, в виде узкого пучка лучей проходит исследуемый слой воздуха и после отражения от плоского зеркала попадает на фотоэлемент Φ_2 . Фотоэлементы соединены с обмотками трансформатора T таким образом, что при равенстве освещенностей фототоки компенсируют друг друга и во вторичной обмотке трансформатора ток отсутствует. При нарушении равенства фототоков, вызванном изменением освещенности одного из фотоэлементов от лампы L , во вторичной обмотке трансформатора появляется переменный ток, который после усиления усилителем $У$ и выпрямления воздействует на гальванометр G . Меняя отверстие диафрагмы D , можно установить минимум отклонения гальванометра G , что будет соответствовать равенству освещенности фотоэлементов.

Пользуясь светофильтрами F , можно измерять прозрачность атмосферы в различных участках спектра.

Применение в схеме Бергманна модулированного света и наличие трансформаторной связи между фотоэлементами и усилителем исключают влияние внешней освещенности, вследствие чего возможно производить измерения в дневное время, что является большим достоинством схемы.

Но эта схема обладает одним существенным недостатком, а именно для нее требуется два фотоэлемента, совершенно одинаковых по всем характеристикам, а подбор таких фотоэлементов является затруднительным.

Измерения прозрачности атмосферы с помощью измерителя Бергманна были проведены Штанге, обнаружившим суточные колебания в прозрачности атмосферы, а именно: в среднем, перед восходом солнца прозрачность атмосферы быстро возрастает; днем повышенная прозрачность сохраняется, и с заходом солнца происходит снижение прозрачности атмосферы.

Методы непосредственного измерения прозрачности атмосферы являются наиболее точными и достоверными, так как при этом непосредственно определяется ослабление света воздухом и исключается влияние побочных факторов.

Однако проведение непосредственных измерений прозрачности атмосферы связано с применением сложной аппаратуры, стабильных источников питания ламп накаливания и т. п. Поэтому получили широкое распространение методы косвенного определения прозрачности атмосферы, хотя и менее точные, но более доступные для повсеместного применения.

§ 6. Методы косвенного определения прозрачности атмосферы

1. Метод определения прозрачности атмосферы по дальности видимости. Этот метод получил широкое распространение вследствие простоты, так как при наличии соответствующих темных объектов прозрачность атмосферы может быть определена путем визуальных наблюдений за дальностью видимости и вычислений по формуле (4,10а).

Как указывалось выше, этот метод широко применяется в метеорологии. К объектам наблюдения предъявляются следующие требования: а) они должны быть достаточных угловых размеров (порядка $0,3^\circ$), б) по возможности, приближаться к черным и в) проектироваться на фоне неба у горизонта.

Число объектов должно быть достаточно велико, так как о дальности видимости судят по последнему, еще видимому объекту, и если расстояние между объектами большое, то соответственно возрастает и погрешность измерений дальности видимости.

По метеорологической шкале 1938 г., рекомендуется вести наблюдения, пользуясь 9 объектами, расположенными на следующих расстояниях: 50 и 200 м, 1, 4, 20 и 50 км.

При этом числе объектов точность определения дальности видимости — порядка 40% .

2. Измерители видимости. Вследствие того, что на метеорологических станциях не всегда имеется необходимый набор объектов, отвечающий всем перечисленным выше требованиям и малой точности глазомерных измерений, было предложено много различных приборов для измерения дальности видимости, так называемых измерителей видимости, при пользовании которыми можно было бы ограничить требования, предъявляемые к объектам наблюдения, и повысить точность определения дальности видимости.

Одним из первых приборов этого типа является измеритель видимости Виганда. Измеритель состоит из клинового или ступенчатого рассеивателя, заключенного в оправу, позволяющую вести наблюдения сквозь рассеиватель. Рассеиватель ослабляет контраст между объектом и фоном; при некоторой толщине рассеивателя можно добиться слияния объекта с фоном.

Обработка результатов наблюдения производится по формуле, связывающей отсчеты по шкале прибора с расстоянием до объекта и дальностью видимости.

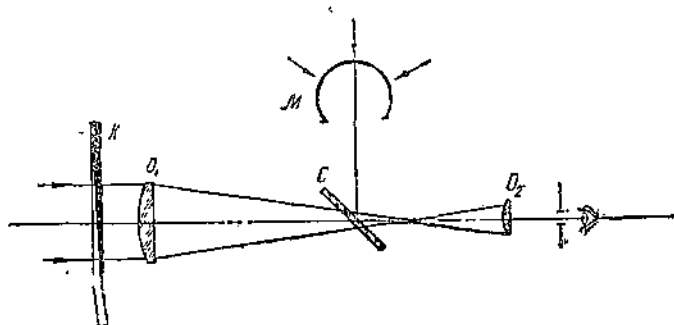


Рис. 285. Дымкомер Шаронова

Применение прибора на ряде метеорологических станций показало, что пользоваться этим прибором можно лишь при соблюдении ряда условий, но и в этом случае измерения не точны, и широкого распространения прибор Виганда не получил.

Другой прибор измерения видимости был предложен Шароновым * и назван им „дымкомер“.

Дымкомер Шаронова (рис. 285) является более сложным прибором, но с его помощью возможно определять коэффициент ослабления света с точностью до 10%.

В дымкомере Шаронова измерение дальности видимости также основано на искусственном уменьшении контраста между объектом и фоном, что достигается двумя путями:

1) уменьшением видимой яркости объекта и фона и 2) наложением на видимую яркость объекта и фона дополнительной яркости.

Уменьшение видимой яркости объекта и фона осуществляется при помощи перемещающегося перед объективом O_1 прибора нейтрально-серого клина K .

Наложение дополнительной яркости производится помещением между объективом O_1 и окуляром O_2 прибора прозрачной стеклянной пластинки C , расположенной наклонно таким образом, чтобы в глаз наблюдателя отражалась часть света (около 8%) от диффузного осветителя M , укрепленного в верхней части прибора и освещаемого дневным светом.

В. В. Шароновым рекомендуется следующая схема наблюдений при помощи дымкомера. Для наблюдения выбираются два объекта достаточных угловых размеров и находящихся в одном и том же азимуте, но на разных расстояниях L_1 и L_2 от наблюдателя.

* См. Оболенский [68].

Необходимо, чтобы оба объекта имели одинаковые яркости и проектировались на одинаковый фон. Дымкомер поочередно наводится на каждый из объектов; перемещением клина K добиваются слияния объекта с фоном. Для вычислений используются средними значениями из 10 отсчетов по шкале клина для каждого из объектов. Коэффициент ослабления, выраженный через оптическую плотность D (см. стр. 141), вычисляется по формуле

$$D = q \frac{x_1 - x_2}{L_2 - L_1}, \quad (6,1)$$

где x_1 и x_2 — средние отсчеты по шкале клина дымкомера при измерениях с первым и вторым объектами, а q — константа клина.

Применение в дымкомере оптической системы с увеличением дает возможность использовать для наблюдений объекты с соответственно меньшими угловыми размерами.

3. Определение прозрачности атмосферы по яркости воздушной дымки. Прозрачность атмосферы может быть определена путем измерения яркости дымки в определенной толще воздуха. Если яркость неба у горизонта фотометрически уравнивать с яркостью дымки в толще l , то, пользуясь формулой (4,2), можно определить коэффициент прозрачности атмосферы.

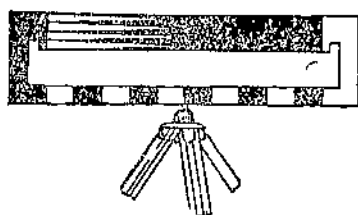


Рис. 286. Измеритель видимости Пискуна

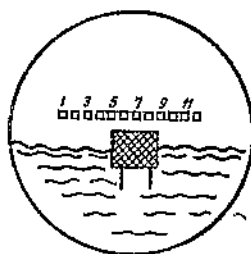


Рис. 287. Диафаноскоп Шаронова

Действительно, при фотометрическом равенстве яркость дымки β_l будет равняться яркости неба у горизонта (т. е. яркости B_∞ бесконечно большого слоя воздуха), ослабленной фотометрическим устройством, т. е.

$$\beta_l = B_\infty T, \quad (6,2)$$

где T — коэффициент пропускания фотометрического устройства. По формуле (4,2):

$$\beta_l = B_\infty (1 - \tau^l),$$

следовательно

$$B_\infty T = B_\infty (1 - \tau^l), \quad (6,3)$$

откуда

$$\tau^l = 1 - T. \quad (6,4)$$

Таким образом, зная расстояние l и коэффициент пропускания T фотометра, можно вычислить коэффициент прозрачности атмосферы.

Существует ряд приборов, действие которых основано на принципе определения прозрачности атмосферы по яркости воздушной дымки.

Одним из простых приборов этого типа является фотометрический клин, или так называемый стационарный измеритель видимости Пискуна, схематически изображенный на рис. 286. Прибор состоит из прямоугольной деревянной рамы, внутри которой помещен фотометрический клин, образованный набором тонких металлических пластин треугольной формы, обращенных вершинами в одну сторону с треугольными же просветами между ними. Отдельные участки подобного

клина имеют различный коэффициент пропускания — от совершенно непрозрачного участка со стороны оснований треугольных пластин до почти прозрачного у вершин.

Прибор устанавливается в некотором удалении от наблюдателя (порядка 15 м) с тем, чтобы глаз не различал отдельных пластин клина и весь клин казался серой полосой с монотонно убывающей прозрачностью.

Измерения с помощью измерителя видимости Пискуна сводятся к тому, что через свободную часть рамки наблюдают темный объект (например, щит, окрашенный темной краской), находящийся на известном расстоянии l от наблюдателя, и сравнивают видимую яркость этого щита, обусловленную яркостью дымки в толще l , с яркостью неба у горизонта, видимого через клин. Отсчет производится по шкале, нанесенной на одной из сторон рамки клина. Зная, из градуировки, коэффициент пропускания участка клина, соответствующего отсчету по шкале, можно по формуле (6,4) вычислить коэффициент прозрачности атмосферы.

Более совершенным прибором, действующим на том же принципе определения прозрачности атмосферы по яркости воздушной дымки, является диафаноскоп Шаронова, представляющий собой монокуляр (половина обычного бинокля), у которого в фокальной плоскости объектива взамен сетки с делениями устанавливается стеклянная пластинка с нанесенными на ней квадратными марками, имеющими различные коэффициенты пропускания. При наблюдении в поле зрения диафаноскопа виден объект и над ним ряд марок, проектирующихся на фоне неба (рис. 287).

Измерения с помощью диафаноскопа сводятся к тому, что, наблюдая в монокуляр какой-либо темный объект, находящийся вблизи горизонта и расстояние до которого известно, замечают, яркости какой из марок соответствует видимая яркость объекта. Зная из первоначальной градуировки коэффициент пропускания соответствующей марки, выясняют коэффициент прозрачности атмосферы, пользуясь формулой (6,4).

Измерения с помощью измерителя видимости Пискуна и диафаноскопа Шаронова могут дать хорошие результаты лишь при равномерном фоне неба у горизонта и при однородном освещении всей толщи воздуха.

Поэтому более точными являются измерения относительной яркости дымки в двух различных толщах воздуха l_1 и l_2 , так как при этом может быть исключено влияние неравномерности неба у горизонта.

Измеряя яркость воздушной дымки в двух различных толщах воздуха, можно получить два уравнения:

$$\beta_{l_1} = B_{\infty}(1 - \tau^{l_1}), \quad (6,5)$$

$$\beta_{l_2} = B_{\infty}(1 - \tau^{l_2}). \quad (6,5a)$$

Совместное решение этих уравнений дает

$$\frac{\beta_{l_1}}{\beta_{l_2}} = \frac{1 - \tau^{l_1}}{1 - \tau^{l_2}}. \quad (6,6)$$

Откуда после преобразований

$$\frac{\beta_{l_1}}{\beta_{l_2}} \tau^{l_2} - \tau^{l_1} + \left(1 - \frac{\beta_{l_1}}{\beta_{l_2}}\right) = 0. \quad (6,7)$$

Выражение (6,7) может быть решено графически, для определенных отношений l_2 к l_1 .

Если производить измерения с помощью телефотометра с большим фокусным расстоянием, то нужны сравнительно небольшие объекты наблюдений, и они могут быть осуществлены в виде черных щитов либо черенных внутри ящиков с отверстиями.

Подобная установка была осуществлена В. А. Березкиным в отделе актинометрии и атмосферной оптики ГГО.

4. Определение прозрачности атмосферы по величине светорассеяния. Ослабление света при прохождении его через толщу воздуха обуславливается рассеянием света молекулами воздуха и взвешенными в воздухе частицами. Поэтому между ослаблением света и величиной светорассеяния существует определенная зависимость, а именно: интенсивность светорассеяния R прямо пропорциональна коэффициенту ослабления σ , т. е.

$$R = k\sigma, \quad (6,8)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Выше указывалось, что коэффициент ослабления σ (коэффициент экстинкции) связан с коэффициентом прозрачности следующей зависимостью:

$$\tau = e^{-\sigma},$$

откуда

$$\sigma = \ln \tau.$$

Зависимость между интенсивностью светорассеяния и прозрачностью воздуха может быть выражена следующим соотношением:

$$R = -k \ln \tau. \quad (6,9)$$

Величина R есть интегральное рассеяние света определенным объемом воздуха, т. е. полное рассеяние света во все стороны.

Однако непосредственное измерение общего светорассеяния весьма затруднительно, и обычно вместо измерения общего светорассеяния измеряют интенсивность светорассеяния под каким-либо определенным углом φ к направлению падения света, чаще всего под углом 135° . В этом случае интенсивность светорассеяния характеризуется яркостью пучка света (конуса Тиндала), наблюдаемой на темном фоне под углом φ . Эта яркость может быть фотометрически измерена при помощи нефелометра, т. е. фотометра, предназначенного для измерения рассеянного света.

В 1936 г. Государственным Оптическим институтом были выпущены опытные образцы разработанных Г. Н. Раутианом нефелометров для определения прозрачности воздуха. Градуировка и испытания этих образцов подтвердили пригодность фотометрического метода определения прозрачности атмосферы. В 1940 г. М. М. Гуревичем и Н. Э. Ритынем (ГОИ) был разработан более совершенный нефелометр, схема которого дана на рис. 288. В этом приборе источником света является лампа накаливания 1 на 8 V 80 W, свет которой с помощью двухлинзового конденсора 2 направляется внутрь камеры 3, через которую проходит воздух. Наблюдение яркости конуса Тиндала производится под

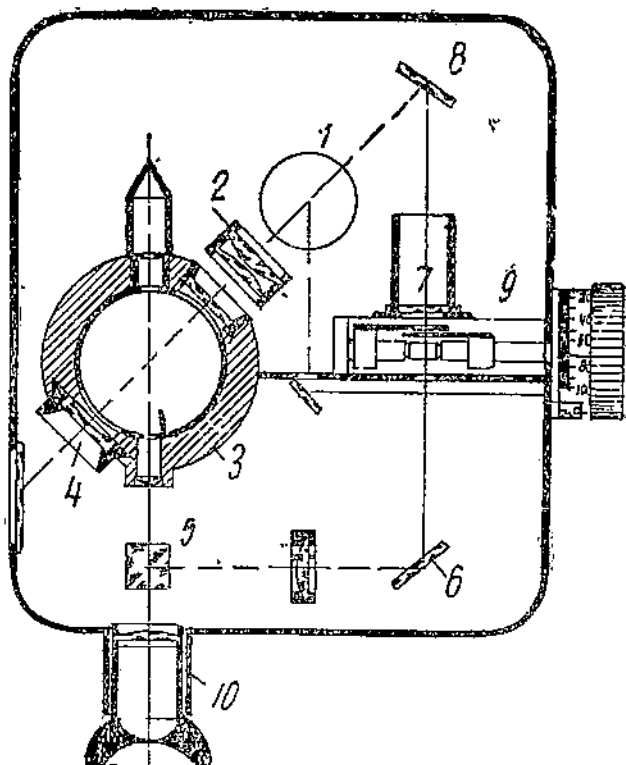


Рис. 288. Нефелометр

Рис. 288. Нефелометр

углом 135° . Фоном для наблюдения служит отверстие в конической пустотелой пробке 4, укрепленной на стенке камеры и окрашенной внутри черной краской.

Поля сравнения, наблюдаемые в окуляре 10, образуются при помощи кубика Луммера 5. Пластинкой сравнения служит белый экран 6, освещенный молочной пластинкой 7, в свою очередь освещаемой лампой прибора при помощи зеркала 8.

Уравнивание фотометрических полей производится путем изменения светящейся площади молочной пластинки 7 при помощи диафрагмы 9 с переменным отверстием. Шкала диафрагмы градуирована пропорционально площади отверстия, т. е. пропорционально коэффициенту ослабления. Переход к коэффициенту прозрачности производится по градуировочному графику. Диапазон измерений прибора от $\tau = 0,01$ до $\tau = 0,95$ на 1 км. Градуировка прибора производилась при помощи установки для непосредственного измерения прозрачности атмосферы по Гуревичу (см. выше, стр. 258).

Принципиальным недостатком нефелометрического метода определения прозрачности атмосферы является то обстоятельство, что интенсивность светорассеяния, измеряемая под определенным углом, зависит не только от числа частиц, но и от формы индикатриссы рассеяния. Однако, как показал опыт градуировки и испытаний нефелометров, расхождения между значениями коэффициента прозрачности воздуха, полученными из непосредственных измерений и при помощи нефелометров, — не велики. Значительно большее влияние оказывают местные загрязнения воздуха (пыль от дорог, дым топок или табачный и т. д.), и это необходимо учитывать при пользовании приборами и располагать их таким образом, чтобы, по возможности, исключить влияние местных загрязнений воздуха.

Несмотря на эти крупные недостатки, нефелометры имеют преимущество, весьма ценное для практики, а именно: они дают возможность определять прозрачность воздуха без использования удаленных объектов или огней, необходимых при других методах определения прозрачности атмосферы.

Глава 10

СВЕТОМАСКИРОВКА

§ 1. Общие положения. § 2. О выборе спектрального состава света при маскировке. § 3. Расчет освещения в условиях маскировки. § 4. Наружное освещение в условиях маскировки. § 5. Освещение помещений в условиях маскировки. § 6. Люминесцентные приемы светомаскировки. § 7. Маскировка фар.

§ 1. Общие положения

Ночью свет одновременно помогает человеку ориентироваться и выдает его присутствие. Поэтому в местностях, подверженных возможности нападения в той или иной его форме со стороны противника, искусственное освещение должно удовлетворять ряду специальных маскировочных требований. Действия авиации заставляют применять светомаскировку, т. е. маскировку света, не только в прифронтной полосе, но и в достаточно глубоком тылу. Объектами светомаскировки стали промышленные сооружения и целые населенные пункты, транспорт со всем его подвижным составом и сооружениями и т. п. Опыт текущей войны особенно показал, что маскировке тыла должно придаваться не меньшее значение, чем маскировке фронта.

Искусственный свет может помочь противнику обнаружить объект, распознать его и фиксировать как цель или использовать в качестве ориентира. Поэтому в условиях маскировки освещение должно быть устроено таким образом, чтобы либо вообще не обнаруживаться противником, либо создавать у него неправильное представление. Так, например, в ряде случаев целесообразно полностью замаскировать освещенный реальный объект и придать ложному объекту вид плохо замаскированного.

Еще в войну 1914—1918 гг. путем создания ложных объектов и ложных световых точек делались попытки затруднить ориентацию противника и тем самым проведение прицельного бомбометания. Грандиозным примером такого мероприятия явилось создание в 1918 г. ложного Парижа, правда не завершенное в связи с окончанием войны.

Световая дезориентация противника может являться ценным дополнением к приему затемнения основных огней. Так, например, Дикерсон (США) предложил в 1941 г. следующий прием ночной маскировки больших городов. Город разбивается на ряд правильных квадратов и в каждом из них устанавливается направленный в небо прожектор заливающего света (рис. 289). Такие клетки должны охватывать не только реальные черты города, но и прилегающие к нему окрестности. Прожекторы должны быть расположены не только на суше, но и на



Рис. 289. Маскировка города

пересекающих город водных артериях, где они могут быть установлены на плотках. Электрическая сеть должна иметь такую схему коммутации, которая позволяет включать прожекторы на отдельных квадратах в любом их сочетании. Геометрически правильная, но не соответствующая облику города, картина световых пятен, по мнению автора предложения, собьет летчика с толку и позволит к тому же сохранить в городе слабое искусственное освещение.

Следует иметь в виду, что, исключая самые темные ночи, природное ночное освещение позволяет летчику ориентироваться над местностью даже при полном ее затемнении. Луного освещения достаточно даже для прицельного бомбометания. Почти всегда видны водные поверхности, массивы лесов, дороги и т. п.

Переход к природной темноте через устранение всякого искусственного света снаружи не всегда может быть в полной мере осуществлен даже в местностях, находящихся под прямой угрозой нападения противника. Нужно создавать освещение, предъявляя к нему два противоречащих друг другу требования: необнаруживаемость освещения противником и возможность выполнения необходимых операций. Принципиальная совместимость этих требований определяется тем фактом, что лица, для которых создан осветительный эффект, пользуются им, находясь на сравнительно малом расстоянии от источников света и освещенных объек-

тов, в то время как противник находится на определенном удалении. Световой эффект с увеличением расстояния убывает и должен быть для дистанции наблюдения, минимального расстояния возможного нахождения противника, под порогом зрительного восприятия.

Выбор минимальной возможной дистанции нахождения противника определяется чисто тактическими заданиями, связанными, в частности, с постановкой службы наблюдения, оповещения и связи и со всей организацией активной и пассивной обороны. В большинстве стран к освещению, действующему во время режима воздушной тревоги, предъявляется требование, чтобы оно было невидимо с самолета, находящегося на высоте 500 м непосредственно над объектом. Значения предельно допустимой дальности обнаружения освещения при режиме угрожаемого положения принимаются весьма различными, а именно от 10 до 70 км. Они могут считаться неодинаковыми для населенных пунктов в ближнем и дальнем тылу.

§ 2. О выборе спектрального состава света при маскировке

При проведении и регламентировании в государственном масштабе светомаскировочных мероприятий прежде всего возникает существенный вопрос о выборе цвета маскировочного освещения, или, говоря точнее, спектрального состава этого света. По этому вопросу пока еще нет единой точки зрения среди ученых, нет ее и в светомаскировочной политике, проводимой различными государствами. Военно-морской флот США использовал в войну 1914—1918 гг. синий свет. В годы, предшествовавшие текущей войне, синий свет для целей светомаскировки был узаконен в целом ряде стран. Ему почти придавалось чудодейственное свойство не быть видимым противнику. Практика применения синих маскировочных ламп, однако, показала, что маскировочное их действие в основном обусловлено не тем, что они излучают синий свет, а тем, что они излучают очень мало света, поскольку большая часть светового потока от нити накала поглощается в колбе лампы. В нашей стране сначала наравне с синими маскировочными лампами (марка „СМ“), а затем и вытесняя их, получили распространение белые маскировочные лампы (марка „БМ“). Эти лампы отличаются от нормальных осветительных ламп меньшей площадью и более низкой температурой нити накала, а следовательно, и значительно меньшим световым потоком. Цвет излучаемого ими света можно считать желтым. Белый свет для целей светомаскировки применяют в настоящее время Англия и США. Германия с конца 1940 г. использует для целей светомаскировки как белый свет, так и синий в специально оговоренных случаях.

При рассмотрении вопроса о выборе спектрального состава света нужно учитывать как военно-организационные и инженерно-экономические соображения, так и оптические данные: спектральный состав света должен быть таков, чтобы свет, создавая наилучшие возможные условия видения для пользующихся им лиц, был предельно трудно выявляем удаленным противником.

При решении вопроса прежде всего необходимо учитывать существование явления Пуркинье (см. выше III, гл. 7, § 12), заключающегося в перемещении по спектру кривой чувствительности глаза при переходе из области высоких яркостей в область низких яркостей (дневная и сумеречная кривая).

Явление Пуркинье не играет роли в том случае, если светомаскировочное освещение очень слабое и предназначено не для производства работ, а для общей ориентации на земле, поскольку оно в этом случае равно сказывается и для лиц, пользующихся освещением, и для противника. Однако если интенсивно освещается малая площадь для производства в ее пределах зрительной работы, то учет явления Пуркинье сразу показывает, что применять в этом случае синий свет невыгодно. Наиболее выгодным на первый взгляд представляется в этом случае выбор красного света. Нужно, однако, помнить, что искусственное освещение накладывается на всегда имеющееся природное освещение. Земной ландшафт, при наличии различаемых деталей, всегда виден. Все то, что искусственно вносится в природу и вместе с тем должно быть сокрыто, никак не должно от

нее резко отличаться, как отличались бы даже слабые красные световые пятна в естественной голубой дымке сумерек и ночи.

К тому же имеется еще один весьма важный и подлежащий учету фактор, а именно прозрачность атмосферы. На пути от освещенного участка земли до противника происходит, вследствие наличия атмосферы, ослабление света (см. выше III, гл. 9). Количество рассеянного света по закону Рэлея возрастает с уменьшением длины волны. Факт худшего проникновения через атмосферу синих лучей по сравнению с лучами других участков видимого спектра обычно и является основным аргументом в пользу синего света со стороны его приверженцев. Однако это обстоятельство далеко не во всех случаях является решающим: при малых дистанциях до противника различие в пропускании света не играет никакой роли. К тому же следует учитывать, что основная доля потерь света приходится не на поглощение, а на рассеяние, и что рассеянный свет, в виде световой дымки, при наличии многих источников света, также может быть выявлен противником. Все же следует считать, с учетом всех обстоятельств, что атмосферный фактор говорит в защиту синего света как более легко маскируемого.

Из всего сказанного вытекает, что выбор спектрального состава не играет решающей роли в проведении светомаскировочных мероприятий. Для локализованного освещения мест работы следует отдавать предпочтение белому свету. Для общего слабого освещения, предназначенного лишь для обеспечения ориентации, с успехом может быть использован также синий свет.

§ 3. Расчет освещения в условиях маскировки

Перейдем теперь к рассмотрению вопроса о допустимых в условиях маскировки значениях силы света источников и яркости освещенных ими поверхностей.

При ориентировочных расчетах можно исходить из результатов тех многочисленных исследований в области физиологии зрения и фотометрии, которые относятся к определению так называемых пороговых значений фотометрических величин. Это — такие значения этих величин, которые соответствуют порогу зрительного восприятия.

В простейшем и наиболее схематизированном виде задача может быть формулирована следующим образом: какую максимальную яркость может иметь световое пятно заданных угловых размеров, чтобы его нельзя было обнаружить на окружающем его более темном фоне заданной яркости. Результативные средние данные соответствующих опытов иллюстрируются рис. 290а. Эти данные относятся к белому свету и наблюдению невооруженным глазом, полностью адаптированным к соответствующему уровню яркости. На чертеже по горизонтальной оси в логарифмической шкале отложены значения выраженного в минутах угла, под которым виден диаметр круглого светового пятна. По вертикальной оси, также в логарифмической шкале, дана пороговая яркость (в апостильбах), которая необходима при заданном угловом размере пятна для того, чтобы его увидеть.

На чертеже дано семейство из четырех кривых, соответственно различным значениям яркости фона, при которых проводились опыты.

С увеличением углового размера светового пятна пороговые значения яркости падают; кривые стремятся идти горизонтально, иначе говоря, видимость протяженных световых пятен всецело определяется их яркостью и почти не зависит от их углового размера, если он превышает несколько градусов.

При малых угловых размерах светового пятна кривые на рис. 290а приближаются достаточно хорошо к параллельным между собой прямым, причем наклон этих прямых таков: при увеличении углового размера в десять раз минимальное значение яркости, соответствующее порогу различения, уменьшается в сто раз. Это значит, что в этой области порог зрительного восприятия определяется произведением из яркости пятна на квадрат его углового размера (закон Ринко). При несколько больших угловых размерах можно в качестве первого приближения принимать постоянным произведение из яркости пятна на его угловой размер (закон Пипера).

Те же самые зависимости, но в несколько ином виде, изображены на рис. 290б. На этом графике горизонтальная шкала попрежнему соответствует логарифмам углового размера пятна, но по вертикальной оси отложены вместо логарифмов пороговой яркости пятна логарифмы порогового значения освещенности (в люксах), создаваемой пятном в точке наблюдения. Кривые соответствуют тем же яркостям

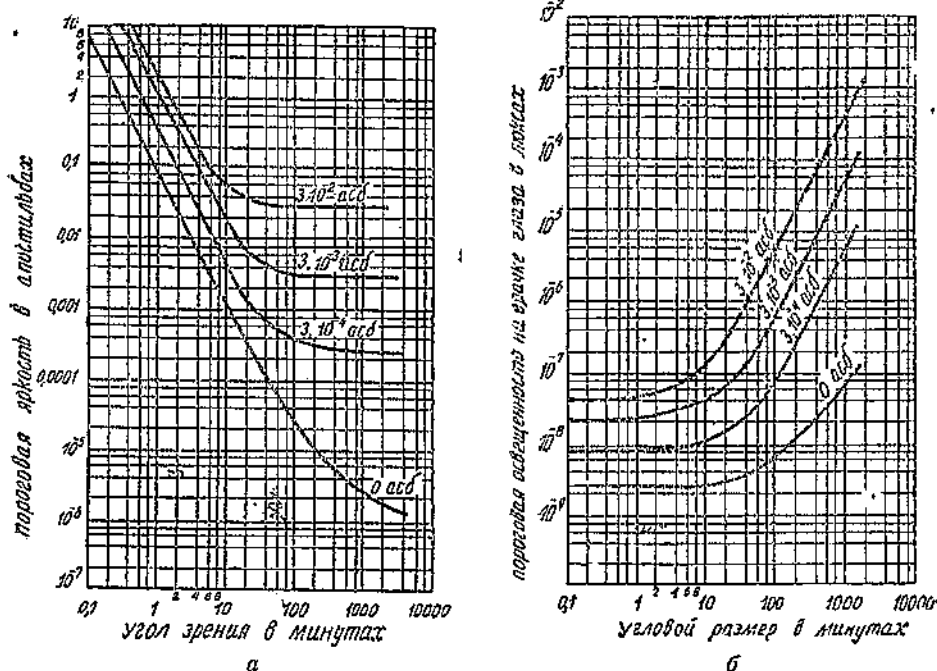


Рис. 290. Зависимость пороговой яркости от углового размера светового пятна

фона, что и на рис. 290а. Как видно из чертежа, при малых угловых размерах светового пятна видимость его всецело определяется создаваемой им освещенностью на зрачке наблюдателя. В этих случаях можно вести расчет, заменяя световое пятно эквивалентным, т. е. имеющим ту же силу света, точечным источником. Предел применимости этого приема определяется яркостью фона. В случае черного фона порог восприятия полностью определяется освещенностью от светового пятна при угловом размере пятна до $10'$. При яркости фона порядка сотых долей апостильба и больше источник света при расчетах светомаскировочного освещения уже нельзя считать точечным, если его угловой размер превышает $1'$.

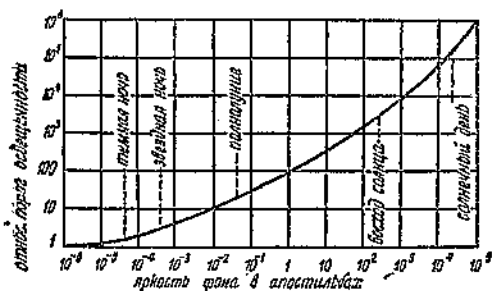


Рис. 291. Зависимость пороговой освещенности от яркости фона

фона по закону, иллюстрируемому рис. 291. На этом графике по горизонтальной оси в логарифмической шкале отложена яркость фона в апостильбах; весьма приближенно параллельно указаны условия природного освещения, при которых проявляются соответствующие яркости земного ландшафта (коэффициент отражения принят равным 20%). По вертикальной оси, также в логарифмической шкале, отложены значения относительного порога освещенности.

Из рассмотрения графика можно убедиться, что в очень темную ночь порог лишь в несколько раз больше абсолютного его значения, в то время как в лунную ночь он больше в двадцать-тридцать раз.

Наличие явления Пуркинье обуславливает зависимость пороговых значений фотометрических величин от спектрального состава света. Это иллюстрируется рис. 292, на котором изображена зависимость пороговой освещенности в люксах для точечного источника, излучающего монохроматический свет, от длин волн этого света. Ход спектральной кривой светового порога полностью определяется различием между дневной и сумеречными кривыми спектральной чувствительности глаза. Обнаружение светящей точки на пороге ее видимости обусловлено палочками (в красном конце спектра чувствительность палочек настолько мала, что она становится соизмеримой с чувствительностью колбочек), а световой порог выражен в люксах, т. е. в единицах, построенных применительно к колбочковому зрению. Поэтому световой порог, выраженный в люксах, быстро изменяется при переходе от фиолетовой части спектра к красной, возрастая почти в сто раз. Этим и объясняется, что в нормах светомаскировочного освещения предельно допускаемые освещенности для синего света берутся в несколько раз меньшими, чем для белого, поскольку последнему соответствует промежуточное и, во всяком случае, большее, чем для синего света, значение выраженного в люксах светового порога.

Практически условия наблюдения для противника, особенно воздушного, значительно более неблагоприятны и для обнаружения и для фиксирования светящей точки или светящего пятна, чем в идеализированной обстановке лабораторного эксперимента. Под самолетом расстилается освещенный природным светом неоднородный фон земного ландшафта, на нем даже в темные ночи выделяются более светлые и более темные пятна. Обнаружив пятно, более светлое, чем фон, наблюдатель может не знать, обусловлено ли это освещением, или просто большим коэффициентом отражения этого участка. Темновую адаптацию летчика нарушает также свет внутри кабины, например от шкал приборов. Движение, вибрации и качка самолета мешают наблюдению. Летные очки или окошки лимузина не идеально прозрачны и потому снижают яркость и контрастность ландшафта, к тому же они не всегда полностью защищают от ветра. Наблюдению мешает шум от винтомоторной группы. Условия наблюдения вообще тяжелые, они характеризуются общим напряженным состоянием и непрерывным отвлечением внимания. Различные условия наблюдения в лаборатории и с самолета учитывают, умножая полученные в лабораторных условиях значения на некоторый множитель, так называемый „коэффициент наблюдения“. Для этой величины различные авторы принимают различные значения. Расхождение в значительной мере обусловлено тем, что определенные авторы охватывают этим множителем различные факторы, вплоть до влияния яркости фона и прозрачности атмосферы.

Разберем вопрос о допустимых по требованиям светомаскировки значениях силы света точечных источников в различных направлениях, в которых они могут быть видны с самолета. Эти данные прежде всего необходимы потому, что каждое пятно на земле (освещенный участок земли, невзвешенное окно, светящая

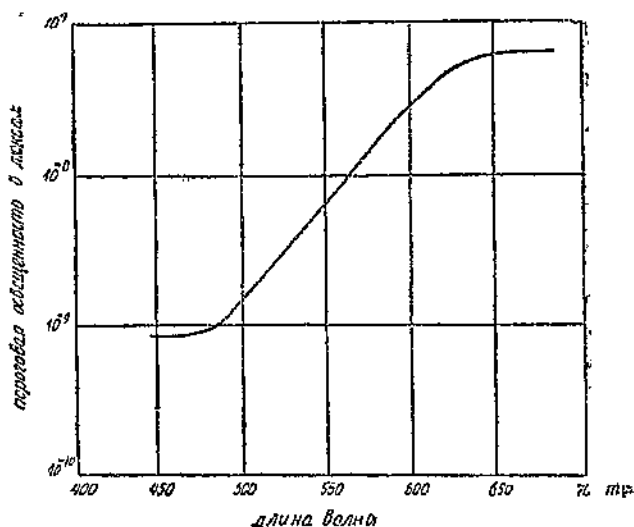


Рис. 292. Зависимость пороговой освещенности от длины волны

или освещенная вывеска и т. п.) с удаленного самолета усматривается как точка, а не как поверхность, и в этом случае светомаскировочный расчет может вестись так же, как и расчет освещенности от точечных источников. Источники света сами по себе, как, например, светильники для наружного освещения, переносные фонари, светофоры, фары автотранспорта, как правило, вообще не должны излучать вверх никакого света, но в ряде случаев необходимо считаться с возможностью его появления (например, вследствие зеркального отражения, у автофар вследствие тряски и на подъемах и т. п.).

Приняв определенные значения для пороговой освещенности ε и прозрачности атмосферы τ (коэффициента пропускания на пути в один километр), можно, исходя из формулы

$$\frac{I \cdot \tau^L}{L^2} = \varepsilon,$$

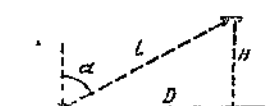
рассчитать допустимую при заданной дистанции L силу света I . Результаты расчета для $\varepsilon = 10^{-7}$ люкса $= 0,1 \frac{\text{люмен}}{\text{км}^2}$ и $\tau = 0,9$ на километр приведены в следующей таблице:

Таблица 48

L	км	0,1	0,5	1	2	5	10	30	50	70
I	свечи	0,001	0,026	0,11	0,49	4,2	29	2100	49000	780000

При больших значениях L пороговые значения силы света становятся весьма значительными. Однако их все же нельзя считать с точки зрения маскировки допустимыми, поскольку они в качестве сильных источников света, хотя прямо и не будут видны, создадут световое зарево.

Из расчета на наблюдателя на самолете, летящем на высоте H (рис. 293), допустимая сила света источника $I(\alpha)$ в некотором направлении может быть выражена как функция угла α , составляемого этим направлением с вертикалью. Для этого следует произвести подстановку



$$L = \frac{H}{\cos \alpha},$$

что приводит к соотношению

Рис. 293. Расчет допустимой силы света

$$I(\alpha) = \varepsilon \frac{H^2}{\cos^2 \alpha} \tau^{\frac{H}{\cos \alpha}}.$$

Приводим в следующей таблице результаты расчетов для $H = 500$ м и $H = 5000$ м, приняв попрежнему $\tau = 0,9$ на километр и $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-7}$ люкса.

Таблица 49

Угол с вертикалью		0°	15°	30°	45°	60°	70°	83°	85°
Сила света $I(\alpha)$ (в свечах)	$H = 500$ м	0,026	0,028	0,036	0,054	0,11	0,25	1,1	6,0
	$H = 5000$ м	4,2	4,6	6,1	11	29	100	1700	14000

Пороговое значение силы света быстро растет от зенита к горизонту, поскольку при заданной высоте самолета сильно увеличивается дистанция до него.

Считая возможным нахождение самолета противника на дистанции $D = 10$ км, что при $H = 5000$ м соответствует $\alpha \approx 60^\circ$, получаем, что с самолета уже могут быть обнаружены источники с силой света в несколько десятков свечей. Более

слабые источники, как, например, обычные карманные фонари, не опасны, почему ими обычно и позволяют пользоваться при режиме угрожаемого положения.

Характеризуя режим воздушной тревоги возможностью нахождения самолета противника над головой на высоте 500 м, приходим к выводу, что с самолета может быть обнаружен огонь с силой света в 0,03 свечи, значительно более слабый, чем горящая спичка. Подчеркнем, что при расчете было принято, что световая чувствительность летчика в сто раз ниже, чем для наблюдателя в идеальных лабораторных условиях; в отдельных случаях (например, в очень темную ночь) световая чувствительность летчика может быть и выше. Отсюда ясно, что во время воздушной тревоги нельзя разрешить даже чиркнуть спичку, а пользование обычным карманным фонарем в этих условиях может рассматриваться уже как сигнализация.

Все приведенные выше соотношения, равно как и числовые данные, могут быть использованы не только для определения допустимых сил света светильников, но и для расчета допустимого освещения снаружи и в помещениях с незашторенными светопроемами, если линейные размеры светящихся поверхностей малы по сравнению с расстоянием до самолета, т. е. если эти поверхности усматриваются как точки.

В качестве первого приближения примем, что яркость поверхности по всем направлениям одинакова, а следовательно, сила света ее изменяется пропорционально косинусу угла с нормалью (закон Ламберта). Если площадь поверхности есть S (в м^2), ее освещенность E (в люксах), коэффициент отражения ρ , то сила света ее I (в свечах) под углом θ к нормали будет равна:

$$I = \frac{\rho E \cos \theta}{\pi}.$$

По этой формуле, пользуясь приведенными выше данными для пороговой силы света, можно рассчитать допустимую освещенность.

Если диаметр освещенного пятна измеряется десятками или тем более сотнями метров, то такое пятно уже нельзя считать точечным источником света. Для выполнения расчета приходится пользоваться зависимостями пороговой яркости светового пятна от его углового размера, подобными изображенным на рис. 290 а. При этом необходимо учитывать потери света в атмосфере, природное ночное освещение, а также различие в условиях наблюдения с самолета и в лаборатории. Результаты расчетов иллюстрируются рис. 294, на котором для различных расстояний до самолета (начиная с верхней кривой — 20, 10, 5, 2, 1 и 0,5 км) даны кривые зависимости пороговой яркости наблюдаемого по нормали круглого светового пятна от его диаметра. Обе величины отложены в логарифмической шкале, чтобы охватить больший диапазон их изменения. По вертикальной левой шкале отложены значения пороговой яркости. По вертикальной шкале в правой части чертежа отложены значения допустимой освещенности, которые, будучи выражены в люксах, приняты в десять раз меньшими, чем значения яркости в апостильбах. Деление на десять примерно учитывает как потери света при отражении, так и помехи при наблюдении с самолета.

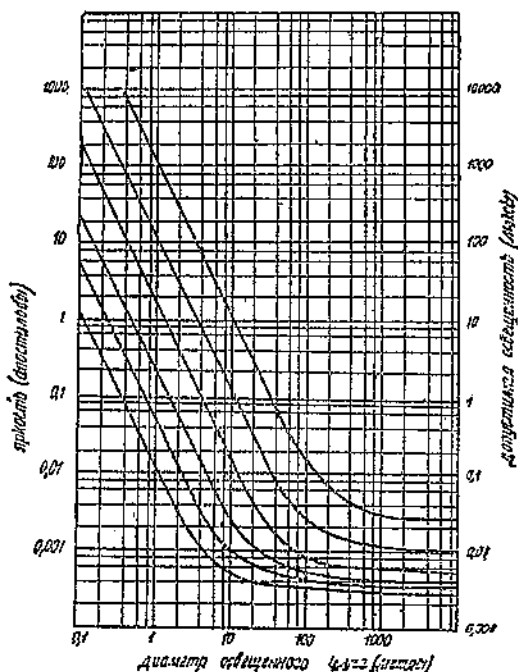


Рис. 294. Зависимость пороговой яркости светового пятна от его диаметра

Приведем несколько примеров пользования графиком.

Требуется определить порядок значений освещенности, которые можно создавать на больших площадях земли, не боясь обнаружения освещенных зон с воздуха. Необходимо определить допустимую освещенность в пределах пятна диаметром 1 и 10 м, исходя из требования невидимости с высоты 500 м. Пользуясь рис. 290, получаем соответственно значения 0,1 и 0,005 люкса.

Для пятен того же диаметра, если они не должны быть видны с расстояния в 10 км, получаем для наибольшей допустимой освещенности соответственно 100 и 1 люкс.

Требуется оценить расстояние, на котором может быть обнаружено незащитенное окно площадью 4 м², если освещенность внутри помещения 50 люкс. Заменяя окно равноплощадным кругом диаметром 2,2 м и отсчитывая 50 люкс по вертикальной шкале справа, получаем путем интерполяции, что искомое расстояние примерно равно 15 км.

§ 4. Наружное освещение в условиях маскировки

Как вытекает из данных, приведенных в предыдущем параграфе, наружное световое оборудование в условиях маскировки должно удовлетворять ряду очень жестких требований. Освещаемая площадь должна быть минимальна. Свет должен падать только туда, где он совершенно необходим. Световые устройства не должны излучать никакого прямого света вверх и вообще в тех направлениях, в которых они могут быть видны противнику прямо или после зеркального отражения. Освещенность земли и других поверхностей должна быть настолько мала, чтобы освещенные поверхности, являющиеся вторичными источниками света, посылающими свет по всем направлениям, также не были видны противнику. Чем светлее поверхности, тем меньшие значения освещенности на них могут быть допущены. Поэтому в некоторых случаях целесообразно использовать в пределах освещаемой зоны, где должна вестись работа, специальные покрытия с малыми коэффициентами отражения. Световые приборы не должны иметь никаких сколько-нибудь слепящих глаз деталей, прямая видимость нитей ламп совершенно не допустима. Соблюдение этого требования, с другой стороны, очень полезно, так как гарантирует сохранение высокого уровня чувствительности глаз к тому слабому свету, которым приходится довольствоваться в условиях светомаскировки.

В световом оборудовании военного времени, как из соображений светомаскировки, так и упрощения монтажных работ и экономии материалов, особое внимание должно уделяться световым сигнальным и указательным устройствам. Наличие светосигнальных устройств, предназначенных для регулирования движения транспорта и пешеходов, световых указателей направления к различным пунктам и их расположения, указателей входа и выхода, указателей препятствий и т. п. во многом обеспечивает ориентацию в условиях затемнения. Такие устройства, при правильном их осуществлении, могут не выключаться даже во время налета противника.

Как вытекает из всего сказанного выше, требования к светомаскировочному освещению настолько своеобразны, что для их соблюдения необходимы специальное размещение светильников и особые типы светильников, отличные от нормальных.

Вопросы светового оборудования городов в условиях общего затемнения решаются в разных государствах различно.

Общесоюзный стандарт 1941 г. на нормальное и маскировочное городское освещение разрешает для режима угрожаемого положения слабое, но все же существенное наружное освещение (освещенность земли не должна превышать 0,5 люкса при белом свете и 0,2 люкса при синем), которое выключается по сигналу „воздушная тревога“. Остаются световые указатели, те световые вежи, которые обеспечивают ориентацию по выключении освещения во время воздушной тревоги.

Иначе разрешен вопрос в Англии, где уличное освещение при угрожаемом положении настолько слабо, что оно допускается и при режиме воздушной тревоги. Для уличного освещения разрешена освещенность 0,002 люкса. Такую освещенность создает ясное, звездное небо в безлунную ночь на открытом месте. Это освещение обеспечивает пешеходам возможность ориентации, но оно совершенно недостаточно для производства снаружи работ.

Эти примеры показывают, что если для угрожаемого положения допустимо хотя и слабое освещение больших площадей, но достаточное для обеспечения движения и даже для выполнения грубых работ, то в условиях воздушной тревоги применимо лишь мало-мощное световое оборудование, предназначенное вернее не для освещения, а для сигнальных целей. Правда, следует отметить, что в порядке военного риска для проведения ночью жизненно важных, не терпящих отсрочек, работ и операций иногда, с особого разрешения, может быть допущено и такое освещение, невидимость которого противником нельзя гарантировать.

Поскольку светомаскировочные светильники должны создавать слабые освещенности и, следовательно, из них может выходить небольшой световой поток, при проектировании таких светильников обычно не стремятся к полному использованию светового потока установленных в них ламп. Коэффициент полезного действия их измеряется несколькими процентами, так как требуемые характеристики достигаются не столько перераспределением светового потока лампы, сколько различной степенью устранения его по различным направлениям. В качестве примера на рис. 295 приведена схема широкооплучающего светильника ЛВО системы ГОИ, предназначенного для создания общего слабого освещения больших площадей.

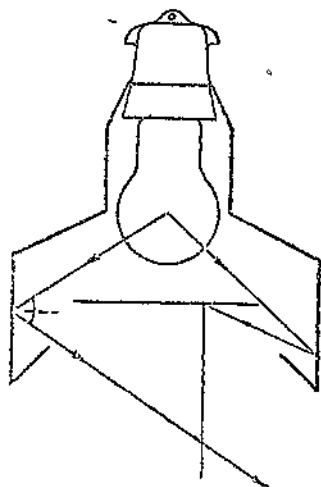


Рис. 295. Схема светильника ГОИ

§ 5. Освещение помещений в условиях маскировки

Далеко не столь просты, как это может казаться на первый взгляд, и вопросы светомаскировки помещений. Она может быть достигнута не только путем полного закрытия светопроемов (окон, фонарей верхнего света), но и другими более тонкими светотехническими средствами (понижением освещенности, изменением распределения света, сочетанием цветного освещения с цветным остеклением и т. п.). Мероприятия по светомаскировке помещений должны быть всегда полностью согласованы с системой электроснабжения и освещения этих помещений и с мероприятиями по архитектурной маскировке сооружения в целом.

Остановимся вначале на рассмотрении так называемых светотехнических приемов затемнения. В отличие от механического затемнения, при этом светопроемы наглухо не закрываются. Свет внутри помещений создается таким, чтобы, пройдя сквозь окна или двери наружу и дойдя до возможного местонахождения противника, он был настолько слабым, что оказался бы под порогом обнаружения. Внутреннее освещение, а также окраска помещения и оборудования должны быть такими, чтобы средняя яркость видимых в светопроемы внутренних поверхностей была минимальна. Как показывает расчет, средняя яркость вертикального окна (видимых в него поверхностей) площадью в 1 кв. м не должна превосходить десятых долей апостильба, чтобы обеспечить маскировку от воздушного противника, летящего на высоте 500 м. Это значит, что средняя освещенность помещения с одним таким окном, во всяком случае, не должна превосходить нескольких люксов. При столь малых допустимых ее значениях, нельзя создать достаточное для работы общее освещение помещения. Свет от источников можно направлять только на весьма ограниченные по площади рабочие места.

Поскольку требования к выходящему свету тем жестче, чем ближе он направлен к зениту, в глубину помещения, в удаленных от окон точках можно допускать несколько большие освещенности, чем вблизи окон. Прямой свет от светильников в направлении к светопроемам должен быть полностью экранирован, на светопроемы должен падать только отраженный свет.

Для уменьшения светового потока от светильников и ограничения пучков света применяют специальные лампы с малым световым потоком, понижающие напряжение устройства, переходные патроны от нормальных ламп к маломощным, светомаскировочные арматуры и светомаскировочные насадки к нормальным арматурам. Так, например, можно применять белые маскировочные лампы марки „БМ“, излучающие малые световые потоки, поскольку их нить потребляет малую мощность и к тому же работает на недокале. Синие маскировочные лампы марки „СМ“ излучают малый световой поток, потому что большая часть его поглощается колбой. С успехом могут быть использованы также неоновые лампы тлеющего разряда мощностью в несколько ватт. Выпускаются также маломощные светомаскировочные лампы, большая часть колбы которых закрашена черным лаком. Если оставлен прозрачным участок колбы лампы около макушки, такая лампа создает ограниченное по площади световое пятно для освещения участка работы или прохода. Лампы, закрашенные снизу, у которых оставлена прозрачной верхняя часть колбы, могут быть использованы для создания общего слабого освещения помещения. Такого типа лампы могут быть с успехом использованы для освещения помещений, имеющих прямой выход наружу, как-то: вестибюлей, лестниц и т. п. Эти помещения должны иметь освещение, промежуточное между освещением внутренних помещений и тем, которое имеется снаружи. Соблюдение этого требования гарантирует от непосредственного проникновения света наружу и одновременно создает благоприятные условия адаптации (приспособления глаза к изменению света) как при выходе из помещения, так и при входе в него.

В ряде случаев, как, например, в некоторых помещениях электростанций, достаточно видеть только шкалы приборов, рукоятки и штурвалы управления и т. п. Задачи светомаскировки решаются тогда весьма успешно путем покрытия отдельных поверхностей светосоставами временного действия и применения ультрафиолетового освещения. Этот прием используется и для наружного освещения, а также на боевых самолетах и кораблях; он будет рассмотрен ниже.

Задача светомаскировки помещений наиболее элементарно может быть обеспечена путем постоянного уменьшения действующей площади светопроемов. Для этого закрашивают часть застекления краской или закрывают ее наглухо щитами и ставнями. При этом ухудшается природное освещение помещений в дневные часы.

Весьма интересным с светотехнической стороны является способ запирающих светофильтров, сущность которого заключается в следующем. Одними светофильтрами снабжаются источники света для внутреннего освещения, другими — стекла светопроемов. Спектральные кривые пропускания светофильтров обоих типов выбираются таким образом, чтобы светофильтры на светопроемах пропускали внутрь помещения в достаточной мере дневной свет и запирали, т. е., по возможности, не выпускали из помещения искусственный свет. Приведем следующий пример. Нанесем на колбы ламп накаливания оранжевую пленку со спектральной кривой пропускания I , а на стекла светопроемов — зеленую пленку со спектральной кривой пропускания II (рис. 296). Оранжевые колбы ламп накаливания будут пропускать около 40% света от нитей этих ламп. Зеленые стекла окон будут пропускать внутрь помещения около 20% падающего на них дневного света. При этом при последовательном прохождении через оранжевый и зеленый светофильтры будет пропускаться лишь около 0,5% света от нитей лампы накаливания. Идеальной схемой использования способа запирающих светофильтров является применение для внутреннего освещения такого источника, излучаемая которым энергия полностью сосредоточена в весьма узком участке спектра (например, натриевых ламп) и такого стекла для светопроемов (например, дидимового), которое имеет в пределах этого участка полосу поглощения.

Основным недостатком всех светотехнических приемов является прежде всего практическая невозможность контроля за соблюдением светомаскировочных допусков. Другим недостатком является ухудшение условий освещения, в то время как война диктует необходимость увеличения производительности и качества труда, что требует улучшения освещения. Укажем в качестве иллюстрации, что средняя освещенность цехов военных заводов, построенных в США в 1941 г., согласно программе национальной обороны, составляет 300—500 люкс и что в Англии, в связи с развитием войны, нормы освещенности для оборонных заводов повышены в шесть раз.

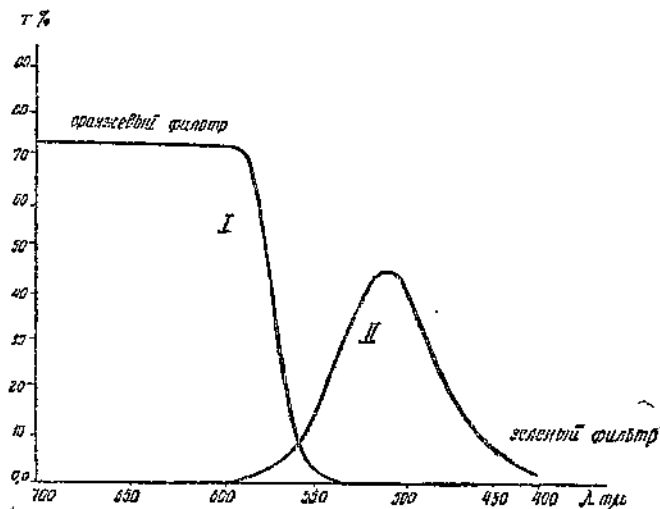


Рис. 296. Кривые пропускания запыряющих светофильтров

Основным и принципиально наилучшим способом разрешения задачи светомаскировки помещений является полное светогерметичное экранирование светопроемов в темные часы суток.

§ 6. Люминесцентные приемы светомаскировки

Существенную помощь при проведении светомаскировочных мероприятий приносит использование явлений люминесценции (так называемого „холодного света“) и в частности явления фотолюминесценции. Так называют излучение вторичного света, происходящее при поглощении падающего извне света (см. выше I, гл. 1, § 9 и II, гл. 6).

Практически длина волны вторичного света больше длины волны первичного возбуждающего света. Особенно удобным возбудителем света фотолюминесценции в видимом участке спектра является свет, сосредоточенный в невидимой ультрафиолетовой части спектра. Создавая невидимое глазом ультрафиолетовое освещение, пользуясь, как говорят, „черным светом“, можно заставить светиться все тела, которые обладают свойством фотолюминесценции. Некоторые из этих веществ будут продолжать светиться и по прекращении облучения.

Специфической особенностью явления фотолюминесценции, с чисто светотехнической точки зрения, служит возможность осуществления:

- 1) светлых поверхностей при освещении невидимым светом, оставляющим все остальные поверхности темными;
- 2) светящихся поверхностей без подвода к ним во время свечения энергии, а за счет предварительной их зарядки светом.

Первая из этих особенностей позволяет обеспечить отчетливую видимость необходимых деталей при отсутствии видимого света в окружающем их пространстве. Так, например, на самолетах иногда используется прием ультрафиолетового

освещения приборных досок. Деления шкал приборов и указатели покрыты фотолюминесцирующими веществами, которые светятся под влиянием невидимого глазом освещения.

Вторая из указанных выше особенностей позволяет получать знаки, светящиеся в темноте, после того как они зарядились на свету, при дневном или искусственном освещении. Жители многих городов за время войны хорошо оценили помощь, которую оказывают пешеходам во время затемнения светящиеся значки, заряжающиеся за время пребывания людей на свету. Явление послесвечения играет также большую роль как гарантирующее наличие световых ориентиров в случае аварии, повлекшей за собой прекращение электроснабжения.

Для возбуждения фотолюминесценции, как указывалось выше, может быть использован как естественный, так и искусственный свет, причем во всех случаях особенно важна коротковолновая (ультрафиолетовая и фиолетовая) его составляющая. Из источников искусственного света особо пригодны ртутные и маломощные аргонные лампы тлеющего разряда. Лампы накаливания значительно менее эффективно возбуждают фотолюминесценцию, поскольку основная доля излучаемой ими энергии сосредоточена в инфракрасной и красной частях спектра.

В качестве светофильтров для выделения одного ультрафиолетового света используются увиолевые черные стекла. Их называют увиолевыми потому, что они пропускают ультрафиолетовые лучи; они черные потому, что в них вводятся красители для поглощения видимых лучей. Увиолевые черные стекла устанавливают либо в светильниках, либо из них непосредственно изготовляют колбы ламп. Так, например, промышленность изготавливает ртутные лампы в колбах из черного увиолевого стекла; это в подлинном смысле источники „черного света“.

Фотолюминесцирующие вещества находят и могут находить применение при решении ряда задач светомаскировки фронта и тыла. Следует помнить, что, как правило, яркость их не настолько велика, чтобы они могли освещать окружающее пространство, но вполне достаточна, чтобы сами они были отчетливо видны.

§ 7. Маскировка фар

В литературе в официальных инструкциях по вопросам светомаскировки большое внимание уделяется всегда маскировке фар автомобильного транспорта. Этот вопрос осуществлен как для условий фронта, так и тыла. Все машины должны быть снабжены такими фарами, которые, обеспечивая требуемые условия видения при передвижении ночью, создают наименьший демаскировочный эффект.

Передвижение с нормальными фарами, как правило, не может быть допущено при режиме угрожаемого положения, а тем более воздушной тревоги, поскольку фары видны с воздуха на десятки километров. Создаваемое ими сильное освещение к тому же в условиях полного затемнения не нужно водителю, если принять во внимание его хорошую темновую адаптацию. Оно также недопустимо в интересах пешеходов и водителей встречного транспорта. Блескость фар едущего навстречу автомобиля на долгий промежуток времени сводит на-нет результаты предварительно выполненной зрительной системой работы по приспособлению к ночному природному или слабому искусственному освещению.

Всякие кустарные самодельные приспособления, вроде чехлов, одевающихся снаружи на фару, или ее закраски, нарушают прожекторное действие фар, для которого они и предназначены, и не устраняют видимости их с воздуха, т. е. оказываются несостоятельными. Опыт показывает, что при выключении освещения большого города его больше всего продолжают демаскировать производственные огни, искры от трамваев и плохо замаскированные фары. Переход от нормальной фары к маскировочной не может быть в полной мере обеспечен и таким устройством или приспособлением, которое в равной мере уменьшает силу света фары по всем направлениям. К светораспределению маскировочной фары применяются иные требования, чем для нормальной, и притом по сути дела различные для режимов угрожаемого положения и воздушной тревоги.

Чем больше скорость автомобиля, тем на большем расстоянии следует требовать возможности обнаружения препятствия. К тому же следует учитывать, что с возрастанием скорости автомобиля быстро растет его живая сила, а следовательно, и тормозное расстояние. Количество света, которое можно безопасно выпускать на землю из фары при режиме воздушной тревоги, не позволяет создать достаточно далекое освещение для обеспечения движения с нормальной скоростью. Отсюда вытекает, что свет для режима воздушной тревоги должен быть сосредоточен несколько ближе к машине, чем при режиме угрожаемого положения, а тем более чем при нормальных условиях.

Ночная видимость движущегося с выключенными фарами автомобиля в основном определяется прямым светом от фары и светом, отраженным от освещенных фарой предметов (дороги с ее обочинами, деревьев и т. п.). Для маскировки прежде всего необходимо, чтобы была исключена прямая видимость самой фары с воздуха. Так, например, расчет показывает, что для того, чтобы фара не могла быть обнаружена с самолета противника, идущего навстречу на высоте 500 м, сила света фары не должна превосходить значений, указанных в следующей таблице:

Т а б л и ц а 50

Угловое возвышение над горизонтом ($^\circ$)	3	5	10	20	30	60	90
Максимально допустимая сила света (в свечах)	25	6	1,1	0,25	0,11	0,04	0,03

Нормальная фара этим условиям совершенно не удовлетворяет, так как ее рассеиватель разбрасывает очень много света вверх. Необходимость учитывать возможность неправильной юстировки фар водителем, тряску машины и возможные уклоны дорог делает еще более жесткими светомаскировочные допуски.

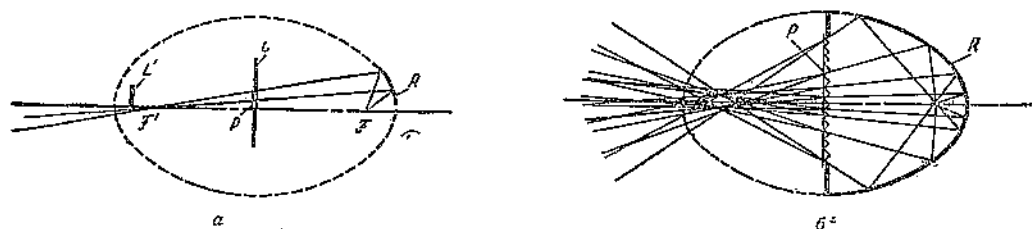


Рис. 297. Схема светомаскировочной фары

Еще труднее бороться с видимостью светового пятна от освещения фарами, т. е. достигнуть того, чтобы освещенные предметы были видны водителю и не были видны с самолета. Свет от маскировочной фары должен быть распределен особенно тщательно в смысле его экономии: он должен падать только туда, куда нужно, и только в таком количестве, которое для данного участка впереди машины совершенно необходимо.

Вопросы маскировки автомобильных фар решаются двумя путями: либо применением дополнительно к имеющимся нормальным фарам мирного времени или вместо них специально маскировочных фар, либо применением добавочных светомаскировочных устройств и приспособлений к нормальным фарам.

Светомаскировочная фара должна давать пучок света, стелящийся плоским веером несколько ниже горизонтальной плоскости. Такие фары осуществляются, например, на основании следующей принципиальной схемы, иллюстрируемой рис. 297а и б, дающим картину световых лучей в вертикальной и горизонтальной плоскости. Зеркало R фары имеет форму кольца, вырезанного из эллипсоида вращения. В фокусе F этого зеркала помещена нить лампы накаливания. Отразившись от зеркала, лучи идут ко второму фокусу F' . По пути они встречают

стеклянный рассеиватель P , одна поверхность которого — волнистая, состоит из ряда плоско-выпуклых цилиндров с вертикальной осью. Выбранная форма зеркала и рассеивателя, так же как наличие экранов L и L' , преграждающих путь побочному свету, определяют как требуемую форму пучка (узкого в вертикальной и широкого в горизонтальной плоскости), так и желательное распределение в нем света (отсутствие света вверх, падение силы света вниз по мере удаления от оси). Наличие рассеивателя обеспечивает также плавное распределение света по пятну, в частности устраняет затенение цоколем лампы, ось которой расположена горизонтально. Продольный разрез фары приведен на рис. 298. Установленный внутри машины реостат позволяет ступенями изменять накал лампы.

В Советском Союзе наиболее широкое применение получили различные типы светомаскировочных приспособлений к имеющимся фарам. На рис. 299 приведена в качестве примера фотография фары с маскировочной маской типа ЛИОТ. Через щели прорывается свет от отдельных зон рассеивателя. Внутри фары установлена,

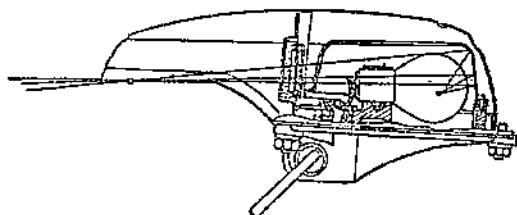


Рис. 298. Продольный разрез светомаскировочной фары



Рис. 299. Фара с маскировочной маской ЛИОТ

как обычно, двухсветная лампа, у которой могут быть включены либо одна, либо другая нить. Оставлены открытыми те участки выходного отверстия фары, которые в совокупности создают требуемое распределение света: для режима угрожаемого положения — при работе нити накала дальнего света и для режима воздушной тревоги — при накале нити ближнего света. Кроме того, для ослабления общего светового потока, по сигналу воздушной тревоги, при переключении с дальнего на ближний свет, последовательно с лампой автоматически вводится сопротивление.

При передвижении колонны машин в ряде случаев может оказываться достаточным, чтобы фарами пользовалась для освещения лишь головная машина. Следующие машины могут пользоваться световыми сигнальными устройствами, установленными сзади предыдущей машины. В целях большей маскировки световая связь может поддерживаться на невидимых лучах, в частности путем использования явления фотолюминесценции. Подобные устройства были найдены на некоторых немецких танках.

Глава 11

ПРИНЦИПЫ ВОЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МАСКИРОВКИ И ДЕМАСКИРОВКИ

Введение. § 1. Освещение и глаз. § 2. Контраст. § 3. Основные задачи оптической маскировки и демаскировки. § 4. Спектральное и фактурное изучение фонов. § 5. Камуфляж. § 6. Приемы оптической демаскировки.

Введение

Как организованная совокупность специальных мероприятий, маскировка возникла во время войны 1914—1918 гг., когда были созданы специальные войсковые части, наблюдавшие за маскировкой и поддерживавшие ее непрерывно. Познцион-

ный характер войны 1914 г., несомненно, содействовал развитию маскировки на передовых позициях. Продолжительное пребывание войск на одном месте позволяло тщательно заботиться о том, чтобы закрыть от наблюдателя пути снабжения, места укрытия пулеметов, посты наблюдения и т. п. При этом основное внимание уделялось наземному наблюдателю.

В настоящее время моторизованная армия обладает несравненно большей подвижностью, несравненно большей проникающей силой. Линия фронта представляет собой часто узкую полосу, насыщенную современными активными и вспомогательными средствами войны.

Наземная разведка дополняется воздушной разведкой, глазам наблюдателя становятся доступны огромные площади, и сам наблюдатель может проникать на самолете на громадные расстояния вглубь неприятельской территории.

Широкое применение аэрофоторазведки позволяет фиксировать результаты наблюдений на фотопленку и в дальнейшем внимательно, с лупой в руках, в спокойной обстановке обследовать фотоснимок и заметить все демаскирующие признаки того или иного объекта. При этом фотоснимок может быть выполнен в невидимых инфракрасных или ультрафиолетовых лучах. Такие снимки позволяют выявить то, что простым глазом ни при каких обстоятельствах нельзя было бы заметить.

Изменились характер и приемы войны и вместе с ними, несомненно, изменяются и способы маскировки, как одного из элементов военно-инженерной техники.

Но маскировка не только не потеряла своего значения, а сделалась необходимой в значительно большей степени. Расширились площади, на которых необходимо проводить маскировочные мероприятия.

Военно-инженерная маскировка, выполненная в соответствии с требованиями современного уровня оптических знаний, требует определенного количества числовых данных и некоторой суммы знаний. Расчеты должны производиться с учетом целого ряда обстоятельств. Важнейшими среди них являются следующие:

1. В каких условиях должны действовать рассчитываемые маскировочные установки — днем, вечером, ночью. В некоторых случаях дневные налеты авиации практически отпадают, и тогда требования, предъявляемые к данной установке, должны быть существенно отличны от требований, предъявляемых в случае, если маскировка должна действовать также и днем.

2. С каких расстояний должно сказываться действие маскировки. Если это расстояние измеряется сотнями или десятками метров, то требования должны быть одни, если это десятки километров, то требования совсем иные.

3. Против какого вида оптического прибора рассчитывается установка. Если имеется в виду глаз наблюдателя, то требования эти не будут касаться невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучей. Если предполагается возможность применения фотографического аппарата, то эти лучи не могут быть оставлены без внимания. Для многих подвижных объектов, по понятным причинам, фотография не является опасным противником, и потому их маскировка может отличаться от маскировки неподвижных объектов.

Расчет маскировочной установки должен учитывать возможные методы демаскировки и их чувствительность. В связи с этим стоит один из наиболее трудных вопросов — каким требованиям должен удовлетворять тот или иной маскировочный материал.

Для составления технических условий на маскировочный материал необходимо знать свойства того фона, которые он должен имитировать. Если речь идет об оптических свойствах, а они будут важнейшими, то прежде всего потребуются изучить спектрофотометрические свойства фона, т. е. установить, какую часть падающего света он отражает в различных длинах волн. Другой вопрос касается того, как распределится отраженный от фона свет по различным направлениям в пространстве. В отношении этих так называемых фактурных свойств, маскировочный материал также должен в какой-то мере воспроизводить фон.

Так как полное тождество в свойствах фона и маскировочного материала, как

правило, невозможно, а часто и не нужно, то вопрос о допустимой степени расхождения будет одним из важнейших.

Перечисленная совокупность сведений и знаний составляет примерный объем оптики в инженерной маскировке.

Не имея возможности остановиться здесь более подробно на различных сторонах общей задачи, тем более, что часть из них подлежит еще исследованию, мы дадим в дальнейшем только самый краткий обзор затронутых вопросов.

§ 1. Освещение и глаз

Естественное освещение. Основным источником естественного освещения является солнце. Как всякое излучение, дневной свет может быть характеризован, во-первых, общей мощностью излучения, во-вторых, спектральным составом и, в-третьих, пространственным распределением.

Мощность солнечного излучения характеризуется так называемой солнечной постоянной, которая определяет энергетическую освещенность на поверхности, находящейся за пределами земной атмосферы и расположенной перпендикулярно к солнечным лучам. Солнечная постоянная несколько колеблется вместе с изменением расстояния от земли до солнца и равна в среднем 1,9 малой калории на 1 см² в минуту. Это соответствует, примерно, 1,3 киловатта на 1 м².

Спектральный состав солнечного излучения обычно считают совпадающим с составом излучения абсолютно черного тела при температуре 6000° К. Наибольшей интенсивности это излучение достигает для длины волн около 500 мμ и падает как в сторону длинных, так и в сторону коротких длин волн. В последнем случае скорость падения интенсивности много больше. Своего половинного значения интенсивность достигает при 370 мμ, в то время как в области длинных волн только при 800 мμ*.

Для нас интересно знать то излучение, которое, пройдя через атмосферу, достигает земной поверхности. Влияние атмосферы сказывается на всех трех характеристиках солнечного излучения.

Во-первых, атмосфера поглощает и отражает часть падающей на нее солнечной радиации и таким образом уменьшает общую энергетическую освещенность на площадке, перпендикулярной к лучам и расположенной на поверхности земли.

При средней высоте солнца (30°) и чистой атмосфере вместо $1,9 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2/\text{мин}}$ мы имеем на площадке уже $1,25 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2/\text{мин}}$.

Во-вторых, атмосфера по-разному поглощает и рассеивает излучение разных длин волн, вследствие чего спектральный состав излучения изменяется. Коротковолновые лучи видимого спектра, т. е. фиолетовые и синие, ослабляются атмосферой сильнее, чем зеленые и красные, вследствие чего максимум интенсивности в прямых солнечных лучах перемещается в сторону более длинных волн, что особенно резко заметно при малых высотах солнца над горизонтом. Невидимые лучи претерпевают еще более значительные изменения. Небольшие количества озона, присутствующие в верхних слоях атмосферы, нацело поглощают все лучи короче 290 мμ, которые до земли совсем не доходят. Водяные пары, также всегда имеющиеся в атмосфере, сильнее всего сказываются на инфракрасной части спектра, где они поглощают заметную часть энергии, превращая ее в тепло.

В-третьих, влияние атмосферы сказывается на пространственном распределении света. К прямым лучам, существующим вне пределов атмосферы, на поверхности земли примешивается значительная часть рассеянного света, смягчающая все тени даже в ясный безоблачный день и уничтожающая их в облачный, пасмурный день.

Рассеянный свет ясного неба имеет, как известно, сине-голубой цвет, проис-

* Кривая распределения энергии солнечного излучения на поверхности земли приведена ниже в гл. 13, § 2, рис. 352.

ходящий от того, что коротковолновые фиолетовые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем зеленые, и значительно сильнее, чем красные.

Таковы светорассеивающие свойства молекул газов, входящих в состав атмосферы.

Мелкие частицы дыма, пыли, всегда имеющиеся в нижних слоях атмосферы, также рассеивают свет, но при этом в одинаковой мере как синие, так и красные лучи. Белые облака, покрывающие небосвод, в разной мере изменяют рассеянный свет как количественно, так и качественно.

Количественно дневной свет меняется в зависимости от времени дня и года.

Максимальная освещенность от прямых солнечных лучей, падающих перпендикулярно на поверхность, составляет около 100 000 люкс. Рассеянный свет безоблачного неба создает в летние месяцы в наших широтах освещенность на горизонтальной поверхности, доходящую до 10 000—15 000 люкс. Присутствие облаков в большинстве случаев увеличивает освещенность от рассеянного света, которая может достигать до 50 000—60 000 люкс. Густая и низкая облачность может, конечно, понизить освещенность (см. также IV, гл. 13, § 2). С уменьшением высоты солнца дневное освещение плавно переходит в сумеречное и ночное. Положению солнца на горизонте соответствует около 500 люкс на горизонтальной поверхности. В осенне-зимние месяцы на широте Ленинграда через час после захода солнца освещенность падает до 1 люкса.

Ночная освещенность зависит прежде всего от фазы луны. В полнолуние при чистом небе освещенность составляет около 0,2 люкса. Так же как и днем, облака могут по-разному влиять на освещенность. В ясную безлунную ночь освещенность составляет $1-2 \cdot 10^{-3}$ люкс, а в облачную погоду может упасть до $2-3 \cdot 10^{-4}$ люкс (см. также III, гл. 8, § 1).

Искусственное освещение. Совершенно понятно, что естественные ночные освещенности часто оказываются недостаточными. Поэтому военная техника уже давно пользуется такими мощными источниками света, как прожекторы (см. том II, XII, гл. 30 и 31), которые позволяют повысить освещенность хотя и на малой площади, но зато находящейся на большом расстоянии. Современные 1,5- и 2-метровые прожекторы имеют в качестве источника света интенсивную вольтовую дугу, кратер которой помещается в фокусе параболического отражателя. Световой пучок такого прожектора имеет угол расхождения в $1-2^\circ$ и силу света в 1—2 миллиарда свечей. Освещенность, создаваемая таким прожектором на расстоянии в 5 км, составляет 15—25 люкс при средней прозрачности атмосферы в 0,8 на километр, а на расстоянии в 10 км — 1—2 люкса при тех же атмосферных условиях.

Появившиеся в последнее время светящиеся авиабомбы (так называемые САБы) представляют собой другой вид мощного источника света, применяемого в основном для освещения целей при наблюдении с самолета. Сбрасываемые на парашюте над целью и повисающие в воздухе, САБы позволяют вести прицельное бомбометание. Факел такой светящейся бомбы представляет собой прессованную смесь порошков азотнокислого натрия, алюминия, сплава алюминия, магния и некоторого количества серы, цементированную небольшой добавкой веретенного масла. Сгорая в течение 3—4 мин. в потоке воздуха, САБы развивают силу света от 0,5 до 1 миллиона свечей и освещают поверхность земли площадью 4—5 км² при высоте горения около 1 км. При этом на поверхности земли создается освещенность в 1,0 люкса, что уже достаточно для прицеливания.

§ 2. Контраст

Естественный дневной свет и искусственный, применяемый в темное время суток, представляют собой ту или иную совокупность видимых, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей, которые в разных случаях и по-разному могут быть применены для наблюдения. Возможность наблюдения влечет за собой необходимость маскировки, а приемы маскировки ставят, в свою очередь, в порядок дня вопросы демаскировки. Рассматривая в дальнейшем оптические задачи, возникаю-

щие при маскировке и демаскировке, мы постоянно будем иметь в виду перечисленную выше совокупность видимых и невидимых излучений, которые могут служить для получения оптического изображения. Практически наиболее существенным среди всех оптических приборов будет все же оставаться человеческий глаз, как самый распространенный. Соответственно этому среди всех источников естественный свет солнца и неба будет играть наиболее существенную роль.

Однако какой бы мы ни взяли прибор, служащий для получения оптического изображения, — глаз, фотографический аппарат или любой другой, использующий произвольный участок видимого или невидимого спектра, — всякий будет обладать некоторыми предельными свойствами. Для всякого прибора (как и для глаза) существует некоторый предельно малый угол, под которым прибор может отличить две светящиеся точки от одной, различить чередование белых и черных полос или другие мелкие детали. Существует некоторый минимальный угол, характеризующий так называемую «разрешающую способность» прибора. Для среднего глаза этот угол считается равным $1'$, для фотографического аппарата он зависит не только от свойства объектива, но и от свойств применяемого светочувствительного слоя.

Совершенно естественное стремление рассмотреть объекты, находящиеся на больших расстояниях, наталкивается на разрешающую способность применяемых для наблюдения приборов. В случае глаза повышение разрешающей способности (т. е. уменьшение предельного угла) может быть достигнуто за счет бинокля, стереотрубы, перископа или другого наблюдательного прибора с увеличением. Такие приборы представляют собой первое и самое естественное оптическое средство для демаскировки. Аналогичные приемы применимы и для фотографирования. С этой целью применяются фотоаппараты с телеобъективами, с увеличенными фокусными расстояниями.

Применяя наблюдательные приборы с увеличением или фотообъективы с большим фокусным расстоянием, мы уменьшаем предельный угол и получаем возможность обнаружить и рассмотреть более удаленные предметы.

Однако объект не обязательно должен иметь исчезающе малые угловые размеры для того, чтобы его невозможно было обнаружить. Объект может быть замаскирован, т. е. он может ничем не выделяться на окружающем его фоне, не создавать никаких контрастов, и тогда его обнаружение оптическими средствами делается невозможным. Это относится не только к глазу, но и к любому другому прибору, использующему оптическое изображение в любой части спектра.

Таким образом контраст, образуемый объектом и фоном, понимаемый в наиболее широком смысле, является для маскировки и демаскировки фактором не менее, если не более, существенным, чем угловые размеры объекта.

Различаются следующие виды оптического контраста:

1) Контраст яркостный, связанный с различием в количестве лучистой энергии, отражаемой объектом и фоном.

2) Контраст, связанный с различием в спектральном составе лучистой энергии, отражаемой объектом и фоном. Этот контраст называют качественным, или цветовым.

Подробное рассмотрение условий, от которых зависит так называемый порог контрастной чувствительности глаза, дано выше (III, гл. 7, § 13; III, гл. 10, § 3); отметим только разновидность яркостного контраста — контраст, происходящий из-за различия в так называемых фактурных свойствах объекта и фона. Действительно, нетрудно представить себе такой случай, когда количества света (светимости), отражаемого объектом и фоном, совершенно одинаковы и составы их не отличаются один от другого, но распределение их в пространстве расходится столь значительно, что может служить причиной возникновения оптического контраста и достаточно для обнаружения присутствия объекта. Рассмотрим, например, случай, когда ровная поверхность взлетно-посадочной полосы аэродрома должна быть скрыта на фоне зеленого луга. Предположим, что маскировщик подобрал хорошую зеленую краску, которая отражает дневной свет в том же количестве и такого же качества, как и окружающий фон луга, т. е. дал покры-

тие полосы, удовлетворительное как по величине общего коэффициента отражения, так и по его спектральным свойствам. И тем не менее взлетная площадка аэродрома может оказаться видимой в том случае, например, когда маскировочное покрытие блестит при наблюдении с больших расстояний, а окружающий дуг остается темным. При различии в фактурных свойствах замаскированный объект может выявиться либо как более яркий на темном фоне или при другой обстановке (например, при другом положении солнца) как более темный на светлом фоне. Так как наблюдение ведется всегда в каком-нибудь одном направлении, то маскировщик не может удовлетвориться знанием общего коэффициента отражения света во все стороны, но должен интересоваться также и его распределением в пространстве, связанным с характером поверхности или с ее фактурой. Такую возможность демаскировки не следует упускать из виду при разработке маскировочных мероприятий того или иного объекта.

В окружающей нас обстановке, так же как и в природе, мы редко сталкиваемся со случаями чисто яркостного контраста. Происходит это потому, что спектральные коэффициенты отражения предметов редко совпадают для объекта и фона даже в пределах видимого спектра. Различные коэффициенты отражения для объекта и фона в пределах видимого спектра обычно влечет за собой различие в цветах, и контраст, позволяющий видеть предмет, переходит в разряд цветовых контрастов. Однако если чисто яркостный контраст (при полной одинаковости цветов) является редкостью среди обычно наблюдаемых контрастов, то чисто цветовой контраст, не сопровождаемый разницей в яркостях, встречается, вероятно, еще реже. Громадное большинство наблюдаемых нами контрастов являются смешанными, при которых объект отличается от фона как по яркости, так и по цвету. В чистом виде цветовой контраст оказывается значительно сложнее, чем контраст яркостный. Вследствие этого, простого математического выражения для меры цветового контраста, подобного выражению для контраста яркостного, в настоящее время не существует.

Трудность задачи определяется следующими факторами. Во-первых, для характеристики цветности поверхности не достаточно одной величины, как в случае яркости, но требуются две, и, во-вторых, пороговая чувствительность глаза к изменению цвета оказывается весьма сложной и не может еще считаться изученной.

Можно, однако, ожидать, что общий характер зависимости видимости объектов для цветовых контрастов будет тот же, что и для контрастов яркостных. Следует иметь в виду, что при низких уровнях яркости поля, соответствующих, например, летнему ландшафту после конца сумерек, глаз вообще перестает различать цвета, так как цветочувствительные колбочки уже перестают работать. В этих условиях все цветовые контрасты исчезают и автоматически переходят в яркостные.

Одним из наиболее распространенных видов естественного контраста является теневой контраст, выявляющийся особенно резко в ясный солнечный день. Тени являются одним из самых сильных демаскирующих признаков всякого возвышающегося над землей предмета, особенно для воздушного наблюдателя.

Теневой контраст создается, во-первых, между освещенным солнцем объектом и его тенью и оказывается особенно резким в том случае, если коэффициент отражения объекта больше, чем коэффициент отражения окружающего фона.

Во-вторых, теневой контраст образуется между общим, освещенным солнцем фоном и его затененной частью. Этот контраст имеет место даже в том случае, когда сам объект полностью замаскирован и никак от фона не отличается. Теневой контраст является, в первую очередь, яркостным контрастом, что понятно из самых элементарных соображений, однако он является в некоторой мере и цветовым.

Действительно, обращаясь ко второму из указанных выше случаев, т. е. к случаю, когда сам объект полностью сливается с окружающим фоном, мы должны отметить следующее: общий фон освещается прямыми лучами солнца и светом, рассеянным небом и облаками. Часть фона, находящаяся в тени, освещается только частью небосвода, так как прямые лучи солнца и свет от другой части неба экранируются отбрасывающей тень объектом. Из этого уже видно,

что спектральный состав света, падающий на весь фон и его затененную часть, будет различен, так как состав излучения солнца резко отличается от состава света, рассеянного небом. Преобладание в свете неба синих лучей приведет к тому, что тени также окажутся более синими, чем освещенные части картины, — они будут казаться более желтыми.

Однако значительное различие в яркостях освещенных и не освещенных солнцем частей фона мешает заметить разницу в цвете, вследствие чего голубая окраска теней в большинстве случаев остается незамеченной.

§ 3. Основные задачи оптической маскировки и демаскировки

Основная задача оптической маскировки заключается в том, чтобы, по возможности, уменьшить контрасты между объектом и окружающим его фоном и добиться невидимости или, по крайней мере, незаметности объекта. Напротив, основная задача оптической демаскировки заключается в том, чтобы увеличить контрасты между неизвестным замаскированным объектом и окружающим его фоном с тем, чтобы вылить его присутствие.

Следует отметить разницу между невидимостью и незаметностью объекта. Для того, чтобы предмет был полностью невидим, необходимо, чтобы при заданных условиях освещения угловые размеры предмета и контраст, образуемый им с фоном, не давали возможность его увидеть, даже если наблюдателю известно, что объект имеется в поле зрения. А так как часто приходится считаться с возможностью применения оптических приборов с большим увеличением, то естественно, что основным способом достижения невидимости объекта делается уменьшение контрастов до порога чувствительности глаза.

Таким образом, для полной невидимости нужно предъявить очень жесткие требования к совпадению оптических свойств объекта и фона. Но для незаметности объекта выполнение таких требований в большинстве случаев вовсе не обязательно. Дело в том, что естественные фоны редко бывают ровными, без заметных колебаний яркости и цвета; обычно фон представляет собой ряд естественных контрастов — яркостных и цветовых. Пятна этих контрастов имеют в какой-то мере общую форму, характерную для данной местности. При этих условиях для незаметности маскируемого объекта будет совершенно достаточно, если характер контрастов, которые он внесет своим присутствием в поле зрения наблюдателя, будет соответствовать характеру контрастов уже существующих. Так сформулированное требование незаметности уже не потребует такой высокой точности в подгонке свойств объекта к свойствам фона, как это было нужно для полной его невидимости (например, яркостный контраст меньше $2^0/0$), и потому будет легче осуществимо.

Какова величина контраста, допустимая для соблюдения требования незаметности объекта, сказать трудно. В разных случаях эта величина будет, конечно, меняться. В первом приближении можно положить, что порог незаметности будет раз в пять-десять выше порога невидимости, т. е. будет составлять около $10—20^0/0$.*

Очевидно, что и для различия в цветностях объекта и фона требование незаметности будет не так жестко, как требование невидимости, но какова величина допустимого различия — указать сейчас невозможно.

Соображения, касающиеся яркостного и цветового контраста, были изложены в предположении, что приемником лучистой энергии является невооруженный глаз. Но в настоящее время это далеко не единственный приемник, с которым приходится считаться маскировщику. Для целой демаскировки могут быть применены и применяются фотосъемка, работающая в видимых инфракрасных и ультрафиолетовых лучах, цветная фотосъемка и некоторые другие виды приборов, использующие оптическое изображение, полученное в инфракрасных и ультрафиолетовых

* Этой величиной пользуются в настоящее время маскировщики, как это видно, например, из книги „Маскировка“ [89], стр. 16.

лучах*. Кроме того, и глаз может быть снабжен тем или другим светофильтром, меняющим как яркостные, так и цветовые соотношения между наблюдаемыми объектами.

Необходимо, однако, иметь в виду, что какой бы оптический прибор ни применялся, в конечном итоге наблюдение ведется глазом, и все сказанное относительно него сохраняет свое значение и для результатов, которые может дать тот или другой прибор. Так, например, выполненная в любых лучах (видимых или невидимых) обычная, т. е. не цветная фотография, выявляет только те детали, которые могут быть замечены на ней глазом и которые, следовательно, должны образовывать яркостный контраст не меньше $2^0/0$, а для заметности предмета — контраст порядка 10—20 $^0/0$.

Далее, совершенно ясно, что для того, чтобы каким бы то ни было способом выявить скрытый от нормального глаза контраст, т. е. обнаружить замаскированный объект, совершенно необходимо, чтобы излучения, испускаемые объектом и фоном, были различны. Иначе никакой светочувствительный слой и никакой светофильтр не дадут возможности обнаружить его присутствие.

Отсюда совершенно очевидны главные задачи маскировщика и демаскировщика. Первый будет стремиться подобрать покрытие объекта таким образом, чтобы его коэффициент отражения по всему спектру совпадал с коэффициентами отражения фона. Так как условия их освещения одинаковы, то этого будет достаточно для равенства испускаемых ими лучистых потоков. Демаскировщик будет стараться использовать неизбежные во многих случаях расхождения в оптических свойствах объекта и фона (в какой-нибудь части спектра) для его обнаружения. При этом, говоря о всем спектре, мы должны иметь в виду лучи не только видимые, но и близкие ультрафиолетовые (до 300 $m\mu$) и инфракрасные (примерно, до 1000 $m\mu$).

§ 4. Спектральное и фактурное изучение фонов

Мы видели, что основным приемом оптической маскировки надо признать уменьшение контраста между объектом и фоном. Если маскировщику удастся подогнать спектральные и фактурные свойства маскировочного материала достаточно близко к свойствам фона, задача может считаться в основном решенной. Однако для подгонки свойств маскировочного материала, в первую очередь, необходимо знать, к чему же их надо подгонять, т. е. необходимо изучить спектральные и фактурные свойства различных фонов.

Для изучения спектральных свойств натуральных фонов (летних, зимних, осенних) и маскировочных покрытий в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра применяют объективные и визуальные спектрофотометры разнообразных конструкций.

Приводимые ниже спектральные кривые получены в Государственном оптическом институте на специальных объективных спектрофотометрических установках***.

Отражение естественных земных покровов

Г Маскировщик должен считаться с тремя основными изменениями натурального покрова в зависимости от времени года: различные оттенки свежей зелени весной и летом; желто-оранжево-красные цвета увядающей листвы осенью и белые снежные покровы зимой. Каждый из упомянутых периодов года отличается характерными спектральными кривыми коэффициента отражения преобладающего покрова, под который, очевидно, должны быть подобраны искусственные маскировочные материалы.

а) Весна и лето. Цвет весенних и летних зеленых покровов обуславливается присутствием в листьях растений и травах хлорофиллового красителя, обладающего

* Подробнее см. IV, гл. 13, § 5А.

*** По измерениям, произведенным сотрудниками ГОИ Е. К. Пуцѣнко, Л. С. Друскиной, М. В. Савостьяновой и Н. И. Сперанской в Ленинграде зимой 1941/42 г.

весьма характерной кривой спектрального отражения. Благодаря этому, несмотря на большое разнообразие различных пород растительности, все они обладают сходными кривыми отражения с максимумами и минимумами, расположенными в одних и тех же участках спектра. Для иллюстрации этого на рис. 300, 301 и 302 приведены кривые спектрального отражения разнообразной естественной зелени.

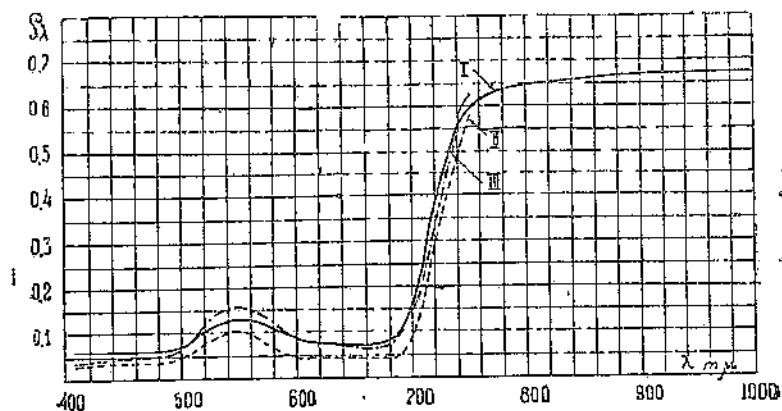


Рис. 300. Коэффициенты отражения:
I — лист березы; II — липы; III — трава-семянка

На каждом из этих рисунков по оси абсцисс отложены длины волн λ в миллимикронах ($m\mu$), а по оси ординат — коэффициенты отражения ρ_λ зелени для данной длины волны.

Интервал длин волн, нанесенный на каждом из этих рисунков, охватывает видимый и прилегающий к нему инфракрасный участки спектра до $\lambda = 1000 m\mu$. Из указанных рисунков видно, что естественная зелень имеет в общих чертах

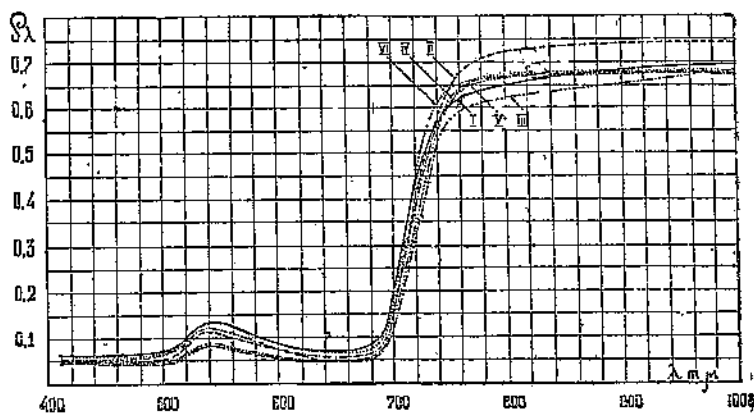


Рис. 301. Коэффициенты отражения зеленых листьев деревьев разных пород:

I — береза; II — осина; III — липа; IV — дуб; V — клен; VI — сирень

во всех случаях одинаковый характер спектрального отражения. В крайней фиолетовой и синей частях спектра до $\lambda \sim 500 m\mu$ естественная зелень отражает очень малую часть падающего на нее света — величина ρ_λ составляет примерно 5%. Около $\lambda = 500 m\mu$ коэффициент отражения начинает возрастать и достигает максимума приблизительно при $\lambda = 540 m\mu$ — 550 $m\mu$. Однако величина этого максимума не велика и составляет 10—15%. При дальнейшем увеличении длины

волны коэффициент отражения снова падает и достигает минимума при $\lambda = 680 \text{ мμ}$, где $\rho_{\lambda} = 5-7\%$. Для крайнего красного конца видимого спектра ($\lambda > 680 \text{ мμ}$) коэффициент отражения начинает быстро возрастать, достигая для $\lambda = 750 \text{ мμ}$ величины в $50-60\%$ и доходя постепенно до $60-70\%$ для длин волн порядка 800 мμ . Для более длинноволнового излучения коэффициент отра-

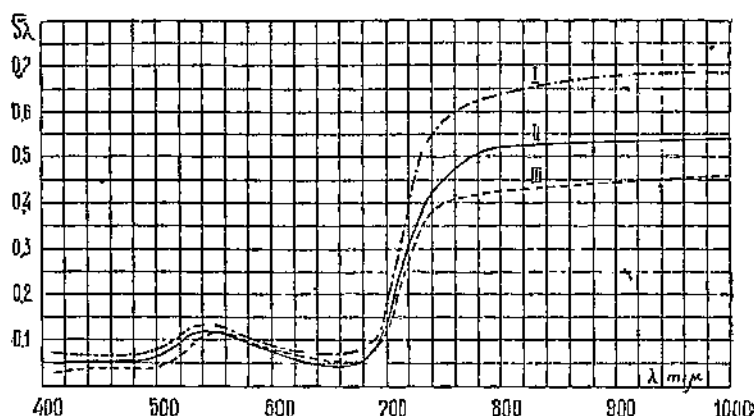


Рис. 302. Коэффициенты отражения:
I — листья березы; II — ветка сосны; III — ветка сити

жения сохраняет ту же достигнутую величину в $60-70\%$. Таким образом, в значительной и наиболее существенной для видения части спектра коэффициент отражения имеет малую величину, вследствие чего естественная зелень кажется относительно темной. Подъем кривой после $\lambda = 680 \text{ мμ}$ глазом уже мало воспринимается, так как чувствительность глаза при этих длинах волн составляет очень малую величину от чувствительности в зеленых лучах (для $\lambda = 555 \text{ мμ}$ $v_{\lambda} = 1,00$, и для $\lambda = 700 \text{ мμ}$ $v_{\lambda} = 0,004$).

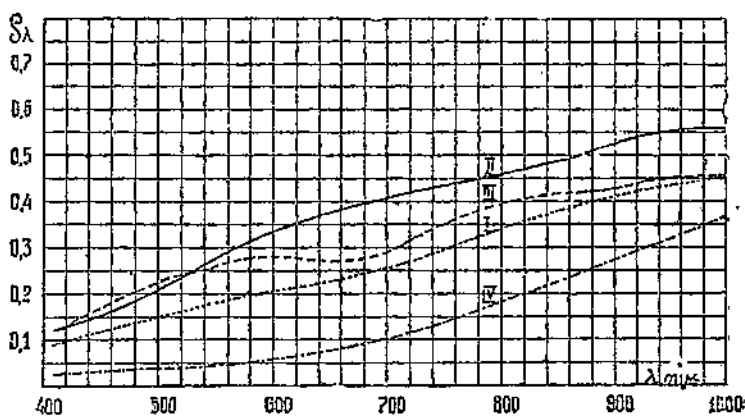


Рис. 303. Коэффициенты отражения почв:
I — пахотная; II — луговая; III — полуболотная (сизая); IV — болотная (торф)

Установленная „характеристическая“ кривая зелени определяет требования, которым должен отвечать краситель, имитирующий естественную зелень.

В летних условиях встречаются и такие покровы, как пески и разнообразные почвы. На рис. 303, 304 приведены кривые отражения наиболее часто встречаемых в природе песков и почв. Из рассмотрения этих кривых не трудно заметить,

что все они обладают значительной величиной отражения в видимой части спектра, которая постепенно повышается в инфракрасной части спектра.

б) Осень. Характерной особенностью осенней растительности является большое разнообразие цветовых оттенков, чему соответствует разнообразие кривых спектрального отражения. Однако, несмотря на значительное различие кривых коэффи-

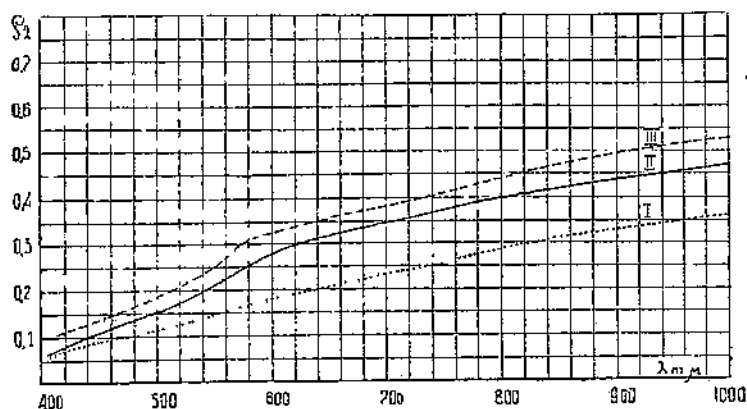


Рис. 304. Коэффициенты отражения песков:
I — крупный (из карьера); II — мелкий; III — мелкий (отмытый)

циентов отражения осенней растительности в видимой части спектра, следует отметить характерный для всех кривых подъем отражательной способности в инфракрасной части спектра. Для иллюстрации этого на рис. 305, 306 приведены коэффициенты отражения желтеющих листьев различных оттенков разнообразных пород деревьев.

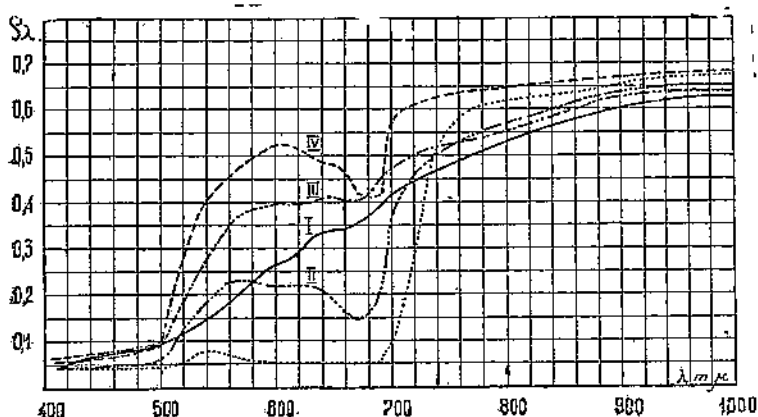


Рис. 305. Коэффициенты отражения листьев липы в различных стадиях пожелтения:

I — красновато-желтый; II — зеленовато-желтый; III — желтый; IV — светложелтый; V — зеленый

Многообразие кривых коэффициентов отражения осенней растительности упрощает значительно задачу подбора покрытий под осенние фоны. В целом ряде случаев достаточно, чтобы кривая отражения маскировочного покрытия лишь в общих чертах походила на кривую отражения многообразной осенней растительности.

в) Зима. Если для отражения естественной зеленой растительности наиболее характерная область расположена в красной части спектра, то для зимнего снежного покрова красная часть спектра не представляет никаких особенностей. Действи-

тельно, белой поверхностью для глаза будет представляться только такая поверхность, которая по всему видимому участку имеет высокий и, примерно, одинаковый коэффициент отражения. Из литературных данных известно, что значительное количество материалов снижает свою отражательную способность в ультрафиолетовой части спектра, тогда как снег в этом участке отражает почти

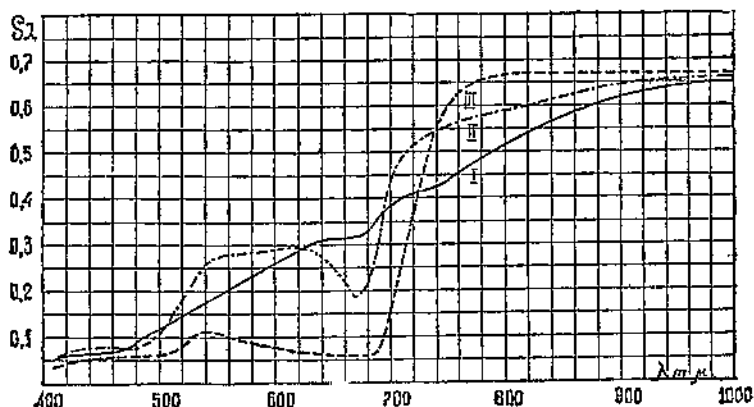


Рис. 306. Коэффициенты отражения листьев дуба в различных стадиях пожелтения:

I — бурый; II — желтый; III — зеленый

одинаково все длины волн. На рис. 307 для иллюстрации этого приведены коэффициенты отражения снега и некоторых белых материалов, таких, как цинковые белила, мел, белая хлопчатобумажная материя. Из рассмотрения этих кривых видно, что отражение снега практически остается постоянным не только в инфракрасном и видимом, но и в ультрафиолетовом участках спектра.

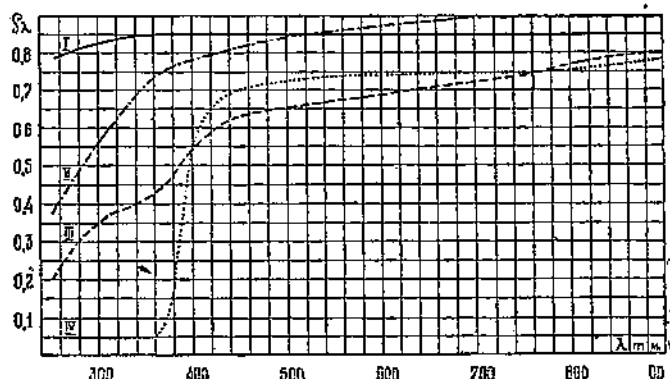


Рис. 307. Коэффициенты отражения:

I — снег; II — белая материя; III — мел; IV — ZnO (окись цинка)

Фактурные свойства некоторых земных покровов

Вопросу об изучении фактуры разнообразных естественных покровов земли до настоящего времени не уделялось много внимания. Однако пространственное распределение силы света, отражаемого неоднородной поверхностью, существенно зависит от вида этой поверхности, или от ее фактуры. Это обстоятельство имеет большое значение в случае маскировки объектов, имитирующих фоны земных покровов. Покровы земли имеют самые разнообразные поверхности: она может быть покрыта травой, песком, глиной, снегом, водой и т. д. Отражение света от поверхностей

отдельных разнородных тел, имеющих различную форму, цвет и пр., происходит весьма сложным образом. В этом случае имеют место и зеркальное, и диффузное, и смешанное отражения от отдельных элементов поверхности, а также и поглощение падающей световой энергии. Кроме того, некоторые из отражаемых лучей могут претерпевать многократное отражение; часть падающего потока также

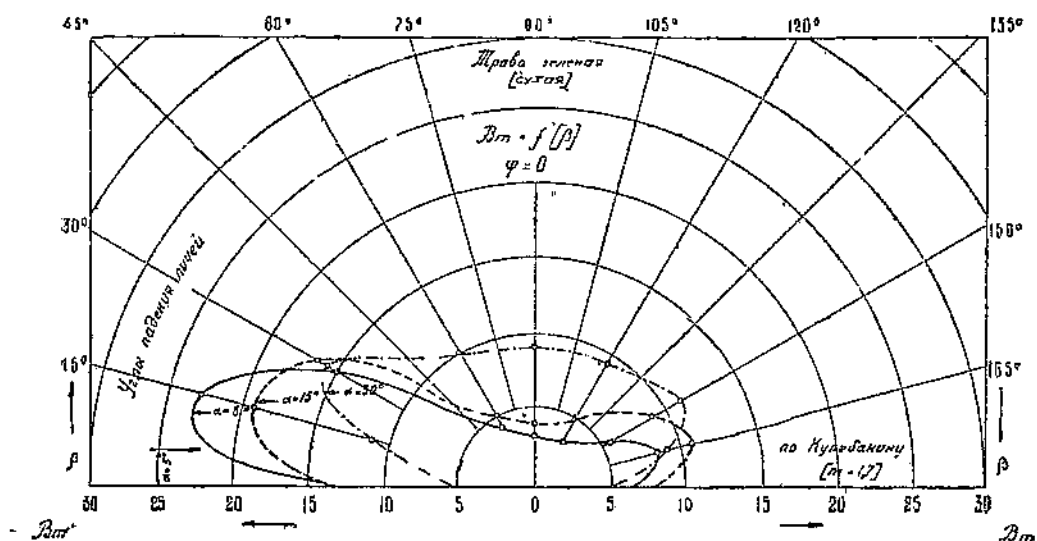


Рис. 308

будет рассеиваться внутри тела и т. д. Среди разнообразных естественных покровов исследовались такие, как трава зеленая и пожелтевшая, в сухом и мокром виде; различные почвы: черноземная, песчаная, суглинистая, снег и т. д. Для иллюстрации на рис. 308, 309, 310, 311 приведены кривые зависимости яркости B

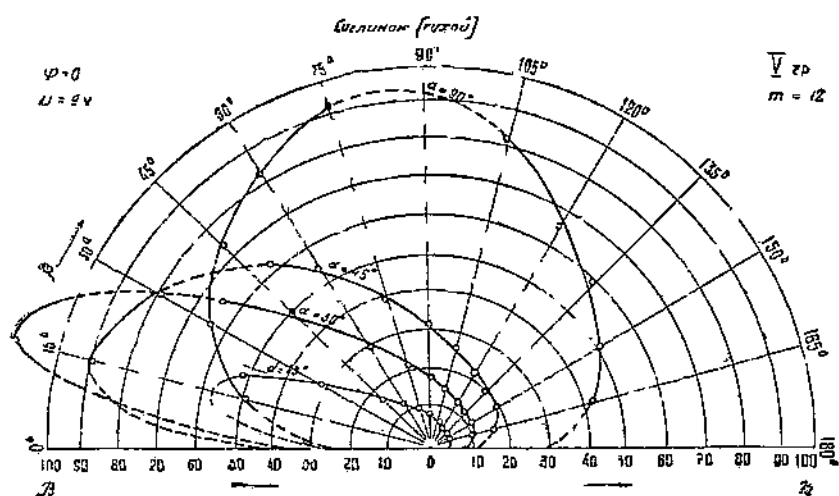


Рис. 309

отраженного пучка от угла наблюдения β при различных углах освещения α для таких покровов, как зеленая трава, суглинистые почвы, и для песка сухого и мокрого. Из рассмотрения этих кривых не трудно прийти к следующим выводам:

коэффициент отражения земных покровов зависит от рода и состояния самого покрова, от угла падения светового потока α и от угла β , под которым определяют отражение, причем поверхности при нормальном освещении ($\alpha = 90^\circ$) дают симме-

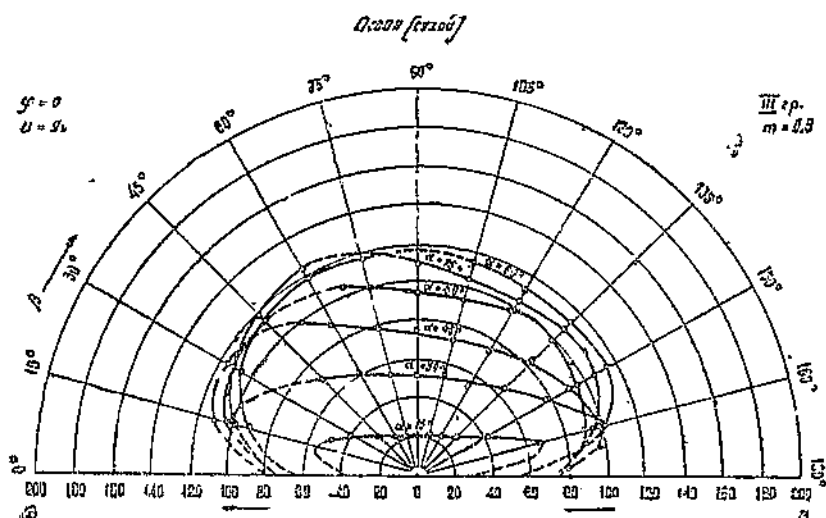


Рис. 310

тричную относительно нормали кривую. С увеличением угла наклона освещения ($\alpha < 90^\circ$) кривая делается асимметричной.

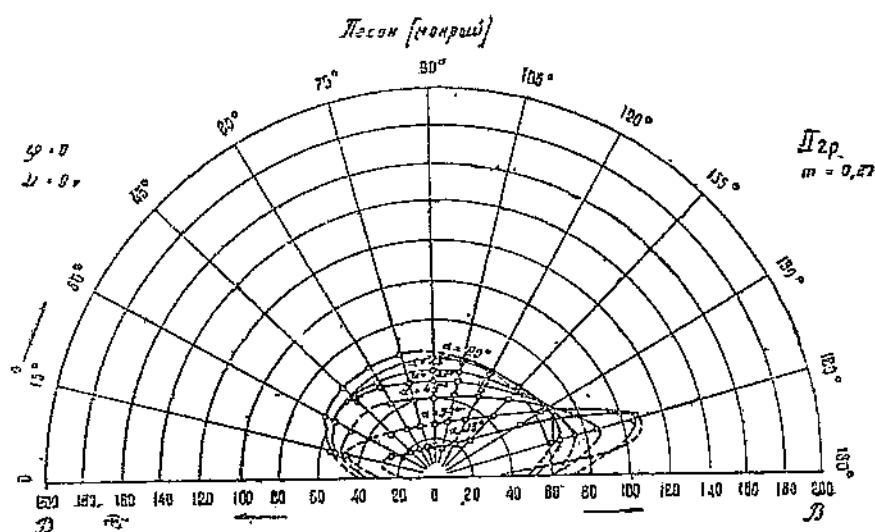


Рис. 311

§ 5. Камуфляж

Кроме метода приближения вида объекта к характеру окружающего его поля, маскировка знает и другой способ вводить в заблуждение вражеского наблюдателя. Способ этот заключается в такой иногда нарочно подогнанной контрастной раскраске объекта, которая давала бы наблюдателю неверное представление о форме объекта, об его ориентировке, направлении и скорости его движения и т. п. Наиболее полно применение этого метода можно иллюстрировать камуфляжной окраской кораблей. Камуфляж кораблей имеет в виду наблюдателя,

находящегося на подводной лодке и рассматривающего корабль через перископ, т. е. практически с уровня моря. Для него корабль всегда будет проектироваться на небе, которое является фоном. Нет почти никакой возможности скрыть корабль, видимый на фоне неба, сделать его яркость и его цвет близкими к яркости и цвету неба. Идея, положенная в основу применения камуфляжной окраски кораблей, состоит в том, чтобы соответствующей окраской дать подводной лодке неверное представление о направлении и скорости движения, которые необходимо ввести в расчет при торпедной атаке и тем уменьшить вероятность попадания торпеды в цель. Основной метод раскраски состоит в том, чтобы нанесением резких контрастов на корпусе в надстройках сломать ту систему правильных линий и ту нормальную перспективу, которая дает возможность опытному глазу сразу определить курс корабля. Один из обычных приемов состоит, например, в покраске у носовой части ложного белого буруна, который всегда образуется у движущегося судна и исчезает у останавливающегося. Иногда удается ввести наблюдателя в обман относительно типа корабля, даже относительно числа их. На помощь маскировщику тут приходит предрассветное или сумеречное освещение, в котором лодка легче может незамеченной подойти к своей цели, легкий туман, затрудняющий всякое видение, и ряд других обстоятельств. Статистика первой мировой войны отмечала уменьшение количества кораблей, потопленных подводными лодками после распространения этого приема защитной окраски.

Такого же типа камуфляжная окраска применяется иногда и на земле. Но так как тут фоном будет в большей части случаев земля (серая или зеленая) или темные стволы деревьев, то искажению формы предмета может помогать так называемое „отпадение“ некоторых пятен окраски к фону, с которым оно хорошо сливается.

Если, например, танк раскрашен зеленой, серой и коричневой краской, то вероятность такого „отпадения“ какого-нибудь из пятен остается большой даже при изменении танком своего положения. Иногда камуфляжная окраска этого рода практикуется и для верхней поверхности крыльев самолета. Она может быть полезна как приземлившемуся, так и летящему самолету.

Интересно отметить, что при стрельбе по амбразурам укрепленных точек после того, когда несколько отколоты края амбразур и правильные формы амбразур искажены, стрелки ощущают неуверенность при прицеливании для дальнейшей стрельбы. Потерявшая правильные формы амбразура укрепленной точки начинает хуже выделяться на окружающем фоне и становится „камуфлированной“.

§ 6. Приемы оптической демаскировки

По сути дела оптическую демаскировку можно рассматривать как контроль качества маскировочных покрытий неприятеля. Существенное отличие будет состоять в том, что место, где может быть открыт замаскированный объект, неизвестно и потому контраст, выдающий его присутствие неприятельскому наблюдателю, должен быть больше, чтобы объект стал заметен. Другое не менее существенное отличие будет состоять в том, что расстояние до неприятельского объекта будет гораздо больше, вследствие чего угловые размеры объектов будут, вообще говоря, малы. Вследствие этого очень полезно применение оптических приборов с увеличением. Следует иметь в виду, что прибор с увеличением неизбежно уменьшает угол поля зрения. Однако ограниченное поле зрения дает возможность более систематически и внимательнее обследовать общую картину.

Совершенно очевидно, что демаскировку желательно проводить в более светлое время дня, так как, во-первых, при большом количестве света все демаскирующие признаки могут быть легче обнаружены и, во-вторых, применение светофильтров для целей демаскировки уменьшает яркость наблюдаемой картины. Даже для фотографических методов разведки наиболее благоприятно большое количество света, так как при этом уменьшается время экспозиции и иногда можно производить моментальную съемку с рук, без штатива, или заднафрагмировать объектив и повысить резкость изображения. Для наблюдения и фотографирования

с самолета в наших широтах также удобно выбирать светлое время дня, когда солнце, приблизившись к своему наивысшему положению на небе, отбрасывает наиболее густые тени. В тропических широтах время разведки придется выбирать иначе.

В настоящее время наиболее распространены два типа демаскировки — фототрафическая и визуальная.

Основы применения фотографии при демаскировке состоят в том, что контрасты, создаваемые на снимке, резко отличаются по величине от контрастов, воспринимаемых глазом непосредственно. Происходит это потому, что спектральная чувствительность светочувствительного слоя имеет другой характер, чем чувствительность глаза. Фотографические яркости совсем не совпадают с яркостями визуальными (зрительными), и каждый сорт светочувствительного слоя, а также и каждый светофильтр, поставленный перед объективом фотоаппарата, меняет соотношения яркостей, получающихся на снимке. Поэтому на снимке можно обнаружить такие детали, которые при визуальном наблюдении совершенно сливаются с фоном.

Особенно резко это обстоятельство сказывается при фотографировании в областях спектра, невидимых глазом, — инфракрасной и ультрафиолетовой. И в том и в другом случае перед объективом ставятся специальные светофильтры, задерживающие лучи, видимые глазом. В частности, фотографирование в инфракрасных лучах получило весьма широкое распространение также и вследствие того, что в этой области спектра значительно слабее сказывается влияние воздушной дымки (см. выше III, гл. 9, § 3), яркость которой накладывается на яркость снимаемых объектов, вследствие чего контрасты снижаются. Это же обстоятельство совершенно исключает применение фотографии в ультрафиолетовых лучах в летнее время, когда дымка особенно заметна. В фотографическом методе демаскирования, как и в визуальном, существенное значение имеет различие коэффициентов отражений фона и демаскируемых объектов. Как видно из кривых рис. 300—306, естественные объекты в инфракрасных лучах обладают весьма большим отражением, мало отличающимся для разных объектов, поэтому различить, например, разные породы деревьев на снимке в инфракрасных лучах представляется затруднительным. Напротив, объекты с искусственной покраской должны при этом хорошо демаскироваться, так как в большинстве случаев они отражают в инфракрасной области меньше, чем естественные; они будут на снимке выходить черными на светлом фоне (зелени, песка и т. д.). В ультрафиолетовой области возможность демаскирования также обусловлена различием коэффициентов отражения покрытий и фона (снега, который в этой области отражает очень хорошо, — рис. 307).

При визуальной демаскировке светофильтр, поставленный перед глазом, точно так же, как и в случае фотографии, производит действие, эквивалентное изменению спектральной чувствительности глаза. Но, кроме способности по-разному реагировать на излучение разных длин волн, глаз обладает еще дополнительной способностью различать цвета, восприятие которых неразрывно связано с яркостными соотношениями в различных участках спектра.

Поэтому поставленный перед глазом светофильтр изменяет не только яркостные, но и цветовые соотношения между объектами наблюдения. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно как для маскировщика, так и для демаскировщика. Первый должен стремиться не дать воспользоваться этим свойством глаза, который будет стараться использовать всякую к тому возможность.

Если иметь в виду зеленый летний пейзаж, в котором имеются сооружения, выкрашенные зеленой краской, то создание цветового контраста между естественной и искусственной зеленью может быть основано на следующих простых соображениях: этот цветовой контраст надо искать на краях видимого участка спектра, потому что в средней — зеленой — части обе кривые, очевидно, имеют достаточно близкое сходство. Поэтому цветокоонтрастный светофильтр должен закрыть среднюю часть спектра, т. е. иметь в ней очень малое пропускание и одновременно хорошо пропускать красные и синие лучи, т. е. иметь две области пропускания, разделенные практически непрозрачной областью спектра.

Действие цветокоонтрастных светофильтров будет обычно тем сильнее, чем их плотность больше, т. е. чем меньше света они пропускают. При уменьшении плотности (или, например, толщины) создаваемые ими цветовые контрасты будут уменьшаться.

Широкое распространение имеют желтые и оранжевые светофильтры (см. IV, гл. 4, § 7), поглощающие синие и фиолетовые лучи. Они применяются, во-первых, для борьбы с воздушной дымкой (подробнее см. IV, гл. 13, § 5А); во-вторых, для увеличения контраста: поглощение синих лучей в ясный солнечный день приводит к усилению контрастов между светом и тенью. Происходит это потому, что, как мы уже говорили, тени всегда имеют больше синих лучей, чем участки, освещенные солнцем. Поэтому даже в ясный день ландшафт, рассматриваемый через желтый или оранжевый светофильтр, кажется более четким, многие детали становятся видимыми резче.

Применение светофильтров, как фотографическое, так и визуальное, имеет один принципиальный недостаток — значительную потерю света. Во многих случаях действие светофильтра усиливается по мере увеличения его плотности. В фотографии оно влечет за собой увеличение времени экспозиции (так называемая кратность фильтра), а при наблюдении глазом вызывает значительное потемнение поля зрения. Как в первом, так и во втором случае использование очень плотных фильтров оказывается невозможным. Во многих случаях кратность фильтра значительно повышать нельзя, так как время экспозиции, например при аэро-съемке, имеет очень жесткий верхний предел. Понижение яркости поля зрения при наблюдении влечет за собой неизбежное понижение разрешающей способности глаза и его контрастной чувствительности, которые могут свести к нулю все преимущества создаваемых цветных контрастов.

Однако в ряде случаев это обстоятельство потери света оказывается благоприятным; бывает необходимо уменьшать слишком большую яркость поля зрения, когда приходится рассматривать объект, проектирующийся на небе или, например, на фоне сверкающего под солнечными лучами моря. Кроме быстро наступающего утомления глаза при больших яркостях, при слишком высокой яркости начинает заметно расти порог контрастной чувствительности глаза, препятствуя видению предметов. Предназначенные для такой цели светофильтры включены, например, в оптическую систему дальномеров, особенно зенитных. Их дается несколько потому, что яркость неба в разных его участках различна и плотность светофильтра, удобного для наблюдения самолетов вблизи солнца, может оказаться избыточной при наблюдении его в районе неба, далеко от солнца.

Вообще при применении светофильтров следует иметь в виду, что для каждого случая возможного усиления контраста следует иметь особый для этого случая предназначенный светофильтр или комбинацию светофильтра и определенного фотослоя. Нет и не может быть универсальных светофильтров, способных существенно помогать демаскировке объектов в очень разнообразных условиях наблюдения. Например, светофильтры, пригодные летом для зеленых фонов, будут совершенно бесполезны зимой.

ВОЕННОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ФОТОГРАФИИ

Фотография позволяет быстро и точно фиксировать внешний вид любого объекта. Полученные снимки легко размножаются и удобны для последующего тщательного изучения. Эти свойства сделали фотографию одним из важнейших вспомогательных средств военной техники. В самом деле, насколько удобнее вместо часто неполного и неточного словесного донесения разведчика получить точную и воспроизводящую все подробности фотографию; насколько более полные сведения о местности, расположении неприятельских сил и сооружений, путях сообщения и тому подобное дает она по сравнению со сделанным на-глаз топографическим наброском и даже картой.

В особенности широкое применение получила военная фотография с развитием авиации. Аэрофотосъемка дает возможность получить фотографии больших площадей с удобной точки зрения и в масштабах, допускающих распознавание военных и топографических объектов и составление карт. Не удивительно, что аэрофотосъемка сделалась одним из важнейших средств разведки в современной армии. Можно было бы привести чрезвычайно много примеров, иллюстрирующих, какое значение придается в настоящее время в армиях всех стран аэрофоторазведке. Достаточно напомнить, что штурм линии Маннергейма в 1940 г. начался лишь после того, как вся она была тщательнейшим образом сфотографирована, фотографии были дешифрованы и выясненные таким образом места расположения укреплений противника были нанесены на карту.

Документальный характер фотографии настолько существен в военном отношении, что разработан и применяется целый ряд приборов, имеющих своим специальным назначением фотодокументирование (например, фотографический контроль бомбометания).

Глава 12

ФОТООБЪЕКТИВЫ

Введение. § 1. Фокусное расстояние объектива и масштаб съемки. § 2. Действующее отверстие. Относительное отверстие. § 3. Освещенность изображения. Светосила объектива. § 4. Глубина резкого изображения. § 5. Пространственные представления при рассматривании плоских снимков (одним глазом). § 6. Поле зрения объектива. § 7. Аберрации фотографических объективов. § 8. Разрешающая сила фотообъективов. § 9. Типы фотографических объективов. § 10. Советские фотообъективы.

Введение

Фотографический объектив является наиболее ответственной и решающей частью всякой фотографической камеры. Им, главным образом, определяются качество снимка и возможность снять тот или иной объект в данных условиях.

Фотообъектив с момента его изобретения* и по настоящее время претерпел

* Изобретение фотообъектива относится к 1812 г. (объектив-мениск Воллстона). Однако описание камер-обскуры с линзой имело еще у Барбаро (1568 г.).

большие изменения, превратившись из простой линзы — монокла с весьма несовершенными оптическими характеристиками — в современный сложный высококачественный объектив, обладающий большим полем и светосилой.

Нужно сказать, что расчет современного объектива при тех высоких требованиях, которые к нему предъявляются, составляет сложную задачу и длится месяцами, а то и годами.

Назначение всякого фотообъектива — давать действительное изображение снимаемых предметов. Помещая в плоскость изображения светочувствительный слой, нанесенный на пластинку или пленку, мы получаем возможность закрепить это изображение.

Хороший фотообъектив должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) давать изображение, резкое и не окрашенное по всей площади изображения;
- 2) давать изображение, геометрически подобное предмету;
- 3) давать достаточную освещенность на пластинке, или, как говорят, обла- дать достаточной светосилой; при этом разница между освещенностью на краю и в центре не должна быть большой;
- 4) иметь достаточное поле;
- 5) давать нужный масштаб съемки;
- 6) иметь достаточную разрешающую способность.

Все эти требования, степень выполнения которых характеризует объектив, будут подробно рассмотрены ниже.

Следует отметить, что, в зависимости от применения объектива, значение выполнения отдельных требований различно. В одном случае, например, важно иметь большое поле, и тогда пользуются специальными широкоугольными объективами. Если съемка производится при слабом освещении или если время экспозиции должно быть малым (аэрофотосъемка), то применяют светосильные объективы. При этом, однако, проигрывают в поле зрения (так как эти характеристики взаимно ограничивают друг друга).

Основными характеристиками всякого фотообъектива являются: фокусное расстояние, относительное отверстие, поле объектива.

§ 1. Фокусное расстояние объектива и масштаб съемки

У фотографических объективов вторая главная плоскость находится обычно внутри или впереди, поэтому фокусное расстояние f' всегда больше расстояния от последней поверхности до фокуса S' . Особенно сильно отличается это расстояние у так называемых телеобъективов (см. о них в § 9). Величина S' определяет длину камеры. Величина f' определяет масштаб съемки или увеличение*.

Рассмотрим два случая.

- 1) Снимаемый объект на близком расстоянии (съемка чертежей, карт и пр.). Из геометрической оптики известно, что увеличение, т. е. отношение величин изображения y' к величине предмета y , определяется следующими формулами:

$$V = \frac{y'}{y} = \frac{f'}{x} = \frac{x'}{f'}, \quad (1,1)$$

где x и x' (рис. 312) расстояния соответственно от переднего фокуса до предмета и от заднего фокуса до изображения (см. выше I, гл. 2, § 5). При больших расстояниях можно вместо x подставлять расстояние b от объектива до предмета (точнее, от главной плоскости до предмета). Если выражать увеличение

* Заметим, что в случае фотосъемки мы имеем, как правило, уменьшение, а не увеличение. Исключение составляют специальная репродукционная съемка с увеличением и фотографирование через микроскоп. Все же и в этом случае в оптике говорят об увеличении, понимая под этим дробную величину.

через расстояния от главных плоскостей до предмета и изображения (на рис 312 — b и b'), то будем иметь

$$V = \frac{b'}{b}. \quad (1,2)$$

При этом расстояние от передней главной плоскости до предмета может быть определено по формуле

$$b = f' \left(\frac{1}{V} + 1 \right), \quad (1,3)$$

а расстояние от задней главной плоскости до изображения

$$b' = f'(V + 1). \quad (1,4)$$

Таким образом, как видно из формулы (1,1), для этого случая увеличение зависит от двух факторов: расстояния до предмета и f' объектива. На рис. 313 а и б приведены графики для расстояний b и b' , а также для длины $B = b + b'$ в зависимости от масштаба V .

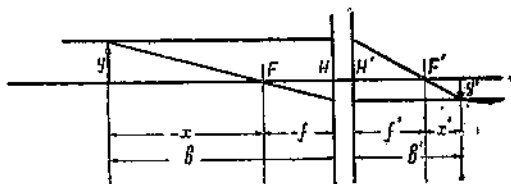


Рис. 312

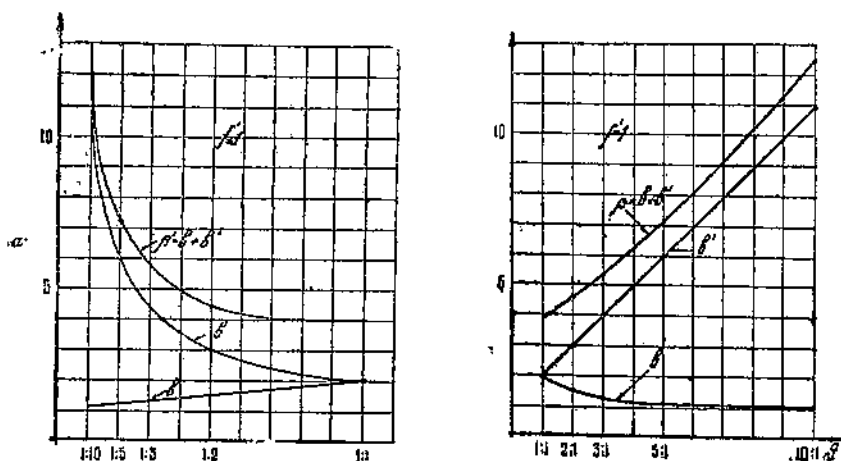


Рис. 313. График для определения расстояний b , b' и B в зависимости от масштаба: а — для масштабов меньших единицы; б — для масштабов больших единицы

Графики построены при значении $f' = 1$. Для перехода к реальным расстояниям нужно все эти величины умножить на f' объектива.

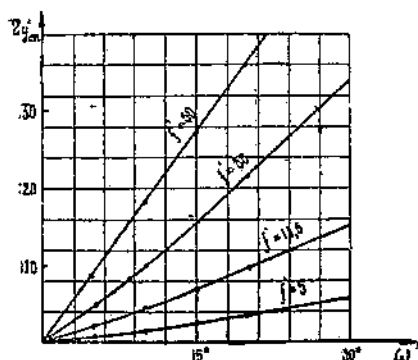


Рис. 314а. Зависимость величины изображения от фокусного расстояния объектива

Заметим, что для съемки в натуральную величину ($V = 1$) нужно расположить предмет на двойном фокусном расстоянии, при этом и изображение получится на двойном фокусном расстоянии. Это легко получить из формулы (1,1) или из графика, если положить $V = 1$.

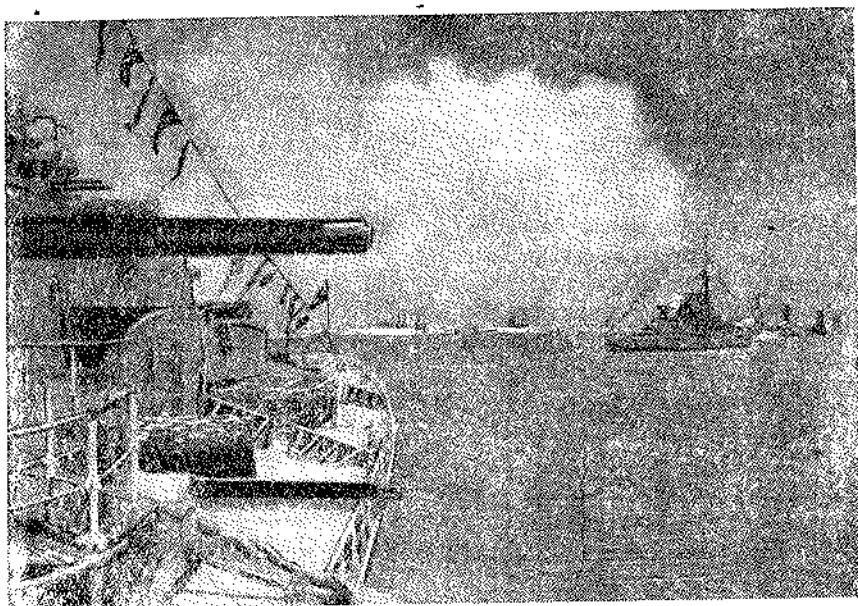
2) Снимаемый объект находится на очень большом расстоянии (ландшафтные снимки, аэрофотосъемка). Для этого случая величина изображения

$$y' = f' \operatorname{tg} \omega; \quad (1,5)$$

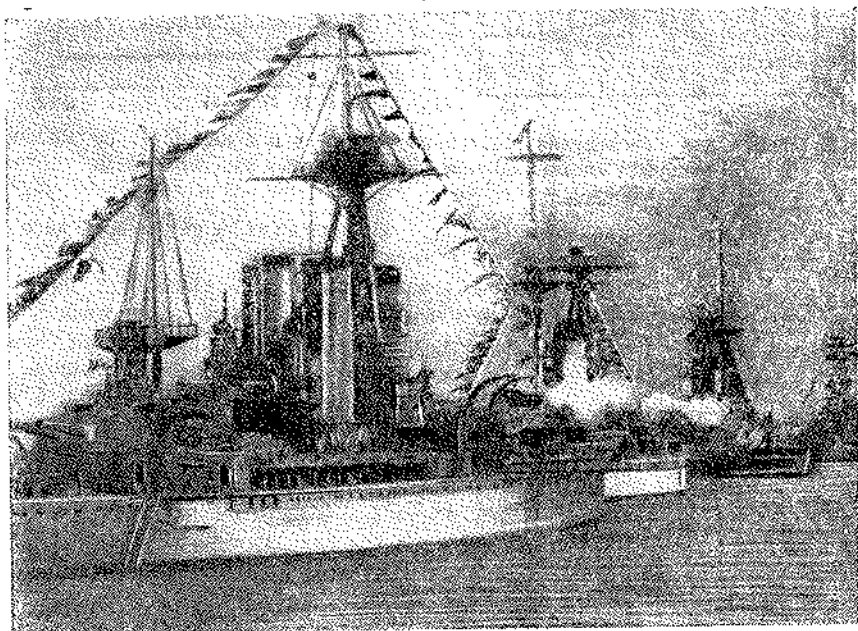
здесь ω — угол, под которым виден объект из центра объектива.

Таким образом, здесь масштаб съемки зависит исключительно от фокусного расстояния объектива.

На рис. 314а приведен график, иллюстрирующий зависимость величины изображения от фокусного расстояния при различных угловых размерах предмета. На рис. 314б имеем соответствующие снимки.



Снимок сделан нормальным объективом



Снимок того же объекта (корабль), сделанный длиннофокусным объективом
(фокусное расстояние около 100 см)

Рис. 314б

Следует отметить, что обычно применяют объективы с f' равным, или несколько большим диагонали пластинки. Фокусное расстояние фотообъективов колеблется в весьма широких пределах от 12—15 мм в миниатюрных камерах до 700 и выше в аэрофотокамерах.

§ 2. Действующее отверстие. Относительное отверстие

В каждом фотообъективе имеется диафрагма (обычно с отверстием переменной величины), которая ограничивает пучки лучей, падающих на объектив. Такая диафрагма называется в оптике апертурной. Помещается она большей частью внутри объектива. Ее изображение через предшествующую часть объектива A (рис. 315) называется входным зрачком, или действующим отверстием. Аналогично изображение ее через часть B — выходным зрачком. В случае симметричных объективов апертурная диафрагма находится посреди объектива, а входной и выходной зрачки лежат в его главных плоскостях и равны

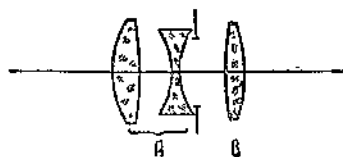


Рис. 315. Объектив с апертурной диафрагмой

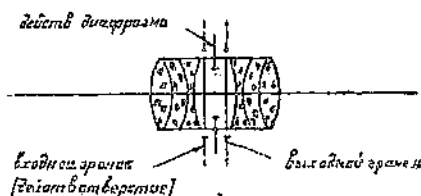


Рис. 316. Входной и выходной зрачки у симметричного объектива

друг другу по величине (рис. 316). Обычно действующее отверстие равно или несколько меньше первой линзы объектива (исключение — широкоугольные объективы).

Отношение диаметра (максимального) действующего отверстия D к фокусному расстоянию f' называется относительным отверстием объектива. Таким образом, относительное отверстие

$$C = \frac{D}{f'} \quad (2,1)$$

и записывается обычно как отношение, у которого первый член равен единице.

Пример. Для объектива Ортогон аппарата Фотокор имеем $f' = 135$ мм, $D = 30$, тогда относительное отверстие $C = \frac{30}{135} = 1 : 4,5$.

Величина действующего отверстия имеет весьма большое значение.

От нее зависят: освещенность на пластинке, глубина резкого изображения, качество изображения и разрешающая способность (в известных пределах), а также связанное с ними поле зрения объектива.

Вопрос о влиянии диаметра действующего отверстия на указанные характеристики будет рассмотрен в последующих параграфах.

§ 3. Освещенность изображения. Светосила объектива

Действие света на светочувствительный слой (эмульсию) пропорционально, как известно, произведению освещенности на время экспозиции (см. ниже IV, гл. 13, § 3). Посмотрим теперь, как зависит освещенность изображения от постоянных объектива.

Очевидно, что освещенность изображения будет тем больше, чем больше площадь действующего отверстия, иначе говоря, освещенность прямо пропорциональна квадрату диаметра действующего отверстия — D^2 . С другой стороны;

чем больше площадь изображения, тем меньше освещенность единицы площади. Но величина изображения, как мы видели, пропорциональна f' , а площадь — квадрату f' . Следовательно, освещенность обратно пропорциональна f'^2 . Таким образом, можно написать, что освещенность на пластинке

$$E' = K \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = kC^2, \quad (3,1)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, мы пришли к очень важному выводу: освещенность изображения пропорциональна квадрату относительного отверстия. (Последний иногда называют светосилой объектива.)

Зависимость (3,1) можно вывести более строго. Для этого обратимся к рис. 317.

Пусть предметом является светящаяся площадка с площадью s , которая изображается в виде подобной площадки s' . При этом, как не трудно видеть, отношение площадей

$$\frac{s'}{s} = V^2 = \frac{f'^2}{x^2}.$$

Сила света I от предмета будет равна $I = Bs$, где B — яркость предмета. Тогда освещенность единицы площади на входном зрачке

$$E = \frac{I}{R^2}$$

(так как освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния) или

$$E = \frac{Bs}{R^2}.$$

Световой поток Φ , прошедший через объектив, будет равен

$$\Phi = Es,$$

где s — площадь зрачка, т. е. таким образом световой поток окажется равным

$$\Phi = \frac{Bs}{R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$

Этот световой поток, если пренебречь потерями в стекле, полностью пройдет через объектив и распределится по всей площади изображения s' . При этом освещенность единицы площади на пластинке (изображении) определится так:

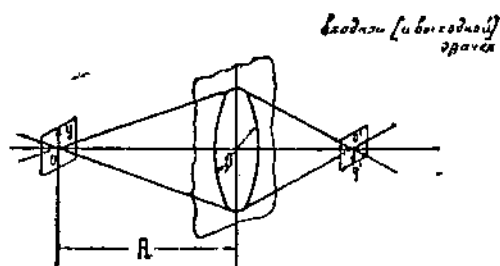


Рис. 317

$$E' = \frac{\Phi}{s'} = \frac{B}{R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{s}{s'},$$

но

$$\frac{s'}{s} = \frac{f'^2}{x^2} = \frac{f'^2}{R^2},$$

тогда

$$E' = \frac{B}{R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{R^2}{f'^2},$$

или

$$E' = \frac{\pi B}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2, \quad (3,1a)$$

т. е. приходим к формуле (3,1).

Теперь ясно, что изменение диаметра диафрагмы (а следовательно, и действующего отверстия) сильно меняет освещенность на пластинке.

Очевидно, что если условия съемки изменились, то для получения достаточной освещенности на пластинке мы должны изменить соответственно диаметр действующего отверстия.

Для примера рассмотрим, как должен меняться этот диаметр в течение дня при съемке в различные часы (при условии, что прочие факторы — чувствительность пластинок, выдержка и пр. — остались без изменения).

На графике рис. 318 показано изменение освещенности в зависимости от времени суток для 3 дней: 1/VII, 10/IV и 17/XII для широты 60°. Из графика видно, что, например, для 1 июля освещенность при сплошной облачности (кривая II) составляла:

для 12 час. дня 53 000 люкс

" 17 " дня 13 000 "

т. е. уменьшилась примерно в 4 раза.

Следовательно, чтобы скомпенсировать это четырехкратное уменьшение освещенности, надо диаметр диафрагмы увеличить в два раза.

Нужно сказать, что приведенная выше формула для освещенности верна лишь для центрального участка изображения. На краю изображения, как это будет показано ниже, освещенность меньше.

Кроме того, формула не учитывает потерь света в объективе, которые всегда имеют место. Для вычисления этих потерь света нужно знать число несклеенных поверхностей (разделяющих стекло и воздух) и толщину линз.

Можно считать, что при отражении от несклеенной поверхности линзы теряется примерно 5% света. Потери же при поглощении света стеклом можно принять равными 1% на 1 см толщины стекла (подробнее см. II, гл. 3Б, § 3).

Тогда общий коэффициент потерь определится так:

$$k = 0,95^{N_1} \cdot 0,99^l, \quad (3,2)$$

где N_1 — число несклеенных поверхностей линз;

l — длина пути света в стекле (т. е. сумма толщин линз) в сантиметрах*. На этот коэффициент потерь нужно умножить яркость света при определении освещенности по формуле (3,1)**.

Если учесть все эти потери, то получим представление о физической светосиле объектива, которая всегда меньше теоретической или геометрической светосилы, определяемой квадратом относительного отверстия, и равна произведению последней на коэффициент пропускания.

Для того, чтобы иметь представление о величине потерь света, приводим в табл. 51 и 52 данные о яркости выходящего пучка в зависимости от количества преломляющих поверхностей и длины пути в стекле.

* Что касается коэффициента пропускания, то он, очевидно, получится, если вычтем коэффициент потерь из единицы (либо из 100, если выражать оба коэффициента в процентах).

** Практически вычисление абсолютной величины освещенности не требуется. Зная величину относительного отверстия, дающего удовлетворительный результат при съемке на данном фотоматериале и в данных условиях, и меняя это относительное отверстие, мы легко определяем относительное изменение освещенности и соответственно меняем время экспозиции. Для этой же цели существуют таблицы и специальные приборы.

Таблица 51
Потери на отражение при $n = 1,55$

Число линз	Число преломляющих поверхностей	Яркость выходящего пучка
1	2	0,909
2	4	0,83
3	6	0,75
4	8	0,63

Таблица 52
Потери на поглощение

Длина пути в стекле (в см)	Яркость выходящего пучка
1	0,99
4	0,96
8	0,92
10	0,90

Таким образом, мы видим, что в сложных объективах, состоящих из 3—4 линз, потери света весьма значительны, достигая 30—40%.

Необходимо отметить, что коэффициент пропускания фотообъектива неодинаков для различных длин волн и колеблется в весьма широких пределах, что видно из табл. 53*.

Таблица 53
Коэффициенты пропускания фотообъективов для различных длин волн

Тип объектива	Фокусное расстояние	Относительное отверстие	Количество поверхностей	Общая толщина стекла	Коэффициент пропускания (η в %)			
					$\lambda = 365 \text{ м}\mu$	$\lambda = 405 \text{ м}\mu$	$\lambda = 436 \text{ м}\mu$	$\lambda = 546 \text{ м}\mu$
Индустар-13	300	1:4,5	6	35,4	10,5	46,8	54,2	70,7
Индустар-2	135	1:4,5	6	11,2	31,2	67,1	70,4	69,4
Индустар-4	210	1:4,5	6	25,5	20,3	51,5	69,5	71,4
Индустар-10(ФЭД)	50	1:3,5	6	9,9	39,5	67,5	72,7	74,2
Индустар-7	105	1:3,5	6	18,9	24,5	63,0	71,7	71,0
Ортогон	135	1:4,5	8	13,9	17,5	54,1	60,1	64,22
Ортотелар X 1	135	1:6,3	8	17,4	16,5	52,3	61,0	63,7
Дублет	500	1:14	2	7,2	71,5	79,2	84,0	91,6
Тессар	300	1:4,5	6	37,8	20,0	55,8	65,5	71,5
Ross-Express	250	1:4	8	60,18	8,8	36,0	50,7	65,8
Кварцевый анастигмат	120	1:4,5	6	—	65,0	70,8	69,7	72,8

Это объясняется неодинаковым поглощением света различных длин волн в стекле. Как видно из таблицы, наибольшее поглощение наблюдается для фиолетовой и ультрафиолетовой областей. Физическая светосила здесь составляет всего 10—20% от геометрической.

Для того чтобы уменьшить потери на отражение при преломлении, в последнее время начинают широко вводить так называемое „просветление“ оптики, которое заключается в том, что на поверхность линзы наносят слой прозрачной пленки определенной толщины и состава. Эта пленка, благодаря явлению интерференции, получающемуся при прохождении света через нее, сильно уменьшает потери на отражение (подробно об этом см. I, гл. 1, § 6 и II, гл. 3А, § 8). Значение просветления ясно из нижеприведенной таблицы.

Таблица 54

Объектив	Коэффициент пропускания в средней части спектра	
	до просветления (в %)	после просветления (в %)
Телеобъектив $f' = 400$	68	77
Арктик $f' = 518$	58	72
Индустар-4	72,5	84

* Таблица взята из статьи А. Т. Ащеулова и З. Л. Моргенштерн, Пропускание света фотообъективами, Журн. оптико-механич. пром. № 1, 1941.

Следует отметить, что из-за отражения света от поверхностей линз и внутренних поверхностей оправ, создающего на пластинке „вуаль“, получается еще одно неприятное явление, именно уменьшение контрастности снимка. Вот почему внутренние поверхности оправ чернятся матовой краской, а при конструировании объектива стремятся, если возможно, уменьшить количество несклеенных поверхностей (в последнем случае и потери на отражение меньше).

Падение освещенности изображения к краю

Можно доказать, что освещенность на краю изображения E'_ω убывает по сравнению с освещенностью в центре E'_0 , *входящий луч*

$$E'_\omega = E'_0 \cos^4 \omega, \quad (3, 3)$$

где ω — угол между осью и главным лучом, приходящим в точку M на краю снимка (рис. 319). Появление множителя $\cos^4 \omega$ станет понятным из следующего рассуждения*.

Для крайней точки M расстояние от выходного зрачка (или от объектива) — OM больше, чем расстояние до центральной точки — OM_0 в $\frac{1}{\cos \omega}$ раз, т. е. $OM = \frac{OM_0}{\cos \omega}$. Освещенность же, поскольку она обратно пропорциональна квадрату расстояния, будет пропорциональна $\cos^2 \omega$. Далее, так как свет падает на элементарную площадку у точки M не перпендикулярно, то освещенность будет еще меньше в $\cos \omega$ раз, так как здесь нужно учитывать проекцию площадки. Наконец, световой поток определяется теперь не всем выходным (или входным) лучком AB , а его проекцией, следовательно опять войдет множитель $\cos \omega$.

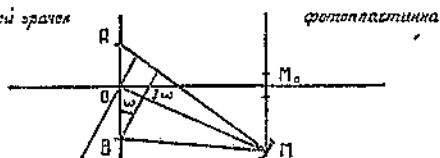


Рис. 319

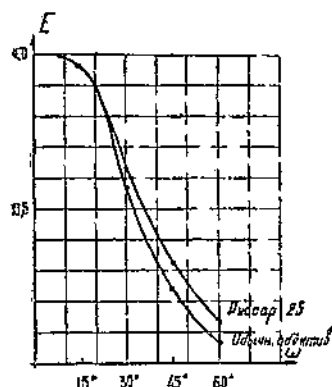


Рис. 320. Падение освещенности к краю для обычного объектива и объектива Риссар-25

На рис. 320 дан график падения освещенности по закону $\cos^4 \omega$. Из графика видно, что у объектива с полем $2\omega = 120^\circ$ освещенность на краю в 16 раз меньше освещенности в центре. Такую разницу освещенностей трудно уравнять при проявлении. Снимки, сделанные широкоугольными объективами обычно „неодержаны“ на краю. Это обстоятельство является одним из тормозящих условий в развитии и применении широкоугольных объективов.



Рис. 321. Компенсатор Мите

Для того, чтобы уменьшить разницу освещенностей в центре и на краю, было предложено несколько способов, из которых мы укажем следующие:

1) Применение звездчатой вращающейся диафрагмы. Эта диафрагма затемняет в большей степени центральный участок, чем край, и тем самым выравнивает освещенность.

2) Компенсатор Мите (рис. 321) — он состоит из плоско-выпуклой линзы A , окрашенной в желтый цвет и склеенной с бесцветной плоско-вогнутой линзой B . Вместе они образуют плоско-параллельную пластинку. Центральные лучи ослабляются здесь сильнее краевых, так как проходят через более толстую часть окрашенной линзы.

3) Специальная конструкция объектива. Как оказалось, можно рассчитать

* Подробный вывод см. в курсах геометрической оптики.

объектив, в котором падение освещенности к краю не так резко. Это — объективы, рассчитанные Русиновым * („Руссары“, см. о них в § 9 б).

График падения освещенности к краю такого объектива (Руссар-25) для сравнения приведен на том же рис. 320. Как видим, для больших углов у Руссара имеются существенные преимущества в смысле распределения освещенности.

Падение освещенности на краю увеличивается еще благодаря так называемому виньетированию пучков лучей оправами линз или полевыми диафрагмами (см. о виньетировании I, гл. 2, § 7).

§ 4. Глубина резкого изображения

Строго говоря, резкое плоское изображение получается лишь от плоского предмета. При фотографировании пространственного предмета мы „фокусируем“ объектив на некоторую плоскость, называемую плоскостью наведения (наводки), или плоскостью установки. Точки предмета, лежащие впереди и позади плоскости наведения, будут изображаться уже не точками, а кружками

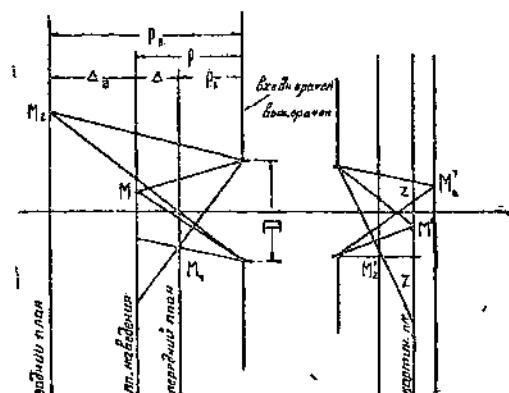


Рис. 322. Определение глубины резкого изображения

(так называемые кружки рассеяния). Это обстоятельство, однако, не мешает нам получать удовлетворительные снимки пространственных предметов, что объясняется несовершенством нашего глаза, благодаря которому глаз воспринимает кружки, меньшие определенного диаметра, как точки. Наибольший допустимый диаметр кружка рассеяния зависит от так называемой разрешающей способности глаза. Для нормального глаза можно считать угловой размер диаметра такого кружка равным $1'$ (т. е. при расстоянии от снимка до глаза в 250 мм диаметр кружка $\leq 0,07$ мм или приблизительно 0,1 мм).

Исходя из этого допуска на величину диаметра кружка рассеяния, можно определить так называемую глубину резкого изображения.

На рис. 322 показаны входной и выходной зрачки объектива, плоскость наведения и сопряженная с нею в пространстве изображений плоскость, называемая картинной плоскостью (в ней помещается фотопластинка). Плоскости, названные на рисунке передним и задним планом, ограничивают то пространство, которое изображается еще удовлетворительно, т. е. дает кружки рассеяния z , меньше допустимых (при фокусировке объектива на плоскость наведения).

Расстояние между передним и задним планом $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ и называется глубиной резкого изображения.

Ниже дается упрощенный вывод формулы для расстояний до переднего и заднего планов (p_1 и p_2) **.

Возьмем точку A на заднем плане (рис. 323). Пучок лучей, выходящий из точки, пересекает плоскость наведения по окружности диаметра z , причем, как видно из рисунка, $\frac{z}{D} = \frac{p_2 - p}{p_2}$, откуда

$$p_2 = \frac{Dp}{D - z}. \quad (4.1)$$

Кружок z в плоскости наведения соответствует кружок z' в плоскости фотопла-

* М. М. Русинов, Новый широкоугольный ортоскопический аэрофотообъектив, Журн. оптико-механич. пром., № 11 и 12, 1934.

** Подробный вывод см., например, у Тудоровского [5], стр. 280 и 513.

стинки, поскольку это сопряженные плоскости, причем $\frac{z'}{z} = V$, где V — увеличение для этих двух плоскостей.

Если снимок будет получен контактным печатанием с негатива, то мы должны поставить требование, чтобы все кружки рассеяния z' на негативе не превышали допустимой угловой величины $\varepsilon = 1'$. Таким образом, имеем $z' \leq \varepsilon k$, где k — расстояние, с которого снимок будет рассматриваться. Как будет указано ниже, расстояние k лучше всего взять равным f' объектива (при этом получается правильная перспектива — см. ниже § 5). Если принять это условие, то $z' = f'\varepsilon$.

Для z будем иметь $z = \frac{z'}{V} = \frac{f'\varepsilon}{V} = \frac{f'\varepsilon \cdot p}{f} = \varepsilon p$. Подставляя значение z в уравнение (4,1), получим

$$p_2 = \frac{Dp}{D - \varepsilon p}. \quad (4,1a)$$

Совершенно аналогично можно получить выражение для p_1 , которое будет выглядеть так:

$$p_1 = \frac{Dp}{D + \varepsilon p}. \quad (4,2)$$

Чтобы определить теперь переднюю и заднюю глубину, нужно написать следующие разности:

$$\Delta_1 = p - p_1 = \frac{p^2 \varepsilon}{D + p\varepsilon},$$

$$\Delta_2 = p_1 - p = \frac{p^2 \varepsilon}{D - p\varepsilon}. \quad (4,3)$$

Из этих формул можно сделать следующие выводы:

1) Глубина изображения находится в обратной зависимости от диаметра входного зрачка.

2) $\Delta_1 < \Delta_2$, т. е. глубина в сторону объектива меньше.

Определим теперь наиболее выгодную в отношении глубины фокусировку объектива при съемке удаленных объектов.

1. Если мы будем фокусировать на ∞ , т. е. плоскость наведения отнесем в ∞ , то $p = \infty$. Чтобы раскрыть неопределенность в формуле (4,2) $\left(\frac{\infty}{\infty}\right)$, надо разделить числителя и знаменателя на p :

$$p_1 = \frac{D}{\frac{D}{p} + \varepsilon}.$$

Так как $\frac{D}{p}$ стремится к 0 при $p = \infty$, то

$$p_1 = \frac{D}{\varepsilon}. \quad (4,4)$$

2. Если же мы будем фокусировать так, чтобы задний план был в ∞ , то для расстояния до плоскости наведения будем иметь из (4,3) (так как при этом $\Delta_2 = \infty$), что знаменатель должен быть равен 0, т. е.

$$D - p\varepsilon = 0, \quad p = \frac{D}{\varepsilon}.$$

При этом расстояние до переднего плана будет равно

$$p_1 = \frac{D \frac{D}{\varepsilon}}{D + \frac{D}{\varepsilon} \cdot \varepsilon} = \frac{D}{2\varepsilon}, \quad (4,5)$$

т. е. в последнем случае расстояние до переднего плана вдвое меньше (а глубина, следовательно, больше).

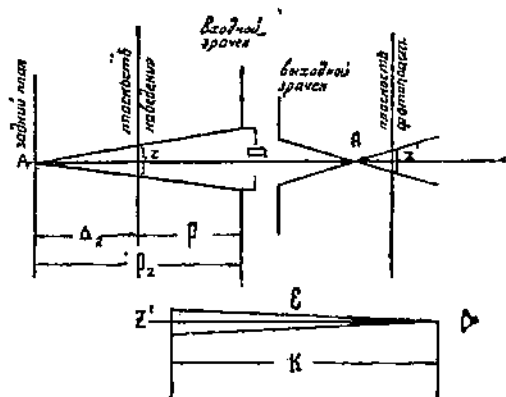


Рис. 323. Определение допустимой величины кружков рассеяния

Таким образом, выгодно фокусировать не на ∞ , а на плоскость, определяемую уравнением (4,3) (рис. 324). Эту плоскость называют иногда „началом бесконечности“, так как дальше нее все точки пространства изображаются в фокальной плоскости, т. е. так, как если бы они были в бесконечности. Динафрагмированием объектива можно увеличить глубину и приблизить „начало бесконечности“.

Следует заметить, что если съемка производится короткофокусным объективом и снимки получаются увеличением негативов, то допуск на диаметр кружка рассеяния на негативе должен быть строже в V_1 раз, где V_1 — увеличение при печатании снимка, т. е. в этом случае

$$Z' \leq \frac{f^e}{V_1},$$

тогда $z = \frac{ep}{V_1}$ и для p_1 и p_2 будем иметь:

$$p_1 = \frac{Dp}{D + \frac{ep}{V_1}} = \frac{V_1 D p}{V_1 D + ep},$$

$$p_2 = \frac{V_1 D p}{V_1 D - ep}. \quad (4,6)$$

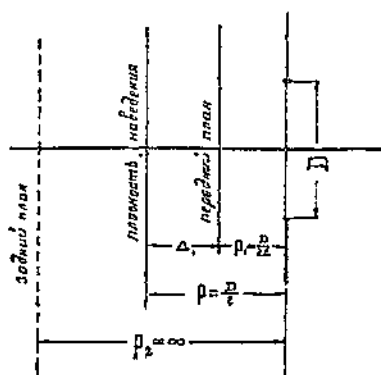


Рис. 324

Очевидно, в этом случае глубина будет меньше.

§ 5. Пространственные представления при рассматривании плоских снимков. (одним глазом)

Перспектива. При съемке пространственных предметов мы получаем на фотопластинке плоское изображение — снимок. Однако, рассматривая такой снимок, мы можем правильно оценить взаимное расположение предметов в пространстве и восстановить, как говорят, правильную перспективу. Для этого необходимо, чтобы были выполнены следующие условия:

1. Объектив должен давать вполне геометрически подобное изображение, т. е. обладать ортоскопией (см. об этом ниже § 7).

2. Снимок должен рассматриваться с определенного расстояния (у ландшафтных снимков — с расстояния, равного f' объектива).

Для того, чтобы выяснить, какое значение имеет это расстояние, обратимся к рис. 325.

Предметы A и B , видимые из центра входного зрачка под углом ω_1 и ω_2 , изобразятся на фотопластинке в виде отрезков OO'_1 и OO'_2 . Так как фотообъективы являются ортоскопическими системами (т. е. такими, в которых лучи, входящие под определенным углом во входной зрачок, выходят под тем же углом из выходного зрачка), то углы, под которыми видны изображения на пластинке из центра выходного зрачка, будут также равны ω_1 и ω_2 .

Как известно, о величине предмета и расстоянии до него мы судим по его угловым размерам. Поэтому для получения правильной перспективы нужно рассматривать снимок на таком расстоянии, чтобы изображение было видно под теми же углами, под какими был виден предмет. Иначе говоря, глаз нужно помещать на

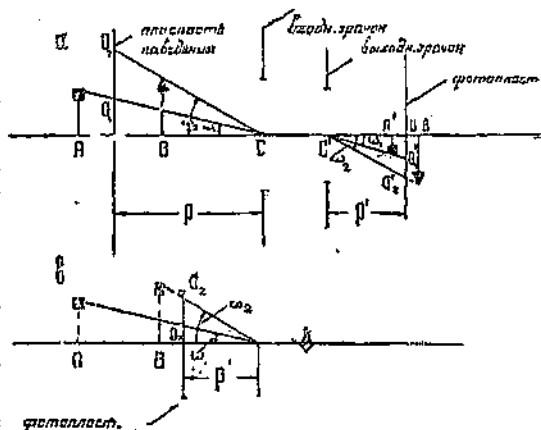


Рис. 325. Определение расстояния, с которого должен рассматриваться снимок

том же расстоянии p' , на каком пластинка находится от зрачка выхода. На рис. 325 a пластинка повернута на 180° и глаз помещен на расстоянии p' от снимка. При этом наблюдатель, мысленно проектируя изображения на снимке в пространство, правильно располагает их, так как он видит их под теми же углами ω_1 и ω_2 .

Посмотрим теперь, что получится, если мы будем рассматривать снимок ближе или дальше расстояния p' . На рис. 326 a и b снимок приближен к глазу, угловые размеры предметов увеличены. При этом, если наблюдатель хорошо знает размеры предметов, то он представляет себе предметы приближенными, и пространственная картина кажется более плоской (рис. 326 a). Если же он, напротив, уверен в расстояниях и мысленно располагает предметы на правильных расстояниях, то они кажутся ему увеличенными (рис. 326 b).

При рассматривании с далекого расстояния получается обратное явление: пространственная картина либо растягивается (рис. 326 c), либо предметы кажутся меньшими, чем на самом деле (рис. 326 d).

Расстояние p' не трудно определить, если принять, что выходной зрачок совпадает с задней главной плоскостью объектива (что обычно имеет место).

Рассмотрим два случая.

1. Предмет на близком расстоянии

В этом случае (рис. 327) из формулы (1,1) имеем $x' = \frac{f'^2}{x}$, поэтому

$$p' = f' + \frac{f'^2}{x} = f' + f' \cdot \frac{f'}{x} = f' + f'V = f'(1 + V), \quad (5,1)$$

где V — увеличение, или масштаб съемки.

2. Предмет на очень большом расстоянии

В этом случае пластинка находится в фокальной плоскости, и $p' = f'$.

Таким образом, для получения правильной перспективы при рассматривании ландшафтных снимков нужно держать их на расстоянии f' от глаза. Несоблюдение этого правила ведет к искажению перспективы. При рассматривании снимков, сделанных длиннофокусными объективами, у которых $f' > 250$ мм — с расстояния нормального зрения, пространственная картина получается более плоской, чем на самом деле (либо задние планы кажутся увеличенными); для снимков, сделанных короткофокусными объективами, картина, наоборот, кажется углубленной.

В этих случаях рекомендуется рассматривать снимки в лупу с расстояния, равного f' объектива, или же рассматривать самими объективами*.

Если снимок был сделан короткофокусным объективом и затем увеличен в V_2 раз, то для получения правильной перспективы его целесообразно рассматривать с расстояния $p' = V_2 \cdot f'_{об}$.

Следует отметить, что снимки, сделанные широкоугольными объективами (с полем зрения свыше 80°), кажутся неестественными. Объясняется это тем, что у них поле зрения превышает поле зрения неподвижного глаза ($30-40^\circ$).

* Существуют специальные лупы для этой цели, называемые верапт-лупами.

§ 6. Поле зрения объектива

У фотообъективов следует различать кружок освещения и поле зрения. У обычных объективов первый всегда больше второго.

В применении к фотообъективу под полем зрения понимают угол $2\omega'$ (рис. 328), охватывающий участок изображения с удовлетворительным качеством (вне этого участка изображение размывается). Таким образом, поле зрения объектива — величина несколько неопределенная, так как зависит от того, что считать „удовлетворительным“ изображением. Кроме того, даже при вполне определенных требованиях к качеству изображения, мы можем изменять поле зрения, меняя диаметр действующей диафрагмы. Действительно, диафрагмируя объектив, мы сужаем пучки лучей и в известных пределах можем улучшить качество изображения и увеличить область хорошего изображения. Не нужно забывать, что диафрагмирование объектива имеет и отрицательную сторону, т. е. приводит к падению освещенности, следовательно

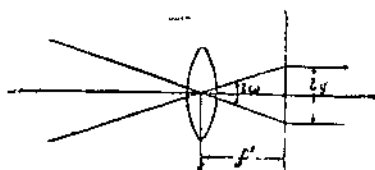


Рис. 328

увеличивает время экспозиции, что не всегда допустимо. При диафрагмировании уменьшается также разрешающая способность объектива (см. ниже), а при очень малых размерах отверстия (меньше 1 мм) начинают сказываться дифракционные явления, которые могут испортить всю картину.

В современных широкоугольных фотообъективах получается весьма большое поле зрения (до 100°). При этом начинают сказываться такие отрицательные явления, как сильное падение освещенности на краю снимка, виньетирование и пр. Светосила таких объективов обычно невелика.

Заметим, что линейное поле зрения, т. е. диаметр круга в плоскости снимка с удовлетворительным качеством, обычно не превышает фокусного расстояния объектива.

§ 7. Аберрации фотографических объективов

Как и всякая оптическая система, фотографический объектив обладает так называемыми остаточными аберрациями.

Аберрации оптических систем подробно рассмотрены выше (I, гл. 2, § 8 и 9). Здесь мы ограничимся некоторыми сведениями об аберрациях фотообъективов.

Сферическая аберрация (см. I, гл. 2, § 8). На рис. 329а представлен ход лучей, а на рис. 329б — графики сферической аберрации, продольной и поперечной, одного из распространенных объективов типа Тессар. По оси ординат откладывается высота входа луча в систему, по оси абсцисс — величина аберрации.

Графики показывают, что данный фотообъектив немного переисправлен* в отношении продольной сферической аберрации на краю отверстия и недо-

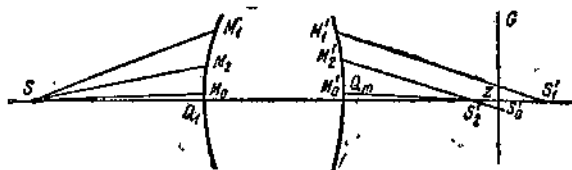


Рис. 329а

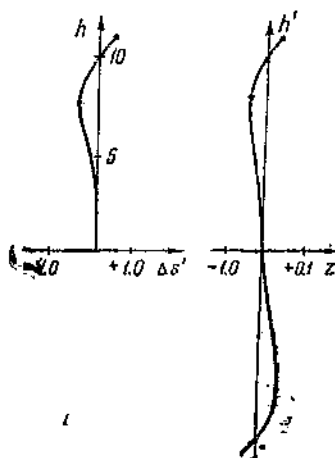


Рис. 329б

исправлен на зоне отверстия. Величина продольной сферической аберрации не превышает 0,6 мм на зоне, при фокусе объектива, равном 100 мм.

* Об этих терминах см. выше I, гл. 2, § 8.

Наличие продольной сферической aberrации приводит к тому, что изображение точки, даваемое объективом, не будет точкой, а некоторым кружком рассеяния конечного диаметра, величина которого, очевидно, определяется поперечной сферической aberrацией.

Если продольная сферическая aberrация велика, кружки рассеяния будут иметь больший диаметр, что приводит к уменьшению разрешающей силы фотообъектива и создает фон рассеянного света. Изображение не будет одинаково резко по всему полю. Указанные обстоятельства приводят к требованию особенно тщательного исправления сферической aberrации для фотообъективов.

Практика показала, что для фотообъективов с наиболее употребительными фокусными расстояниями считается допустимым кружок рассеяния диаметром около 0,1 мм. В этом случае величина продольной сферической aberrации для объектива с относительным отверстием 1:4,5 не должна превышать 0,5—0,6 мм для лучей, входящих в объектив на высоте $h = h_{кр} \sqrt{0,5}$, где $h_{кр}$ — высота самого крайнего луча, проходящего через объектив.

Кома и условие синусов (см. I, гл. 2, § 8). Для того, чтобы фотографический объектив мог дать резкое изображение элемента плоскости, перпендикулярного оптической оси, необходимо, чтобы было выполнено условие синусов Аббе. Отступление от условия синусов приводит к тому, что кружки рассеяния, даваемые системой, могут иметь диаметр того же порядка, что и расстояние изображаемой точки от оси системы. В результате изображение рассматриваемого элемента плоскости будет резким только вблизи оптической оси системы.

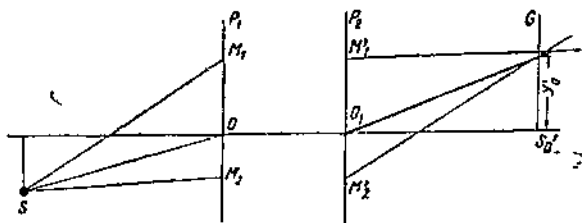


Рис. 330

Как показывает теория aberrаций*, отступление от условия синусов связано с aberrацией комы.

Мы ограничимся рассмотрением так называемой меридиональной комы, для чего рассмотрим сечение пучков лучей, — входящего в систему и выходящего из нее, — плоскостью чертежа (рис. 330). Обозначим через y'_0 высоту пересечения главного луча с фокальной плоскостью объектива и через y'_{+m} и y'_{-m} — высоты пересечения крайних лучей с этой же плоскостью.

Величина aberrации меридиональной комы может быть определена как мера несимметрии пучка лучей относительно главного луча по следующей формуле:

$$k = \frac{y'_{+m} + y'_{-m}}{2} - y'_0.$$

Если пучок лучей симметричен относительно главного луча, то, очевидно, $k = 0$.

Величина комы зависит от угла, образуемого главным лучом с оптической осью объектива, и от ширины пучка, т. е. от высоты пересечения m , входящего в систему лучей с входным зрачком.

Для полной характеристики фотообъектива в отношении комы обычно строят графики зависимости y' от m , для нескольких значений угла, образованного главным лучом с оптической осью.

На рис. 331а представлена такая кривая для объектива Индустар-12 для угла наклона $\alpha_1 = 25^\circ$, соответствующего почти самому краю поля зрения объектива.

Кривая не симметрична относительно точки А, соответствующей главному лучу, что указывает на присутствие значительной комы.

На рис. 331б представлено сильно увеличенное изображение точки, даваемое фотообъективом Индустар-12 для того же наклона, что и кривая на рис. 331а.

* См., например, А. И. Тудоровский [5], стр. 390.

Из рассмотрения этой фотографии видно, что при наличии комы изображение точки не является точкой, а фигурой рассеяния сложного вида. Указанное обстоятельство приводит к сильному уменьшению разрешающей силы объектива для данного наклона, создает сильный фон рассеянного света и делает изображение предмета на краю поля зрения нерезким и искаженным.

Исправление комы объективов является труднейшей задачей и должно производиться особенно тщательно.

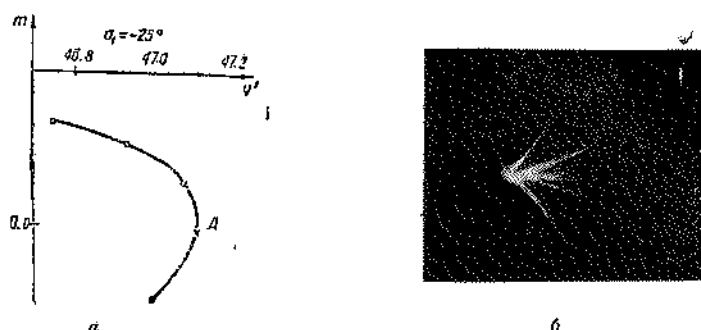


Рис. 331. Изображение точки, даваемое объективом Индустар-12

Для наиболее употребительных объективов остаточная aberrация комы обычно не превышает 0,1 мм.

Астигматизм (см. I, гл. 2, § 8). В фотообъективах aberrация астигматизма проявляется в том, что при определенном положении плоскости наводки получается изображение объектов, расположенных в меридиональной плоскости, тогда как при другом положении резко изображаются объекты, расположенные в сагиттальной плоскости.

Величина астигматизма зависит от угла, образованного осью элементарного лучка лучей с оптической осью фотообъектива. Для характеристики фотообъектива в отношении астигматизма обычно строят график зависимости положения фокусов меридиональных и сагиттальных лучей от угла входа пучка в систему.

На рис. 332 представлены графики астигматизма для двух фотообъективов. Здесь на оси ординат отложены величины угла, по оси абсцисс — расстояние фокусов меридиональных и сагиттальных лучей от гауссовской плоскости. График *a* соответствует фотообъективу, совершенно не исправленному в отношении астигматизма: кривые, определяющие положение фокусов меридиональных и сагиттальных лучей, расходятся с возрастанием угла. График *б* соответствует фотообъективу Индустар-12, у которого астигматизм исправлен для угла $\alpha_1 = 27^\circ$ и доведен до минимальной величины для других значений.

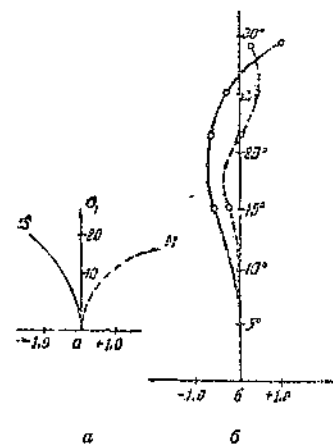


Рис. 332

Фотообъективы с исправленным астигматизмом называются **анастигматами**.

Исправление астигматизма у фотообъективов является чрезвычайно важной задачей для конструктора, так как наличие большого остаточного астигматизма сильно уменьшает разрешающую силу фотообъектива.

Кривизна изображения. Исправление астигматизма еще не обеспечивает получения резкого изображения по всему полю. Исправление астигматизма приводит к тому, что фокусы меридиональных и сагиттальных лучей находятся близко друг от друга и даже совпадают для некоторых наклонов.

При этом, однако, расстояние фокусов меридиональных и сагиттальных лучей от гауссовской плоскости, совпадая между собой по величине, будет иметь различные значения для разных наклонов.

Указанное обстоятельство приводит к тому, что изображение не одинаково резко по всему полю и будет казаться искривленным.

Для того чтобы изображение, даваемое фотообъективом, было плоским, необходимо выполнение условия Петцваля:

$$\sum \frac{\varphi}{n} = 0,$$

где φ — оптическая сила отдельных линз фотообъективов.

Дисторсия (см. I, гл. 2, § 8). Очень важным требованием, предъявляемым к фотографическим объективам, является сохранение полного подобия между объектом и изображением по всему полю, или, как говорят, выполнение условия ортоскопии.

Исправление дисторсии является особенно важным требованием для фотообъективов, предназначенных для аэросъемки и точных геодезических работ. В таких фотообъективах величина дисторсии не должна превышать нескольких сотых процента по всему полю зрения.

Хроматическая aberrация положения изображения может быть исправлена для двух заданных цветов подбором стекол с различными дисперсиями.

Так как обычные фотографические пластинки являются наиболее чувствительными к дальним фиолетовым лучам, в фотообъективах обычно исправляют продольную хроматическую aberrацию для лучей с длиной волны $\lambda = 589,3 \text{ мμ}$ (желтая линия D натрия) и $\lambda = 434,1 \text{ мμ}$ (фиолетовая линия G' водорода).

За последнее время, в связи с появлением фотоматериалов, чувствительных к красным и инфракрасным лучам, появились фотообъективы с хроматизмом, исправленным для длин волн $\lambda = 810 \text{ мμ}$ и $\lambda = 589,3 \text{ мμ}$.

Хроматическая aberrация увеличения сильно уменьшает разрешающую силу фотообъектива, и поэтому должна исправляться особенно тщательно.

Вторичный спектр. Исправление хроматизма для двух заданных цветов; например D и G', не устраняет хроматизма для лучей другой длины волны. Изображение, даваемое объективом, будет все же окрашено по краям.

Указанное явление носит название вторичного спектра.

Развитие цветной фотографии и цветного кино потребовало таких фотообъективов, у которых вторичный спектр доведен до минимума, а хроматизм исправлен для трех цветов.

Объективы с уменьшенным вторичным спектром называются апохроматами.

Вторичный спектр является наиболее трудно устранимой aberrацией. Осуществление фотообъективов-апохроматов требует применения специальных сортов стекла и минералов.

§ 8. Разрешающая сила фотообъективов

Изображение, даваемое объективом, в большей или меньшей степени искажается вследствие дифракции, что сильно усложняет вопрос о качестве изображения.

Как было показано выше (см. I, гл. 1, § 7), теория дифракции дает для минимального расстояния, на котором две точки еще разрешаются фотообъективом, следующее значение:

$$r_1 = 1,22 \frac{\lambda f'}{D}, \quad (8,1)$$

где D — диаметр входного зрачка объектива, f' — его фокусное расстояние.

Для средней части спектра обычно принимается

$$\lambda = 0,000555 \text{ мм};$$

тогда

$$r_1 = 0,000675 \frac{f'}{D} \text{ мм.}$$

Разрешающую силу фотообъектива принято характеризовать числом разрешаемых штрихов на миллиметр длины, оно определяется по формуле:

$$N = \frac{1}{r_1} = \frac{1480}{k}, \quad (8,2)$$

где $k = f : D$ есть величина, обратная относительноному отверстию объектива.

Приведенные формулы выведены в предположении, что фотообъектив не имеет остаточных aberrаций и что рассматриваемые объекты — самосветящиеся.

В реальных фотографических объективах остаточные aberrации достигают обычно значительной величины, поэтому разрешающая сила, даваемая ими, будет ниже разрешающей силы, вычисленной по формуле (8,2).

Для решения очень существенного при конструкции фотографических объективов вопроса о допустимых величинах остаточных aberrаций чрезвычайно важным является измерение разрешающей силы фотообъективов и сопоставление полученных результатов с разрешающей силой, вычисленной по формуле (8,2).

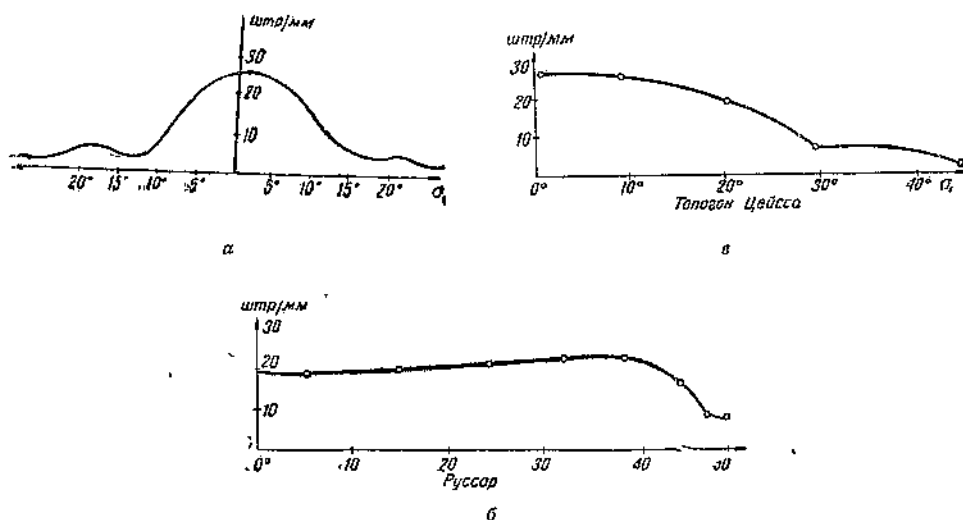


Рис. 333. Зависимость разрешающей силы от угла поля зрения для объективов: а) типа Тессар; б) типа Руссар-19 и в) типа Топогон Цейсса

Исследование разрешающей силы фотообъективов производится с помощью специальных испытательных таблиц. Такие испытательные таблицы либо фотографируются, либо их изображение, полученное в фокальной плоскости фотообъектива, непосредственно рассматривается в микроскоп. При фотографическом способе испытания необходимо учитывать так называемую разрешающую силу светочувствительной эмульсии.

Разрешающая сила фотообъектива довольно сильно зависит от плоскости установки. Обычно в плоскости наилучшей установки, т. е. в плоскости, в которой изображение имеет одинаковую резкость по всему полю, разрешающая сила может оказаться значительно ниже, чем она могла бы быть в центре при установке на наибольшую резкость.

Разрешающая сила довольно быстро уменьшается к краю поля зрения. На рис. 333а представлена кривая разрешающей силы объектива типа Тессар в зависимости от угла поля зрения. Из рассмотрения кривой видно, что разрешающая сила, достигая в центре 25 штрихов на миллиметр, падает до 5 штрихов на краю поля.

Если снизить исправление aberrаций для точки на оси и улучшить при этом исправление aberrаций внеосевых пучков лучей, то разрешающая сила объектива на краю поля может быть повышена за счет некоторого уменьшения разрешающей силы в центре. На рис. 333б и в представлена кривая зависимости разрешающей силы от угла поля зрения для объективов Руссар-19 и Топогон Цейсса. У Топогон

разрешающая сила в центре несколько выше, чем у Руссар-19. При этом, однако, она сильно падает к краю поля зрения для углов наклона, больших 20° . У Руссар-19 разрешающая сила имеет почти одну и ту же величину по всему полю и резко падает для самого края поля зрения при углах наклона, больших 40° .

Оценка качества изображения, даваемого объективом, является трудной и до сих пор мало определенной задачей. Трудности эти обусловлены, во-первых, сложностью распределения освещенностей по дифракционному изображению для точки, лежащей вне оси системы, во-вторых, наличием фона рассеянного света, вызываемого остаточными aberrациями объектива и частично рассеянием света в стекле объектива.

Исследование разрешающей силы объектива, давая некоторые данные о качестве изображения, не может исчерпывающим образом ответить, будет ли изображение удовлетворительным по всему полю.

Для общей оценки качества изображения производится фотографирование особых испытательных таблиц и объектов различной контрастности.

Изучение материалов, полученных таким образом для различных объектов, дает возможность судить о допустимой величине остаточных aberrаций для фотообъективов данного типа.

Нужно, однако, отметить, что, ввиду сложности вопроса, заключения о допустимой величине aberrаций являются часто спорными.

§ 9. Типы фотографических объективов

В настоящее время оптической промышленностью всего мира выпускается большое разнообразие фотографических объективов.

Различные требования, предъявляемые к фотообъективам в зависимости от их назначения, затрудняют их классификацию по какому-либо единому признаку.

В настоящем очень кратком обзоре мы выделим следующие четыре группы фотообъективов: а) универсальные; б) широкоугольные; в) светосильные; г) телеобъективы.

Указанные четыре группы охватывают почти все типы современных фотообъективов, применяемых в аэросъемке, разведке, киносъемке и пр.

а) Универсальные фотообъективы

Группа универсальных фотообъективов является самой обширной группой. Сюда относятся фотообъективы, занимающие среднее положение по отношению к относительному отверстию и углу поля зрения.

Относительное отверстие этих объективов колеблется в пределах 1:7,0 до 1:3,5 при поле зрения $50-60^\circ$.

Фотообъективы этой группы применяются, главным образом, для различных ручных фотокамер, некоторые из них применимы также в аэросъемочных камерах.

Большинство современных универсальных фотообъективов возникло в результате развития анастигмата типа триплет, рассчитанного впервые в 1894 г. Г. Тейлором.

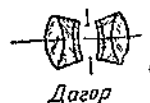
Конструкция этого анастигмата представлена на рис. 334; несмотря на простоту (всего три линзы), в указанном объективе возможно исправить все пять aberrаций. Объективы этого типа завоевали широкую популярность и изготовляются под различными названиями мировой оптической промышленностью до настоящего времени.

В 1902 г. фирмой К. Цейсс по расчету Рудольфа был выпущен объектив типа Тессар (рис. 335), являющийся триплетом, у которого последняя простая линза заменена двойной склеенной. Такое усложнение конструкции триплета дало возможность улучшить исправления aberrаций и позволило увеличить относительное отверстие и поле зрения. Фотообъективы типа Тессар получили чрезвычайно большое распространение.

До настоящего времени объективы этого типа с относительным отверстием $1:4,5$ — $1:5$ с фокусным расстоянием 200—700 мм при поле зрения до 50° применяются как аэросъемочные и находятся на вооружении почти всех армий.

В больших количествах объективы этого типа применяются для ручных камер (например, для камеры типа ФЭД—у нас применяют объектив типа Тессар с относительным отверстием $1:3,5$).

Фотообъективы типа Тессар с небольшим относительным отверстием ($1:9$) с успехом применяются как репродукционные.



Дагор

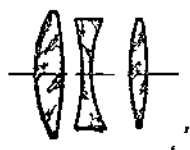


Рис. 334. Объектив типа Триплекс

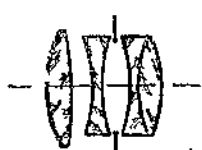


Рис. 335. Объектив типа Тессар

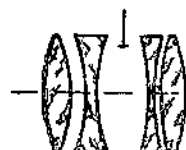


Рис. 336. Объектив типа Целор

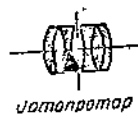


Рис. 337. Объективы типа Дагор и Ортопротар

В 1898 г. фирмой Герц были выпущены фотообъективы типа Целор (рис. 336), которые можно рассматривать как усложненный триплет; указанная конструкция, однако, не дала больших преимуществ по сравнению с простым триплетом. Объективы этого типа получили главное применение для ручных камер.

Большую группу универсальных фотообъективов — анастигматов — составляют симметричные анастигматы.

На рис. 337 представлены схемы фотообъектива типа Дагор с относительным отверстием $1:6,8$ и полем около 60° и фотообъектив типа Ортопротар с относительным отверстием $1:8$ и полем около 60° . Эти объективы состоят из двух совершенно симметричных половинок. Такая конструкция имеет ряд преимуществ и представляет большую выгоду при изготовлении. Очень большое распространение объективы этого типа, однако, не получили.

б) Широкоугольные фотообъективы

К группе широкоугольных фотообъективов относятся фотообъективы с полем зрения, превышающим 70° .

В большинстве случаев объективы этого типа применяются как аэросъемочные.

Для целей аэросъемки величина поля зрения фотообъектива имеет чрезвычайно большое значение, так как чем больше поле объектива, тем меньше снимков нужно делать с данной местности для составления карты, для целей разведки и т. д. Это обстоятельство особенно важно в боевых условиях.

Аэросъемочный фотообъектив должен обладать одновременно большой светосилой (не меньше $1:5$) и иметь большую разрешающую силу. Поэтому конструкция объективов этого типа становится чрезвычайно сложной задачей.

Наиболее простым широкоугольным фотообъективом является фотообъектив Гипергон (рис. 338), рассчитанный Гёгом в 1900 г. Объектив этого типа имеет поле зрения около 140° , но так как сферическая абберация и хроматизм его не исправлены, относительное отверстие не превышает $1:30$.

В качестве широкоугольных фотообъективов с полем зрения 80 — 85° и относительным отверстием $1:9$ — $1:12$ применяются объективы типа Дагор (рис. 337).

Большую группу широкоугольных объективов с относительным отверстием $1:4$ — $1:4,5$ составляют объективы типа Экспресс Росса.

Схема объектива этого типа с относительным отверстием $1:5$ и полем около 70° дана на рис. 339.

Конструкция этого типа явилась исходной для целого ряда аэросъемочных объективов с относительным отверстием 1:3,5—1:4 и полем около 60—70°.

Очень большую группу широкоугольных фотообъективов с относительным отверстием 1:6,3 и полем до 100° составляют объективы типа Топогон (рис. 340).

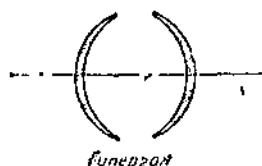


Рис. 338. Объектив Гипергон

Объективы этого типа получили большое распространение как аэросъемочные и явились исходным типом для целого ряда широкоугольных фотообъективов, рассчитанных за последние годы.

Большой интерес представляют широкоугольные объективы, рассчитанные Русиновым; на рис. 341а представлены схемы двух объективов: Руссар-19 и Руссар-25.



Рис. 339. Объектив Экспресс

Объективы эти, имея оригинальную конструкцию, обладают рядом преимуществ по сравнению с существующими до сих пор типами объективов.

Как указывалось в § 3, большим затруднением при конструкции широкоугольных объективов является быстрое падение освещенности изображения к краю поля зрения.

Русинову * удалось в своих объективах уменьшить падение освещенности к краю поля зрения, вследствие чего увеличилась их эффективная светосила. Интересной особенностью объективов, рассчитанной Русиновым, является характер исправления аберраций. Особое внимание обращается на исправление аберраций внеосевых пучков, что достигается за счет некоторого ухудшения исправлений аберраций для точки на оси.

На рис. 341б представлены кривые остаточных аберраций для объектива Руссар-25. Как видно из чертежа, даже для наклона $\sigma_1 = 50^\circ$ аберрация незначительна.

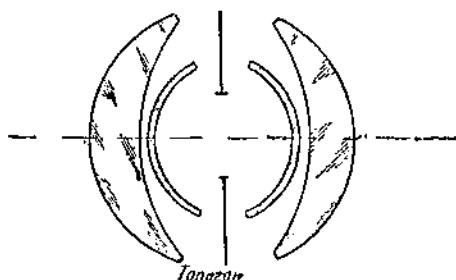


Рис. 340. Объектив типа Топогон

Как указывалось выше, при этом характере исправления аберраций разрешающая сила объектива будет несколько ниже в центре поля зрения, чем у обычных объективов, и выше на краю поля (рис. 333, представляющий зависимость разрешающей силы от угла поля зрения для объектива Руссар-19). Особенно затрудняет расчет широкоугольных фотообъективов требование исправления дисторсии по всему полю зрения.

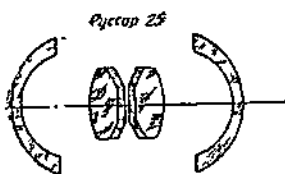
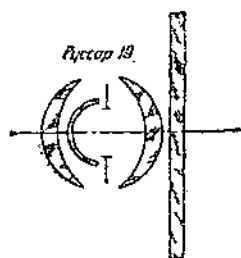


Рис. 341а. Объективы Руссар-19 и Руссар-25

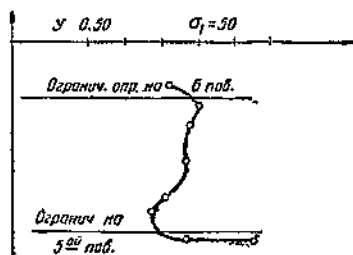


Рис. 341б. Аберрации объектива Руссар-25

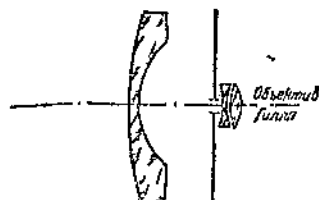


Рис. 342. Объектив Гилля

Выполнение условия ортоскопии усложняет конструкцию фотообъектива и приводит к значительному понижению освещенности на краю поля зрения.

Отказываясь от исправления дисторсии на краю поля зрения, можно было бы

* См. ссылку * на стр. 306.

рассчитать фотообъективы с полем, много превышающим 100° , и достаточно большим относительным отверстием. Применяя затем при печатании снимков увеличитель с дисторсией обратного знака, можно было бы получить очень удовлетворительные результаты.

В качестве примера объектива с неисправленной дисторсией можно указать объектив, рассчитанный Гиллем (рис. 342). Поле зрения этого объектива достигает 180° при относительном отверстии $1:22$. Дисторсия объектива этого типа настолько велика, что на краю поля зрения опознать контуры снимаемых предметов затруднительно.

в) Современные светосильные фотообъективы

Первые фотографические объективы обладали очень небольшой светосилой: их относительное отверстие не превышало $1:20$ и $1:18$.

Первым светосильным фотообъективом можно считать фотообъектив Петцваля, появившийся в 1840 г. (рис. 343) и представляющий хорошо исправленную систему для относительного отверстия $1:3,7$, но для небольшого поля зрения. Объективы этого типа получили главное применение для портретных снимков и в качестве портретных применяются до настоящего времени.

Попытки рассчитать светосильный фотообъектив с большим полем зрения не приводили к удовлетворительным результатам до появления новых сортов оптического стекла.

Успешное решение вопроса о производстве новых сортов оптического стекла дало возможность рассчитать целый ряд довольно совершенных фотообъективов с относительным отверстием $1:4$ — $1:4,5$.

Основой для целого ряда типов светосильных объективов являлась оптическая схема анастигмата Тейлора и дальнейшее усовершенствование типа Тессар. В 1913 г. фирма К. Цейсс выпускает тессары с относительным отверстием $1:3,5$.

Между тем развитие кинематографии требует все более и более светосильных фотообъективов для производства киносъемок быстро движущихся предметов и киносъемок в условиях недостаточной освещенности. Появилась также необходимость в светосильных фотообъективах, пригодных для аэрофотографии.

В 1911 г. М. Рор рассчитывает первый сверхсветосильный объектив с относительным отверстием $1:1,8$. Этот объектив не получил, однако, распространения вследствие недостаточно хорошего исправления дисторсии и астигматизма.

Первым особо светосильным объективом, получившим распространение, является Эрностар (рис. 344), рассчитанный Бертеле по усложненной схеме триплета, имевшей относительное отверстие $1:2$ и поле зрения около 45° . Этот объектив послужил исходным для целого ряда светосильных объективов, рассчитанных различными авторами.

В 1927 г. Мерте рассчитывает фотообъектив Биотар с относительным отверстием $1:1,4$ (рис. 345).

В последние годы появился ряд киносъемочных фотообъективов с относительным отверстием $1:1,0$ — $1:0,85$.

Увеличение светосилы фотообъективов приводит к определенным трудностям при исправлении аберраций, что сильно усложняет конструкцию объективов, увеличивая число линз и поверхностей, граничащих с воздухом.

Указанное обстоятельство сильно увеличивает потери света на поглощение в стекле и на отражение на поверхностях, граничащих с воздухом, что в сильной степени снижает так называемую эффективную физическую светосилу объектива.



Рис. 343. Объектив Петцваля

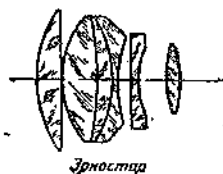


Рис. 344. Объектив Эрностар

Следующая таблица наглядно показывает уменьшение эффективной светосилы для фотообъективов разного относительного отверстия*.

Таблица 55

Тип	Относительное отверстие	Эффективная светосила
Тессар	1 : 4,5	1 : 28,0
Эристар	1 : 2,0	1 : 6,8
Биотар	1 : 1,4	1 : 3,92
Ксепон	1 : 1,2	1 : 3,45
Тахон	1 : 0,95	1 : 2,4

Из рассмотрения приведенной таблицы вытекает, что дальнейшее увеличение светосилы фотообъективов является нецелесообразным.

г) Телеобъективы

Как было установлено в § 2, масштаб изображения, даваемого фотообъективом, зависит от величины фокусного расстояния объектива.

Для получения фотоснимков очень удаленных предметов в крупном масштабе нужно иметь очень длиннофокусные объективы.

Однако с увеличением фокусного расстояния фотообъектива сильно возрастает длина объектива и увеличивается последний отрезок (т. е. расстояние от последней поверхности фотообъектива до светочувствительной пластинки). Перечислен-

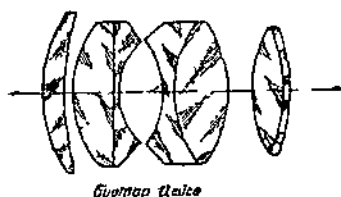


Рис. 345. Фотообъектив Биотар

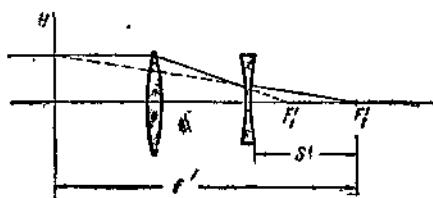


Рис. 346. Принципиальная схема телеобъектива

ные обстоятельства затрудняют конструкцию фотокамер и делают очень затруднительным применение обычных фотообъективов с фокусным расстоянием большим 1000 мм.

Для фотографирования удаленных предметов в крупном масштабе сконструированы особые фотообъективы, получившие название телеобъективов. У объективов этого типа величина последнего отрезка значительно меньше фокусного расстояния (в 2—3 раза), причем длина объектива обычно не превышает 0,5—0,75 фокусного расстояния. Относительное отверстие телеобъектива не превышает 1 : 4,5, а поле зрения 30°. При этом конструкция их довольно сложна.

Всякий телеобъектив состоит, как правило, из двух компонентов — положительного и отрицательного, разделенных воздушным промежутком.

Для иллюстрации принципа устройства телеобъектива на рис. 346 представлена система, состоящая из положительной и отрицательной линзы, разделенных воздушным промежутком. Как видно из рисунка, в этом случае вторая главная плоскость находится впереди системы и величина f' значительно больше последнего отрезка.

* Таблица взята из статьи В. А. Петрова, Относительное отверстие и эффективная светосила современных светосильных фотообъективов, Журнал кинофотохим. пром., № 6, стр. 3, 1940.

Отношение величин фокусного расстояния объектива к последнему отрезку называется телеувеличением объектива:

$$\Gamma = \frac{f'}{s'}$$

Для современных телеобъективов телеувеличение редко превышает трехкратное, так как при больших телеувеличениях очень трудно получить удовлетворительное исправление аберраций.

За последние годы телеобъективы нашли широкое применение для аэрофото- съемки и различных специальных приборов.

§ 10. Советские фотообъективы

В настоящее время советская оптическая промышленность производит все типы фотообъективов, необходимые для основных целей.

По качеству советские фотообъективы в среднем не уступают заграничным образцам, причем имеются вполне оригинальные конструкции.

Первые советские фотообъективы предназначались, главным образом, для руч- ных камер и представляли собой анастигматы типа Триплет и Тессар. Особенно большое распространение получили объектив Инду- стар $f' = 50$ с относительным отверстием 1:3,5, применяемый в фотокамерах Пионер и ФЭД, и объ- ектив Ортогон для фотокамеры Фотокор. Схема этих объективов приведена на рис. 347.

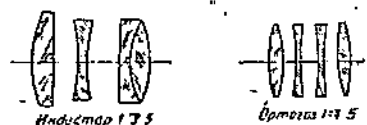


Рис. 347.

Объективы Индустар-10 и Ортогон

В последующие годы был выпущен целый ряд фотообъективов Индустар для самых разнообраз- ных целей. Объективы эти изготовлялись целиком из советского оптического стекла и по качеству даваемого изображения не уступали заграничным образцам. Был рассчитан ряд светосильных объективов, предназначенных для киносъемки, аэросъемочных объ- ективов, телеобъективов. Большинство из рассчитанных объективов выпускается под разными названиями нашей промышленностью.

Среди этих объективов следует упомянуть объективы типа Арктик, Уран и Орион, последние образцы которых в некоторых отношениях превосходят аналогичные заграничные образцы.

Глава 13

ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

§ 1. Основы фотографического процесса. § 2. Фотометрические свойства фотогра- фируемого объекта. § 3. Фотографические материалы. § 4. Элементы устройства фотографического аппарата. § 5. Съемочный процесс. § 6. Негативный процесс. § 7. Позитивный процесс. § 8. Аэрофотография.

§ 1. Основы фотографического процесса

§ 1. Фотографический процесс, в современном его виде, состоит из двух стадий:

1) под действием света в светочувствительном слое образуется невидимое про- стым глазом скрытое изображение;

2) в результате химического действия растворов некоторых веществ это скры- тое изображение становится видимым — проявляется.

Физическая сущность процесса образования скрытого изображения в основных чертах была выяснена лишь в последние годы и в настоящее время представляется следующим образом,

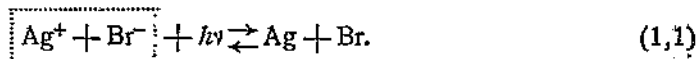
Светочувствительный слой всех современных фотографических материалов (за очень немногими исключениями) состоит из бромистого серебра, содержащего обычно примесь иодистого и иногда хлористого серебра. Бромистое серебро, в виде мельчайших кристалликов (поперечником 0,1—3 μ), вкрапленное в желатину, образует так называемую фотографическую эмульсию, покрывающую тонким слоем целлулоидную пленку, стекло, бумагу или какую-либо иную подложку (рис. 348).

Свет, попадая в светочувствительный слой, поглощается кристалликами галогенного серебра и рассеивается ими. Поглощение света настолько сильно, что лишь верхние слои галогеносеребряных зерен оказываются затронутыми светом (рис. 349).

Химические изменения, которые происходят в галогенном серебре под действием света, обуславливают возможность существования фотографии. Эти изменения состоят в том, что кванты света, соответствующие длинам волн, лежащим в пределах полосы поглощения бромистого серебра, поглощаются этим последним. Бромистое серебро представляет собой кристалл с ионной кристаллической решеткой.

Известно, что поглощение иона серебра лежит в области значительно более коротких длин волн. Следовательно, поглощающим элементом кристалла является ион брома. На это указывает и сдвиг длинноволновой границы поглощения различных галогенных солей серебра (AgCl , AgBr , AgI) в сторону больших длин волн, аналогично тому, как это имеет место у соответствующих элементов галогенов.

Поглощение кванта ионом галогена сопровождается отщеплением от него электрона, переходом его к иону серебра и образованием атома серебра по уравнению



Образующиеся атомы брома частично диффундируют к поверхности кристалла и улетучиваются, на что указывает наблюдающееся уменьшение веса кристаллов AgBr после освещения.

Окружающая кристаллики бромистого серебра желатина связывает выделяющиеся под действием света атомы брома и, осуществляя таким образом сдвиг равновесия в реакции (1,1) в сторону образования серебра, существенно повышает светочувствительность фотографического слоя.

С помощью некоторого процесса, происходящего внутри кристалла и состоящего, повидимому, в обмене электронами между элементами кристаллической решетки (на что указывает существование внутреннего фотоэффекта, т. е. повышения электропроводности кристаллов AgNaI при освещении), атомы серебра соединяются между собой, образуя коллоидные частицы металлического серебра. Эти частицы и служат, повидимому, центрами скрытого изображения. Они образуются тем легче, чем больше в освещаемом кристалле трещин, инородных вкраплений и иных нарушений кристаллической решетки. Эти нарушения создаются

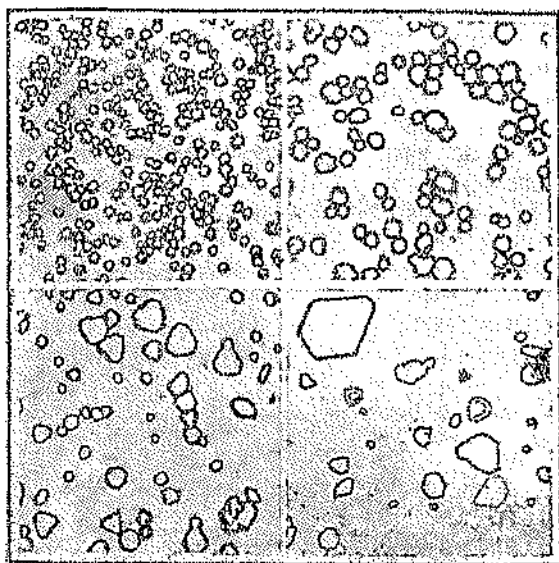


Рис. 348. Последовательный рост кристаллов бромистого серебра при созревании фотографической эмульсии. Микрофотографии сделаны с линейным увеличением в 2500 раз

синкристаллизующимися с бромистым серебром вкраплениями из AgI , Ag_2S и Ag , образующимися за счет иодистого серебра и желатинны, присутствующих в растворе, а также за счет химического восстановления бромистого серебра желатиной в процессе второго созревания.

Таким образом, чем более „дефектна“ кристаллическая решетка бромистого серебра, тем оно светочувствительнее. Все искусство приготовления фотографических эмульсий (§ 3) состоит в умении регулировать процесс синтеза таким образом, чтобы комбинация индивидуальных свойств эмульсионных кристалликов бромистого серебра и их совокупности создавала фотографический слой с нужными характеристиками.

Каждый квант поглощенного света образует в поглотившем его кристалле один свободный атом серебра. Эти атомы, как сказано, соединяются в коллоидные частицы серебра, образующие „скрытое“, или так называемое „латентное“ фотографическое изображение. Так как коллоидная частица скрытого изображения состоит из многих атомов, то „квантовый выход“ для скрытого изображения (т. е. отношение числа образованных частиц к числу поглощенных квантов) всегда меньше единицы. Чем меньше число квантов, необходимых для образования одного центра скрытого изображения, тем чувствительнее фотографический слой.

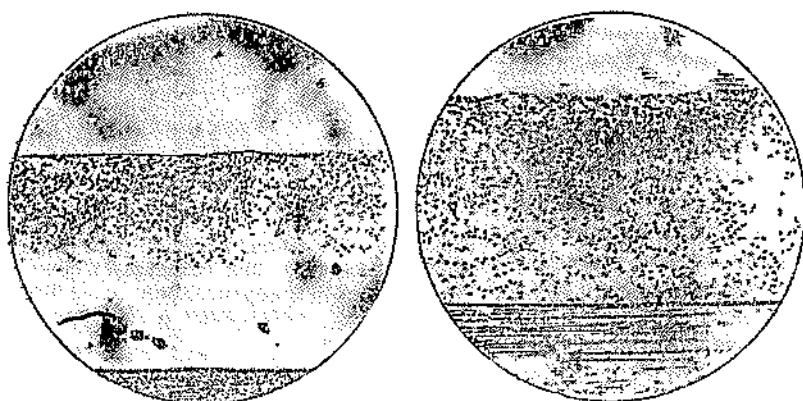


Рис. 349. Поперечный разрез проявленного эмульсионного слоя при разных временах проявления. Увеличение 500

В настоящее время наличие в галоидо-серебряном зерне фотографического слоя центра скрытого изображения устанавливается только путем фотографического проявления. Известно, что при действии на освещавшийся эмульсионный слой растворов, содержащих некоторые восстанавливающие (проявляющие) вещества, галоидо-серебряные кристаллы, содержащие образованные светом центры скрытого изображения, очень быстро (в течение нескольких минут) полностью восстанавливаются в металлическое серебро, образуя „видимое изображение“. Кристаллы же, этих центров не содержащие, восстанавливаются значительно медленнее и никогда не восстанавливаются полностью. Возникающие в этом последнем случае почернения никогда не доходят до предельной величины, достигаемой в местах, подвергшихся освещению. Это почернение называется фотографической вуалью.

Процесс проявления есть сложная совокупность химических реакций, главной из которых является реакция восстановления ионов серебра (Ag^+) в атомы серебра (Ag). Это восстановление осуществляется не любым восстанавливающим веществом, а лишь некоторыми из них (так называемыми проявителями), которые отличаются свойством быстро восстанавливать только те кристаллики бромистого серебра, в которых имеются центры скрытого изображения. Процесс проявления начинается в какой-либо точке на поверхности эмульсионного кристаллика и постепенно распространяется от него по всей его поверхности. При этом процессе, раз начавшись, развивается до тех пор, пока весь кристаллик бромистого серебра не превратится в металлическое серебро (см. рис. 350а и б).

В это же время идет процесс восстановления зерен, не содержащих центров скрытого изображения, — процесс образования фотографической вуали. Однако скорость этого процесса много меньше скорости проявления, и потому к моменту окончания проявления вуаль обычно не успевает еще достичь значительной величины. Все же даже сколько-нибудь заметное почернение в неосвещенных местах негатива нежелательно, так как понижает контраст и ухудшает передачу деталей в теневых участках изображения. Поэтому проявляющее вещество считается тем лучше, чем с большей разницей скоростей восстанавливает оно освещенное и неосвещенное бромистое серебро. Этим избирательным действием обладают далеко не все восстановители. Оно свойственно диаминофенолам, диаминам, аминам, аминам и их галондпроизводным.

Интересно, что даже для этих соединений не безразлична структура их молекулы. Так, соединения, имеющие в бензольном кольце оксин или аминогруппы в метаположении, не пригодны в качестве проявляющих веществ. Здесь необходимо отметить то исключительное значение, которое имеет зернистая структура эмульсии. Действительно, если бы светочувствительный слой состоял из сплошной массы бромистого серебра, то при наличии в какой-либо его точке центра проявления весь слой под действием проявителя превращался бы в равномерный слой металлического серебра. Различие почернений на фотографической пластинке, образующее фотографическое изображение, оказывается возможным только потому, что количество затронутых светом, а следовательно, и проявленных зерен в разных местах пластинки неодинаково.

Таким образом, фотографическое изображение всегда есть результат совокупного действия света и проявления. Зернистая структура эмульсии, а также скрытого и проявленного изображения, обуславливает ряд свойств фотографического изображения, излагаемых ниже. Это обстоятельство усложняет установление количественных закономерностей в фотографии. Оно в значительной степени объясняет недостаточное понимание физико-химических основ фотографии даже теперь, несмотря на вековое ее существование (1839 г.) и громадные прак-

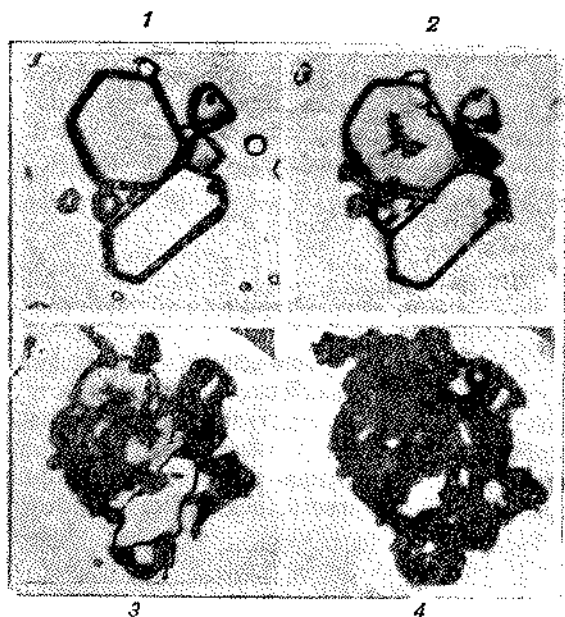


Рис. 350а. Различные стадии проявления эмульсионных зерен:

1 — до проявления; 2—4 — во время проявления метол-гидрохиноновым проявителем; промежуток времени между снимками 3 мин. Увеличение 2750

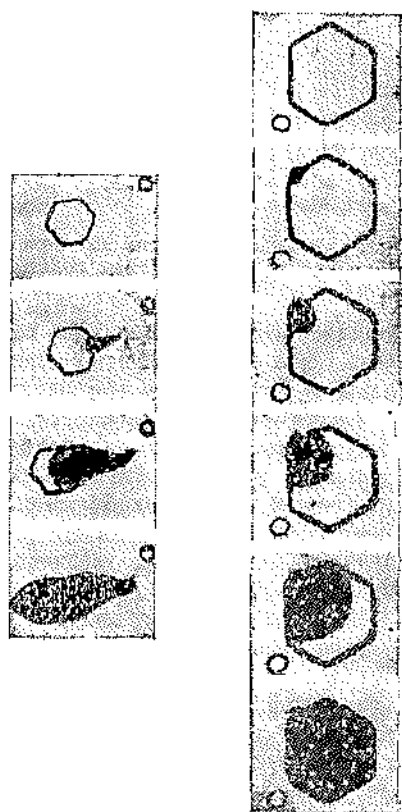


Рис. 350б. Различные стадии медленного проявления

тические успехи.

По окончании проявления оставшееся невосстановленным бромистое серебро удаляется из слоя растворением в гипосульфите натрия или аммония ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Если образовавшиеся при этом двойные соли гипосульфита натрия и серебра достаточно полно удаляются последующей промывкой, то фотографическое изображение может сохраняться неизменным, по крайней мере, в течение нескольких десятков лет.

§ 2. Фотометрические свойства фотографируемого объекта

Свойства фотографического изображения в сильнейшей степени зависят от геометрических и физических свойств действующего светового пучка. Если первые зависят почти исключительно от фотографического аппарата, и притом преимущественно от свойств объектива, то на вторые оказывают влияние многочисленные, внешние по отношению к фотоаппарату факторы. Это прежде всего сила и спектральный состав света, освещающего фотографируемый объект, далее оптические

свойства самого объекта и, наконец, оптические свойства среды, находящейся между объектом и фотографическим аппаратом.

Из физических характеристик фотографического действующего света наибольшее значение имеют его интенсивность и спектральный состав.

В большинстве случаев, в особенности же для военных целей, источником света при фотографировании является солнце. Значение величин освещенности, создаваемой на земной поверхности солнцем при безоблачном небе (так называемая „солнечная освещенность“) в зависимости от времени года, широты местности и часа дня, могут быть получены на номограмме, представленной на рис. 351.

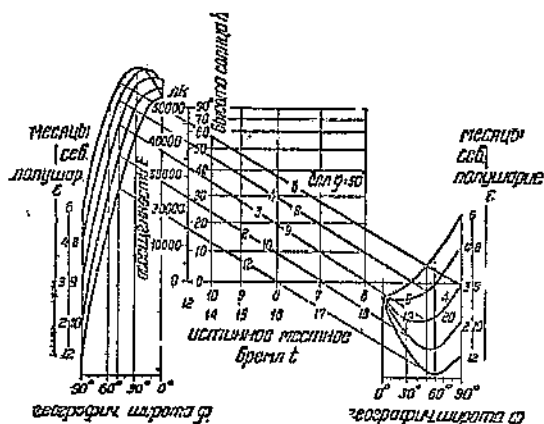


Рис. 351. График зависимости солнечной освещенности от высоты солнца h

Наличие облаков на небе и характер облачности весьма сильно меняют освещенность. Это непостоянство освещенности фотографируемых объектов создает наибольшее затруднение при решении вопроса о выборе правильной экспозиции.

Также сильно изменяется, в зависимости от метеорологических факторов, и спектральный состав дневного света, представление о котором дает кривая спектрального распределения энергии в прямых лучах солнца на поверхности земли (по данным Муна), изображенная на рис. 352.

Кривые α и β на том же рисунке дают представление о возможном колебании, спектрального состава дневного света в зависимости от изменения метеорологических условий*.

В объектив фотографического аппарата попадает свет, отраженный фотографируемым объектом. Так как коэффициенты отражения от различных участков, „деталей“, объекта различны, то и яркость этих участков также различна. Если, к тому же, предметы окрашены, т. е. коэффициенты отражения неодинаковы для различных длин волн, то спектральный состав отраженного объектом света будет отличаться от спектрального состава света, его освещающего, и будет иным в разных участках снимаемого объекта.

* См.: М. Севастьянова, Спектральный состав дневного света, Изв. АН СССР, серия географич., № 4, 1942.

Человеческий глаз способен различать предметы по их яркости и цвету. Фотографический снимок передает предметы только вариациями яркости. Поэтому два разноцветных, но одинаково ярких, предмета будут переданы на снимке одинаковым почернением, если только фотографическое действие световых потоков различного спектрального состава будет одинаковым. В действительности это почти никогда не имеет места. Поэтому соотношение почернений на фотографической пластинке будет зависеть не только от соотношения яркостей деталей объекта, но и от их цвета.

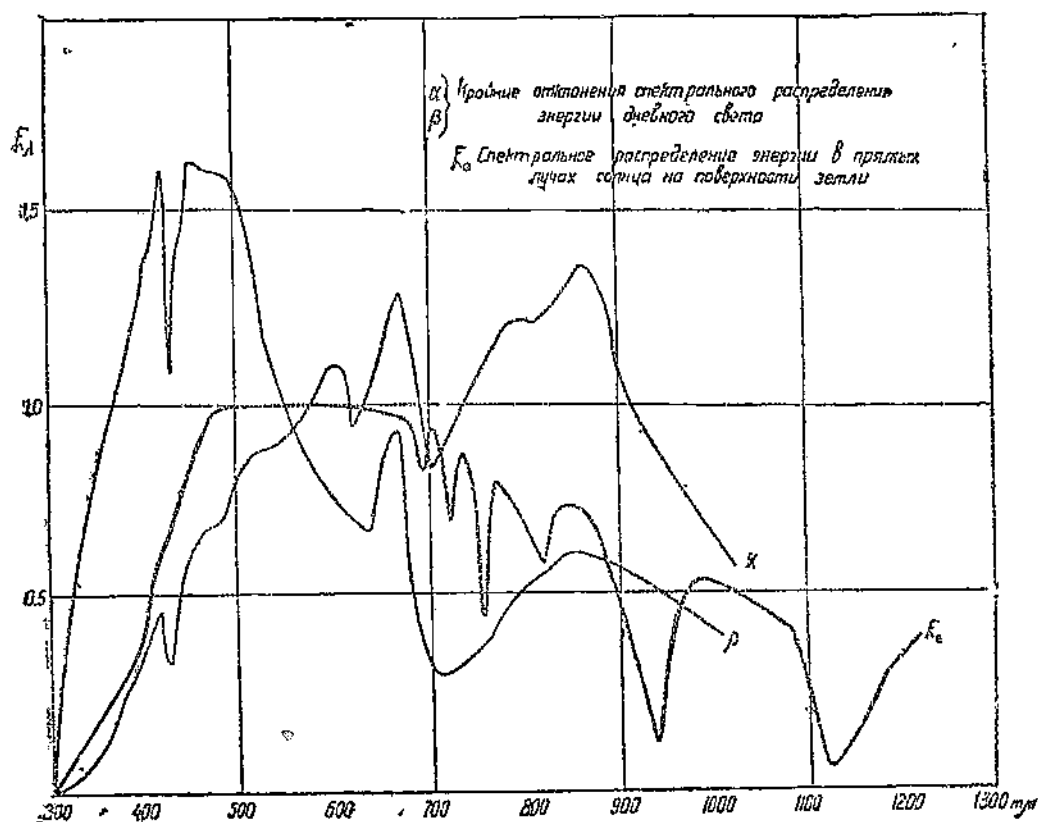


Рис. 352. Спектральный состав дневного света

Интервал почернений, в пределах которого возможна раздельная фотографическая передача деталей яркости объекта, невелик. Поэтому интервал яркостей объекта должен учитываться при фотографировании, если не хотят потерять части деталей в изображении. Обычно в открытом ландшафте, а это — объект в военной фотографии наиболее частый, отношение яркости наиболее светлого участка к яркости наиболее темного не превосходит отношения 100:1, если только в ландшафте нет сильно затененных мест, вроде входов в пещеры, блиндажей, амбразур, глубоких ворот и т. п. Для ландшафтов, содержащих наряду с небом предметы, находящиеся в глубокой тени или внутри помещений, отношение яркостей может достигнуть 1 000 000:1. К числу подобных ландшафтов относится также и внутренность леса, освещенного солнцем. При плановом фотографировании с самолета интервал яркости объектов ландшафта значительно меньше, чем при фотографировании на земле. Даже для зимнего ландшафта он редко достигает отношения 10:1, для летнего же он редко бывает больше чем 6:1.

В табл. 56 мы приводим некоторые данные об интервалах яркостей для различных объектов съемки.

Таблица 56

	Средняя широта
Ландшафт без переднего плана при солнце	1:40
Ландшафт без переднего плана при рассеянном свете	1:10
Аэроснимки	1:10
Напечатанные рисунки, гравюры и т. п.	1:8
Ландшафт с передним планом при солнце	1:60
Ландшафт с просветами солнца	1:200
Светлая внутренность помещения с окном	1:500
Темная внутренность помещения с окном	1:100 000

Что касается спектрального состава отраженного от различных объектов света, то здесь, разумеется, разнообразие так же велико, как велико разнообразие цветов природных и искусственных объектов.

Как было уже сказано, атмосфера, заполняющая пространство между фотографируемым объектом и фотоаппаратом, не остается без влияния на световой поток, а следовательно, и на свойства изображения. Это влияние проявляется в виде воздушной дымки, представляющей собой рассеяние света частицами пыли и влаги, взвешенными в атмосфере. Известно, что даже молекулы воздуха рассеивают свет. Закон этого рассеяния формулирован Рэлеем и выражается формулой

$$B = B_0 \frac{K}{\lambda^4},$$

где B — яркость пучка рассеянного света, B_0 — яркость пучка света, падающего на рассеивающую среду, K — коэффициент пропорциональности и λ — длина волны рассеиваемого света (см. выше I, гл. 9, 3).

Из формулы следует, что чем меньше длина световой волны, тем сильнее будет рассеиваться свет. Следовательно, ультрафиолетовые лучи рассеиваются сильнее, чем видимые, из видимых сильнее всего рассеиваются фиолетовые и синие и слабее всего красные, еще менее рассеиваются инфракрасные лучи. Из той же формулы следует, что чем длиннее световая волна, тем большую толщу воздуха может пройти свет при одинаковой величине рассеяния. Преимущественным рассеянием сине-голубых лучей солнечного спектра в толще земной атмосферы объясняется голубой цвет неба. Нужно заметить, что частицы пыли и влаги, которыми обязана своим происхождением воздушная дымка, крупнее тех частиц, для которых закон Рэлея должен строго выполняться, и потому интенсивность рассеянного дымкой света в действительности обратно пропорциональна не λ^4 , а λ^α , где $1 < \alpha < 4$; α тем меньше, чем крупнее частицы. Когда частицы становятся крупнее некоторой величины (мгла, туман), закон Рэлея перестает действовать, и рассеяние света всех длин волн становится одинаковым.

Атмосферная дымка как бы светится голубоватым светом, и это свечение производит значительное снижение контраста объекта, так как, не повышая яркости светлых мест, оно существенно повышает яркость мест темных. Чем толще атмосферный слой между объектом и фотоаппаратом, тем сильнее свечение дымки, причем яркость ее может в конце концов сравняться с яркостью светлых мест объекта и тогда детали яркости объекта станут совершенно неразличимы; как говорят, контраст его станет равным нулю, и съемка станет бессмысленной. Это явление имеет, очевидно, особенно большое значение при фотографировании с больших высот и расстояний. Рассмотрение свойств дымки как метеорологического явления увело бы нас слишком далеко. Существенно только отметить, что дымка в горизонтальном направлении сильнее, чем в вертикальном, и потому влияние ее при наземной съемке значительнее. При съемке на небольших расстояниях и с небольших высот (до 2—3 км) влиянием дымки можно пренебречь.

Существенное значение при съемке сквозь большие толщи воздуха имеет также явление „турбулентности“, т. е. неоднородность плотности воздуха по всей его толще. Это явление происходит вследствие неравномерного нагревания прилежащих к нагретой солнцем земле слоев воздуха и недостаточного перемешивания потоков воздуха различной температуры. Проявляется оно в кажущемся дрожании наблю-

даемых или фотографируемых предметов и притом тем сильнее, чем больше фокусное расстояние объектива и его диаметр. Особенно неприятно сказывается оно в размывании контуров изображения при фотографировании на далеких расстояниях.

§ 3. Фотографические материалы

Светочувствительным веществом в современных фотографических материалах всегда служит галлоидное серебро, по большей части бромистое с примесью иоди-стого, иногда хлористого, реже (в специальных сортах бумаг)—хлористое.

Суспензия мельчайших кристалликов галлоидного серебра в растворе желатинны (так называемая фотографическая эмульсия) наносится тонким слоем на стекло, целлулоид, бумагу и т. п. и по высыхании образует светочувствительный (или, как иногда говорят, „эмульсионный“) слой. В этом слое кристаллики бромистого серебра (обычно в виде шестигугольных тонких пластинок) располагаются одни над другими в несколько десятков слоев (при общей толщине его, изменяющейся в зависимости от сорта материала от 0,03 до 0,1 мм). Микрофотография препарата фотографической эмульсии была представлена на рис. 348. Это „зернистое“ строение фотографической эмульсии имеет чрезвычайно большое значение и с ним связаны многие особенности фотографических методов и свойств фотографического изображения. Способ приготовления фотографической эмульсии состоит в следующем. Аммиачный раствор азотнокислого серебра смешивается с раствором бромистого калия в желатине и после непродолжительного прогревания (процесс „первого созревания“) застуживается. Куски застуженной эмульсии промываются водой до тех пор, пока образующиеся в результате реакции соли и аммиак не будут удалены из эмульсии. После этого эмульсия расплавляется, некоторое время выдерживается при повышенной температуре („второе созревание“) и поливается на подложку. Роль желатинны в эмульсии не ограничивается ролью связующей среды. В первом созревании она регулирует рост кристалликов бромистого серебра, во втором—химически сенсibiliзирует эмульсию, повышая ее чувствительность. Свойства фотографического материала определяются рецептурой и режимом синтеза эмульсии. В этом сложном процессе конечный результат зависит от разнообразных факторов, многие из которых вообще еще недостаточно точно установлены; варьируя в нем условия синтеза, удается получить значительное разнообразие фотографических свойств материалов.

Количественная оценка этих свойств составляет предмет сенситометрии и состоит в установлении связи между количеством излучения, упавшим на некоторый участок светочувствительного слоя, и почернением, получающимся в этом месте, после проявления.

Количество света, падающее на различные участки оптического изображения, проектируемого объективом на светочувствительный слой, пропорционально яркостям соответствующих мест фотографируемого предмета. Если бы почернения были пропорциональны этим количествам, то закон фотографического почернения был бы очень прост. В действительности дело обстоит много сложнее.

Осветим различные участки светочувствительного слоя различными количествами света, или, как говорят, подвергнем их различным экспозициям. Будем измерять экспозиции произведением из освещенности на фотографическом слое, выраженной в люксах, на время действия света, в секундах (люкс-секунды). После проявления получим на соответствующих местах различные почернения. Мерой почернения выберем логарифмы величины, обратной пропусканию T , т. е.

$D = \lg \frac{1}{T}$. Величину D будем называть оптической плотностью. Обычная форма кривой, выражающей зависимость плотности проявленного фотографического изображения от логарифмов экспозиций, показана на рис. 353. Эта кривая носит название характеристической кривой светочувствительного слоя и количественно выражает все его основные свойства.

Из рассмотрения кривой следует, что в прямолинейном участке BC имеет место пропорциональность между фотографическим почернением и количеством упавшего на пластинку света. В участках же AB („область недодержек“) и CD („область передержек“) приращения плотностей меньше, чем приращения экспозиций. Интервал освещенностей (при одинаковой продолжительности экспозиций, как это имеет место в практике фотографии) EF , передаваемых на слое пропорциональным почернением, называется шириной фотографического материала. Плотность в точке A

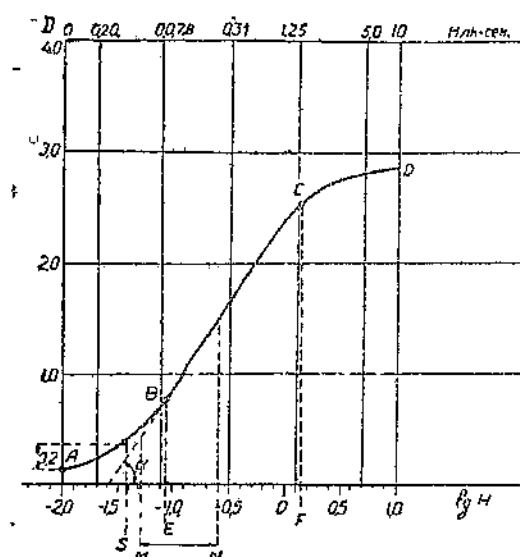


Рис. 353. Характеристическая кривая

(не зависящая от экспозиции) соответствует значению вуали D_0 и зависит от длительности проявления. Тангенс угла α , образуемого продолжением прямолинейного участка характеристической кривой и осью абсцисс, обозначается буквой γ (гамма) и носит название фактора контраста, или фактора проявления. Очевидно, что чем больше γ , тем большая разность плотностей соответствует одинаковой разности освещенности слоя. Максимальная разность плотностей на данном снимке называется его контрастом. Следовательно, контраст тем больше, чем больше γ . Чем больше контраст, тем более различаемы будут детали яркости объекта на снимке. Величина γ для данного материала зависит от длительности проявления и характеризует последнее. Светочувствительность фотографического материала S выражается величиной, обратной количеству освещения (в люкс-секундах), необходимому для того, чтобы вызвать почернение на слое, по плотности превышающее плотность вуали на 0,2. Числовые характеристики свойств нескольких советских фотографических материалов (преимущественно кино- и аэроплёнок) приведены в табл. 57.

Зная характеристическую кривую фотографического материала и указанные ее числовые характеристики, мы можем правильно выбрать сорт его, наилучшим образом отвечающий условиям съемки, правильно экспонировать и проявить материал и т. п. Пусть интервал яркостей фотографируемого объекта будет 5:1, т. е. в логарифмическом масштабе 0,7; на рис. 353 он будет изображаться длиной отрезка MN . Освещенность, создаваемая на светочувствительном слое светом, отраженным от самого темного участка объекта при данной продолжительности экспози-

ции, необходимому для того, чтобы вызвать почернение на слое, по плотности превышающее плотность вуали на 0,2. Числовые характеристики свойств нескольких советских фотографических материалов (преимущественно кино- и аэроплёнок) приведены в табл. 57.

Таблица 57

Изопанхром

Проявитель: Агфа 12,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	4	6	8	12	16
S	0,26	0,50	0,86	1,5	2,4
γ	2,6	4,7	6,4	8,4	9,0
D_0	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06

Проявитель: Ускоренный № 2,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	1	2	4	6	8
S	8,0	12,7	20,0	25,3	30,4
γ	0,64	1,22	1,76	2,08	2,20
D_0	0,10	0,12	0,15	0,19	0,22

Разрешающая способность: $RP=65$ линий/мм.

Разрешающая способность: $RP=65$ линий/мм.

Панхром VI

Проявитель: Агфа 12,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	2	3,5	6	10	16	24	32
S	0,1	3	10	16	28	35	50
γ	0,10	0,35	0,50	1,02	1,60	2,30	2,30
D_0	0,03	0,08	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20

Разрешающая способность: $RP=67$ линий/мм

Проявитель: Ускоренный № 2,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	1	2	3,5	6	10	16
S	7	23	37	45	50	55
γ	0,65	1,25	1,75	2,80	3,38	2,08
D_0	0,08	0,10	0,14	0,22	0,48	0,92

Разрешающая способность: $RP=67$ линий/мм

Панхром VII

Проявитель: Агфа 12,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	2	3,5	6	10	16	24	40
S	0,2	3,2	9,0	9,5	13,8	16	16,4
γ	0,25	0,55	1,18	1,75	2,22	2,5	2,6
D_0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,22

Разрешающая способность: $RP=72$ линий/мм

Проявитель: Ускоренный № 2,
 $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$

Время проявления (в мин.)	1	2	3,5	6	10	16
S	8	10	18	18	19	19
γ	1,62	2,02	2,38	3,02	2,25	2,25
D_0	0,08	0,10	0,13	0,32	0,32	0,72

Разрешающая способность: $RP=72$ линий/мм

ции, будет определять положение отрезка MN вдоль оси абсцисс. При наиболее благоприятных условиях глаз различает детали яркостей, отличающихся друг от друга на 1% (в логарифмических единицах на 0,004). Если на ту же величину различаются между собой и плотности на негативе, то все детали яркостей объекта будут переданы на негативе. Очевидно, что передача деталей характеризуется величиной отношения $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}$.

При $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}=1$ все имеющиеся в объекте детали будут воспроизведены на негативе. Если $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}>1$, то на негативе мы получим детали, уже не различимые глазом в объекте. Если же $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}<1$, то часть деталей объекта, видимых глазом, на негативе будет отсутствовать; негатив получается „вялый“, малоконтрастный. Очевидно, что улучшение или ухудшение передачи деталей на негативе зависит от величины $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}=\text{tg } \alpha=\gamma$, т. е. от фактора контраста. Очевидно также, что значение $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}$ остается постоянным только на прямолинейном участке характеристической кривой и что яркости объекта будут передаваться пропорциональными им плотностями негатива только в том случае, если отрезок MN не выйдет из пределов участка оси абсцисс, лежащего между точками E и F . Если же участок MN будет лежать в области недоудержки или передержки на характеристической кривой, то будет иметь место снижение контраста изображения, а если значение $\frac{\Delta D}{\Delta \lg H}$ будет меньше единицы, то и уменьшение различаемости деталей на негативе.

Значение γ зависит как от свойств светочувствительного слоя, так и от проявителя и времени проявления. Изменение формы характеристической кривой для различных времен проявления представлено семейством характеристических кри-

вых на рис. 354. Из рисунка видно, что с удлинением времени проявления γ растет, но не беспречно. Рост γ с удлинением времени проявления постепенно замедляется (см. рис. 355), и, наконец, значения γ становятся постоянными ($\gamma_{\max}$), максимальными для данного слоя и проявителя. Эти значения на том же слое, но для другого состава проявителя могут быть иными, равно как при данном проявителе различные фотографические слои имеют различные значения $\gamma_{\max}$.

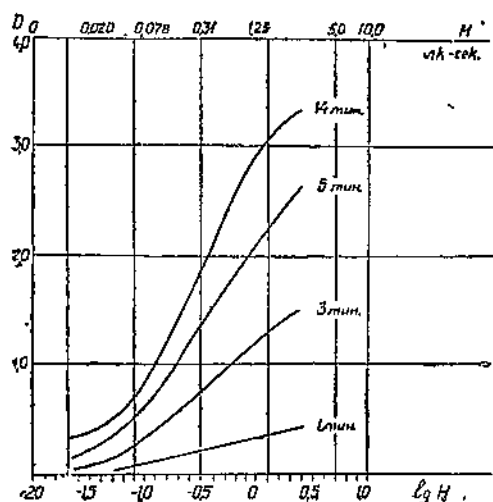


Рис. 354. Зависимость γ от времени проявления

эмульсии чувствительны только к этим лучам. Зеленые, желтые и красные предметы, снятые на таком слое, кажутся на отпечатке одинаково черными (если, конечно, яркости их одинаковы). Такая искаженная светопередача часто весьма неприятна. Она лишает снимок многих деталей, имеющих в объекте, а иногда может сделать получение изображения вообще невозможным.

В настоящее время имеется возможность устранения этого недостатка, заключающаяся в том, что в эмульсию при ее синтезе вводятся некоторые красители, отличающиеся способностью, адсорбируясь на бромистом серебре, делать его чувствительным к зеленому (ортохроматические эмульсии), желтым и красным (панхроматические эмульсии) и даже инфракрасным (инфрахроматические эмульсии) лучам. Таким образом, помимо вопроса о чувствительности эмульсии к белому свету (общей чувствительности), возникает вопрос о чувствительности их к различным длинам волн, т. е. о так называемой спектральной чувствительности. Нужно отметить, что обычно чувствительность в области сенсibilизации ниже собственной чувствительности бромистого серебра и что сенсibilизация снижает эту последнюю. Величина спектральной чувствительности (S_λ) фотографического материала характеризуется логарифмом обратной

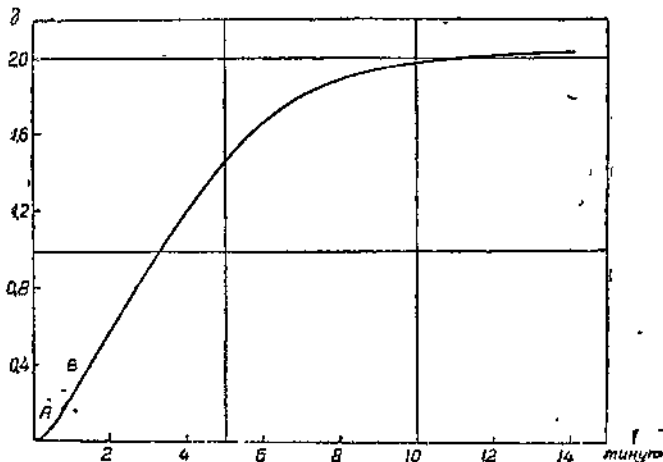


Рис. 355. Рост γ с увеличением времени проявления

величины количества лучистой энергии данной длины волны, которое необходимо для того, чтобы создать на проявленном слое почернение с оптической плотностью $D=1$.

Кривые спектральной чувствительности типичных материалов (средние для ряда эмульсий) приведены ниже на рис. 367 (верхние кривые).

Возникающее при сенсibilизации разнообразие спектральных свойств фотографических слоев создает большое разнообразие возможностей для фотографии. Почернение на пластинке оказывается зависящим от спектрального состава источника света, общего и спектрального отражения объекта, всех изменений в силе и спектральном составе светового потока, испытываемых им на пути от объекта к слою, и, наконец, от общей и спектральной чувствительности слоя. Успех съемки зависит от рационального комбинирования условий съемки и свойств применяемого фотографического материала.

Разнообразие свойств фотографических материалов, выпускаемых фотохимической промышленностью разных стран, весьма велико. Имеются материалы самых разнообразных чувствительностей, контрастов, спектральных свойств и т. п. Нет, разумеется, возможности, да и нужды дать здесь сколько-нибудь подробную характеристику их. Нужно отметить лишь некоторые общие черты фотографических материалов в последние годы. Прежде всего нужно отметить, что целлюлоидная пленка (из нитро- или ацетилцеллюлозы) сделалась основным видом подложки современных негативных материалов; стекло применяется почти исключительно только в тех случаях, когда снимок служит для измерительных целей, и поэтому можно опасаться деформации целлюлоида при проявлении, в сушке и т. п. Не говоря уже о кинематографии, в аэрофотографии, любительской и научной фотографии и, разумеется, в военном деле почти исключительно применяется негативная фотопленка.

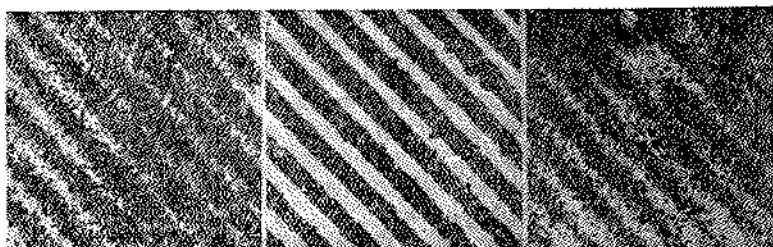
В настоящее время весьма редки и применяются только для некоторых научных целей негативные несенсибилизированные фотографические материалы. Хотя красители, сенсibilизирующие фотоэмульсию ко всем лучам видимого спектра, известны уже давно (около 40 лет), тем не менее до 20-х годов нынешнего столетия применение сенсibilизированных материалов ограничивалось только ортохроматическими слоями. Это объяснялось недостаточной чувствительностью панхроматически сенсibilизированных материалов. Но за последние 20 лет удалось повысить чувствительность фотоматериалов примерно в 10 раз.

Поэтому в настоящее время в распоряжении фотографов имеются высокочувствительные панхроматические слои, и потому ортохроматическая сенсibilизация постепенно начинает исчезать. В области сенсibilизации, наряду с ростом общей чувствительности, мы имеем последовательное продвижение границы фотографической чувствительности в область близких инфракрасных лучей. Так, в настоящее время вполне возможна моментальная съемка на материалах, чувствительных к лучам с длиной волны до 800 и даже 850 $m\mu$. Достигнутая же предельная, длинноволновая граница сенсibilизации — 1300 $m\mu$.

Кинематография и получившая в последние годы широкое распространение малоформатная фотография камерами типа ФЭД, требующая увеличения при проекции и печати, поставили перед фотохимической технологией новый вопрос — проблему зерна.

На существенную роль зернистого строения фотографической эмульсии мы уже указывали. Существуют эмульсии с весьма мелким зерном (коллоидионные слои, альбуминные слои, эмульсия Липпмана и пр.). Но все эти эмульсии мало чувствительны и не допускают моментального фотографирования. Зерна бромистого серебра в высокочувствительных эмульсиях сами по себе достаточно велики (от нескольких десятых до нескольких микрон), а зерна металлического серебра, образующиеся после проявления, уже настолько крупны, что легко различаются даже при небольшом увеличении в 10—20 раз. Микрофотограмма проявленного слоя представлена на рис. 356. Неправильные рваные края штрихов создают зерезкость очертаний при увеличении, в случае необходимости измерений вносят в них неопределенность и понижают их точность. Способность пластинки разре-

пять смежные детали в значительной степени зависят от величины зерна. Правда, и другие факторы: продолжительность экспозиции и проявления, спектральная чувствительность слоя, длина действующей световой волны, рассеяние света



а

б

в

Рис. 356. Микрофотограммы эмульсий:

а — обычная эмульсия; б — диапозитивная эмульсия (красный свет); в — диапозитивная эмульсия (фиолетовый свет)

в слое, контраст объекта и эмульсии — все это в большей или меньшей степени влияет на разрешающую способность эмульсии. Опыты различных авторов показали, что максимальная разрешающая способность эмульсии получается в том случае, когда плотность изображения находится в пределах от 0,7 до 1,2. Увеличение плотности в результате увеличения экспозиции или удлинения проявления

снижает разрешающую способность. Чем выше контраст объекта и контраст изображения, тем разрешающая способность выше. Но в то же время слишком длительное проявление, вследствие роста вуали и увеличения размера проявленных зерен, снижает разрешающую способность. Чем меньше рассеивается свет в эмульсионном слое, тем выше разрешающая способность, поэтому изображение, образованное наиболее поглощаемыми и, следовательно, наименее рассеиваемыми ультрафиолетовыми лучами, наиболее „резко“, что, между прочим, используется при звукозаписи кино, где резкий край зубчика записи звука имеет огромное значение для чистоты звука и качества звукопередачи. Отчетливость границ предметов в изображении („резкость“ изображения) чрезвычайно важна в военной фотографии. Так, например, при дешифрировании аэроснимков, на которых при съемке с больших высот размеры предметов полу-

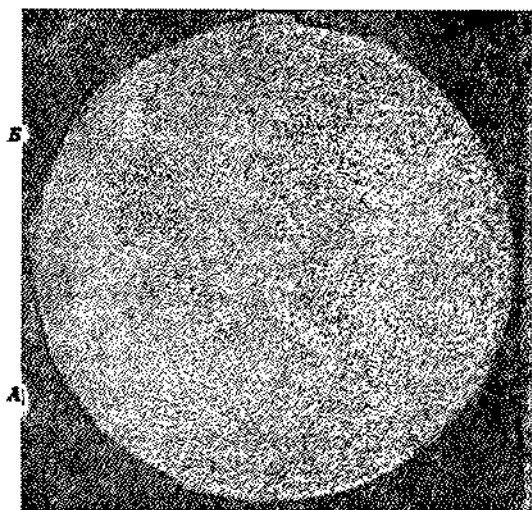


Рис. 357.

А — зернистость проявленного изображения на эмульсии, типичная для 1-й четверти XX столетия; Б — современная эмульсия той же чувствительности

чаются очень небольшими, резкие очертания предметов особенно существенны.

Предел разрешения в фотографическом изображении определяется комбинацией свойств объектива и слоя. Для современных аэрофотообъективов и материалов он лежит в пределах от $1/20$ до $1/40$ мм. Далее в параграфе о проявлении мы еще вернемся к этому вопросу. Здесь же еще раз укажем, что стремление к получению мелкозернистых и притом достаточно чувствительных эмульсий

составляет одну из основных тенденций современной фотохимической технологии и что в этом направлении далеко еще не сказано последнее слово. Успехи, достигнутые в этом направлении, иллюстрируются рис. 357.

Обзор свойств фотографических материалов был бы не полон без указания на замечательную и не свойственную человеческому глазу и фотоэлементу особенность фотографического слоя, состоящую в том, что он способен аккумулировать действие лучистой энергии. В глазе не получится зрительного впечатления и фотоэлемент не даст тока, как долго ни освещались бы они светом, сила которого ниже некоторой предельной величины, но освещение фотографической пластинки, как бы слабо оно ни было, непременно приведет к образованию изображения, — весь вопрос только в его продолжительности. Использование этого свойства во многих случаях, в том числе и для военных целей, дает возможность обнаруживать такие слабые источники света, которые никаким иным путем не могли бы быть обнаружены.

§ 4. Элементы устройства фотографического аппарата

Разнообразие типов фотографических аппаратов очень велико. Их можно классифицировать по различным признакам: по их назначению (любительские, павильонные, военные, для разных специальных назначений); по виду применяемых фотоматериалов (пластинки, пленка); по форматам; по конструктивным элементам (складные, зеркальные и т. п.) и т. д. Нет возможности и необходимости рассматривать здесь детали конструкций всех этих аппаратов, даже только имеющих военное назначение. Мы остановимся только на некоторых основных конструктивных узлах современных фотографических аппаратов, тесно связанных с фотографическим процессом.

Одним из важнейших элементов всякого фотографического аппарата является фотографический затвор. Роль затвора определяется его назначением регулировать продолжительность экспозиции. Регулирование продолжительности экспозиции путем открывания и закрывания объектива фотоаппарата какой-либо заслонкой или крышечкой возможно только при достаточно длительных экспозициях. При экспозициях более коротких, и в особенности моментальных, это делается невозможным и приходится прибегать к помощи механических устройств, позволяющих открывать доступ света к эмульсионному слою на заранее заданный промежуток времени. При этом должна существовать возможность изменять продолжительность экспозиции в довольно широких пределах и в то же время должна быть обеспечена возможность воспроизвести избранную продолжительность какое угодно большое число раз с достаточной степенью точности.

Изменять продолжительность освещения слоя можно либо: 1) перекрывая отверстие объектива, либо 2) открывая и закрывая самый слой.

Продолжительность экспозиции при моментальной съемке в сильнейшей степени зависит от масштаба съемки:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{h},$$

где f — фокусное расстояние объектива, а h — расстояние от объектива до фотографируемого предмета. Очевидно, что чем меньше масштаб съемки, тем меньшее смещение изображения движущегося предмета будет иметь место. Продолжительность экспозиции должна быть выбрана такой, чтобы сдвиг изображения на светочувствительном слое не превышал 0,1 мм. Если v есть скорость движения фотографируемого предмета, то смещение

$$v' = \frac{1}{m} v.$$

Частное от деления величины допустимой нерезкости на величину сдвига изображения v' даст значение наибольшей допустимой продолжительности экспозиции

$$\frac{O'}{v'} = t_{\max}.$$

Вторым фактором, от которого зависит продолжительность экспозиции, является чувствительность фотографического материала и его широта. Роль чувствительности очевидна: чем она меньше, тем длительнее должны быть экспозиции. Что же касается широты, то отношение интервала яркостей объекта к широте эмульсии может служить мерой допустимых ошибок экспозиции, а следовательно, будет определять диапазон скоростей затвора и точность, с которой каждая из них должна воспроизводиться.

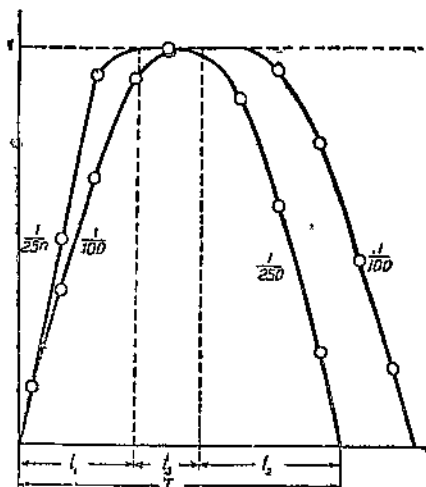


Рис. 358. График величины отверстия F затвора Компур для различных моментов открытия

Все затворы, располагаемые около объектива, независимо от того, надеваются ли они на объектив (как шторные затворы типа Торнтон — Пикар), помещаются ли между линзами объектива (как центральные, гильотинные или типа „жалюзи“) или позади него, действуют таким образом, что сначала открывается небольшое отверстие; оно увеличивается, достигает максимальной величины и затем постепенно уменьшается до полного исчезновения.

При этом с самого начала освещается вся пластинка, но интенсивность освещения изменяется в соответствии с увеличением или уменьшением отверстия в затворе.

Нанося на график значения площадей отверстия F для различных моментов работы затвора, в долях от площади максимального отверстия, получаем кривые, изображенные на рис. 358.

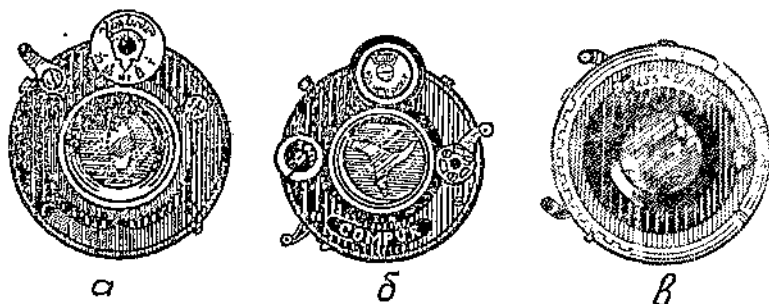


Рис. 359. Центральные затворы:
а — Пронто, б — Компур, в — Новый Компур

Считая, что количества освещения, попадающие на слой, пропорциональны величинам площадей таких кривых, мы получаем возможность вычислить коэффициент полезного действия затвора η

$$\eta = \frac{\int_0^t F dt}{F_0 t},$$

где F_0 — площадь максимального отверстия затвора, закрывающегося и открывающегося мгновенно и остающегося открытым во все время экспозиции.

Произведение $\eta t = t_{\text{экв}}$ называется эквивалентным временем экспозиции. Оно характеризует экспозицию со стороны действия на химический слой (так как

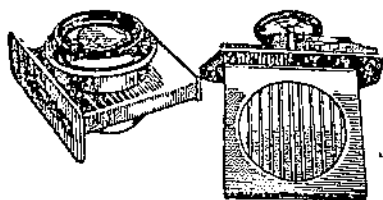


Рис. 360. Затвор Жалюззи гильотинного типа

пропорционально количеству освещения, попадающего на слой) и определяет плотность негатива.

Поэтому, если для получения резкого изображения полная продолжительность экспозиции равна, например, 0,01 сек., то при $\eta = 0,5$ должен быть взят светочувствительный материал, достаточно чувствительный, чтобы дать изображение при экспозиции 0,005 сек.

Основные типы затворов, связанных с объективом, приведены на рис. 359, 360 и 361.

Типичными затворами, помещаемыми перед эмульсионным слоем, являются шторные затворы (рис. 361). Это — светонепроницаемая заслонка со щелью постоянной или переменной ширины, проходящей во время срабатывания затвора перед слоем. Таким образом, затвор открывает светочувствительный слой действию света участок за участком.

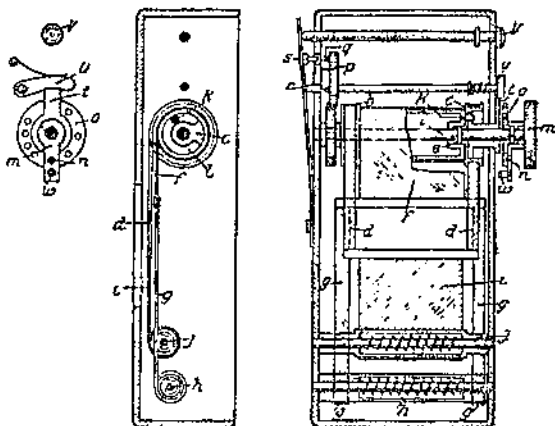


Рис. 361. Шторный затвор камеры ФЭД

Схема действия шторного затвора представлена на рис. 362. Так как шторка движется близко от фокальной плоскости объектива, то она пересекает сходящиеся световые пучки, идущие от объектива в их узкой части, и потому коэффициент полезного действия шторных затворов выше, чем у центральных, а тем более гильотинных. Только частичное открывание светочувствительного слоя создает возможность легкого получения с помощью шторных затворов гораздо более коротких экспозиций, чем это возможно для центральных.

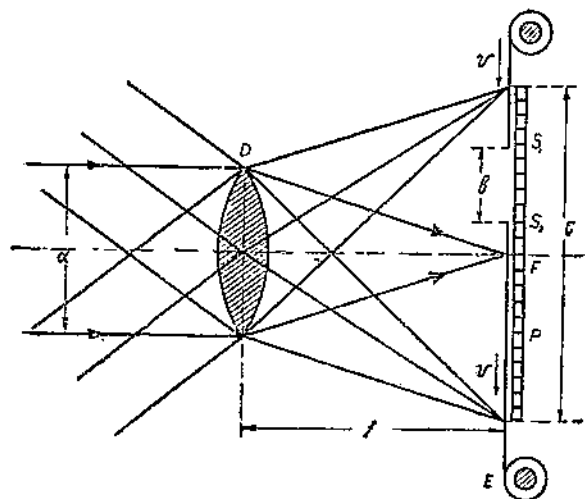


Рис. 362. Схема действия шторного затвора:

D — объектив; P — светочувствительная пластинка; E — шторный затвор с щелью b , движущийся со скоростью v

экспозиции больше (0,03—0,1 мм), то изображение получается нерезким.

Большинство современных фотографических объективов снабжено диафрагмой. Оптическое действие диафрагмы подробно рассмотрено выше в главе о фотографическом объективе (гл. 12, § 2 и 3). Изменение отверстия диафрагмы однозначно изменению относительного отверстия объектива и, следовательно, самым непосредственным образом влияет на освещенность на фотографическом слое.

Полная продолжительность экспозиции t для шторного затвора равна продолжительности освещения каждой отдельной точки светочувствительного слоя.

Продолжительность работы затвора есть время перемещения шторки от одного края кадра до другого.

Если положение фотографируемого предмета заметно меняется за время, равное продолжительности работы затвора, то изображение предмета получится искаженным, так как продолжительность экспозиции меньше скорости перемещения изображения. Если смещение изображения за время полной продолжительности

Конструктивно большинство современных диафрагмирующих устройств оформлено в виде так называемой ирисовой диафрагмы (рис. 363), позволяющей плавно и непрерывно изменять диаметр отверстия объектива. Кольцо диафрагмы, с помощью которого устанавливается диаметр отверстия, снабжается шкалой, каждая ступень градуировки которой соответствует изменению освещенности на пластинке в два раза. На многих объективах соответственно этой шкале наносится также шкала разности глубин.

Механизмы фокусировки у современных фотографических аппаратов весьма разнообразны. Наводка на фокус производится тремя путями: по матовому стеклу, дистанционной шкале и по дальномеру; она осуществляется либо перемещением

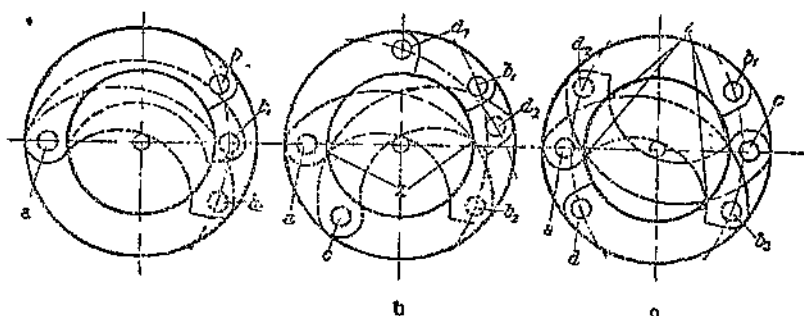


Рис. 363. Схема действия ирисовой диафрагмы

с помощью кремальеры передней доски аппарата вместе с неподвижно укрепленным в ней объективом, либо перемещением объектива продольно оптической оси с помощью червячной оправы, либо, наконец, изменением расстояния между линзами объектива.

Однако для военных целей, где фотографирование обычно производится на достаточно удаленных расстояниях, фокусировка применяется сравнительно редко; в большинстве случаев съемка производится при установке объектива на бесконечность.

Выбор кадра производится либо по матовому стеклу, либо с помощью разнообразных визиров, конструкции и способов действия которых мы здесь описывать не станем.

§ 5. Съемочный процесс

А. Светофильтры

Различие в спектральной чувствительности негативных фотографических материалов и разнообразие цветов фотографируемых объектов вызывают необходимость регулирования спектрального состава света, падающего на светочувствительный слой. Это регулирование производится с помощью светофильтров.

Светофильтры по большей части имеют вид плоскопараллельной пластинки из цветного оптического стекла, либо тонкой цветной желатиновой пленки, окрашенной красителями и заклеенной между стеклами. Будучи помещены перед объективом, они существенно меняют спектральный состав падающего на слой света. Применяются они для различных целей, из которых важнейшими являются: 1) приближение распределения почернений в фотографическом изображении к распределению яркостей фотографируемого объекта, 2) подчеркнутое выявление различий в окрасках различных деталей объекта и фотографическая демаскировка, 3) устранение влияния воздушной дымки, 4) цветоделение для целей цветной фотографии и цветной репродукции и 5) неактивные источники света для освещения фотографических помещений.

Общей характерной чертой спектральной чувствительности современных фотографических материалов является то, что чувствительность их в области сенсби-

лизации всегда ниже чувствительности в области собственного поглощения бромистого серебра. Поэтому участие лучей различных длин волн в образовании фотографических изображений не одинаково и определяется произведением из количества лучистой энергии данной длины волны, падающей на фотографический слой, на его спектральную чувствительность. Суммарное действие лучей различной длины волны определяется так называемым фотоактивным потоком, т. е. площадью кривой, ординаты которой представляют произведения из ординат кривой распределения энергии потока, падающего на слой, соответственно на ординаты кривой спектральной чувствительности слоя.

Но кривая распределения энергии действующего на слой света определяется произведением ординат кривых распределения энергии в источнике света, избирательным спектральным поглощением атмосферы и фотографического объектива и, наконец, спектральной кривой пропускания светофильтра.

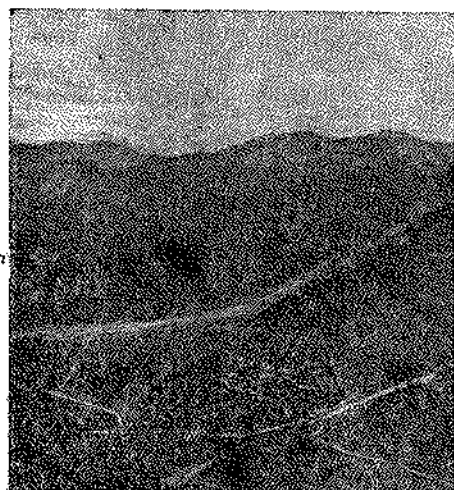


Рис. 364. Снимок предгорий Кавказа, высота 600 м:

а — панхроматическая пленка без светофильтра; б — инфрахроматическая пленка с красным светофильтром

Среди всех этих факторов наименьшее значение имеет спектральное поглощение света в объективе. Только при съемках в крайней фиолетовой и близкой ультрафиолетовой областях, где поглощение стекла начинает играть некоторую роль, влияние этого поглощения может иметь существенное значение*. Но в области видимого света оптическое стекло бесцветно, и поэтому поглощение в объективе связано только с потерями на отражение от поверхностей составляющих его компонентов.

Зато значение светофильтра весьма велико. Пусть мы желаем снять предмет, в котором имеются детали красного, желтого, зеленого и синего цветов. Если бы мы снимали на несенсибилизированной пластинке, то, вследствие нечувствительности ее к красным, желтым и зеленым лучам, детали этих цветов не различались бы между собой. Но даже на панхроматической пластинке, чувствительной к лучам всех длин волн видимого спектра, соотношение почернений на пластинке не будет соответствовать действительному соотношению яркостей деталей, так как пластинка все же чувствительнее к синим лучам, чем к красным. Применение светофильтра, поглощающего синие лучи, приближает спектральную чувствительность пластинки к спектральной чувствительности глаза, а соотношение почернений на ней делает подобным визуальному соотношению яркостей цветных деталей.

Особенно большое значение имеют светофильтры для уничтожения влияния атмосферной дымки и повышения дальности фотографирования. В § 2 были рассмотрены спектральные свойства атмосферной дымки и вредное влияние ее,

* См. выше стр. 304, табл. 53.

снижающее контраст удаленных объектов. Было указано на то, что в дымке относительно большее значение имеют рассеянные сине-голубые лучи спектра. Если перед объективом поместить желтый светофильтр, поглощающий синие и голубые лучи, то изображение будет возникать только за счет зеленых, желтых, оранжевых и красных лучей. Эти лучи менее рассеиваются, следовательно далее проникают сквозь атмосферу. В то же время голубое свечение дымки поглощается светофильтром. В результате контраст объекта снижается дымкой в меньшей степени, а стало быть возможная дальность фотографирования увеличивается.

Чем дальше в сторону красного конца спектра сдвинута граница поглощения светофильтра и чем она круче, тем более эффективно действует светофильтр, увеличивая возможную дальность съемки. Особенно замечательны в этом отношении результаты, получаемые при фотографировании в инфракрасных лучах, пропни-

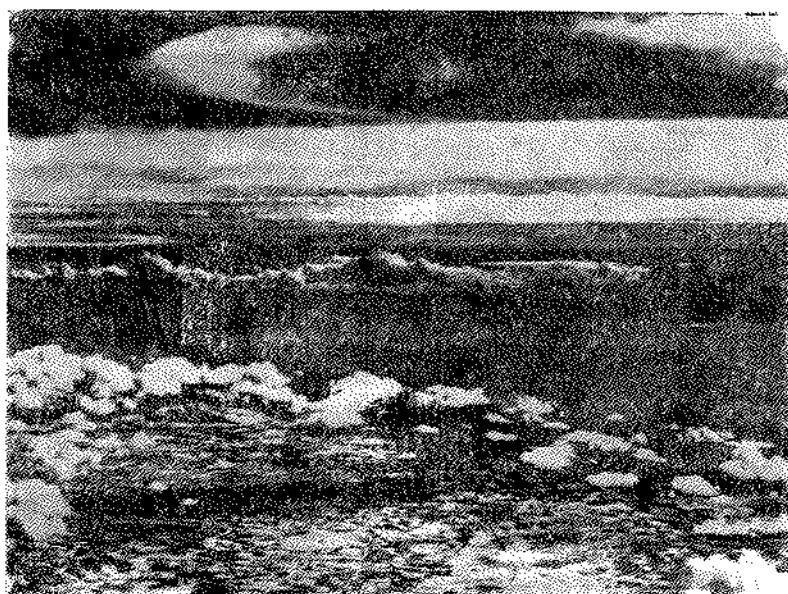


Рис. 365. Снимок сделан с самолета на высоте 600 м над графством Кент в Англии на инфрахроматической пленке с фильтром. Видны французский и английский берега Ламанша

кающих без рассеяния на значительно большее расстояние, чем видимые. Фотографируя на материалах, чувствительных к красным и инфракрасным лучам с красными светофильтрами, мы можем получить возможность снимать на очень дальние расстояния. Подобного рода снимки приведены на рис. 364, 365 и 366. Рекордом в этом отношении является снимок, сделанный капитаном Воздушного флота США Стевенсом (рис. 366).

Данные о наборе стеклянных съемочных светофильтров, применяемых для аэросъемки, приведены в табл. 58.

По самому существу действия светофильтров, заключающегося в поглощении части световых лучей определенных длин волн, светофильтр всегда уменьшает количество света, действующего на фотографический слой. Тем самым применение светофильтра всегда связано с увеличением продолжительности экспозиции. Число, указывающее, во сколько раз продолжительнее должна быть экспозиция при съемке с данным светофильтром по сравнению с нормальной продолжительностью экспозиции при тех же условиях съемки, но без светофильтра, называется его „кратностью“. Это число зависит не только от свойств светофильтра, но и от свойств фотографического материала и спектрального состава источника света. Выше уже указывалось на то, что фотографическая активничность светового потока может быть охарактеризована площадью кривой, ординаты которой выра-

Таблица 58

№ свето- фильтра	Сорт стекла	Ц в е т	λ^* пред. (в μ)	$D_{\lambda_0}^*$		K^*	Кратность		
				для λ (в μ)	D_{λ_0} для толщ. 1 см.		изопан- хром	пан- хром. 6	пан- хром. 7
I	ЖС-16	Светложелт.	274	—	—	—	—	—	—
II	ЖС-18	Темножелт.	512	600	0,10	1,0	1,8	1,6	1,9
III	ОС-12	Светлооранж.	535	650	0,12	1,2	3,2	2,0	2,4
IV	ОС-14	Темнооранж.	584	680	0,12	1,2	5,7	2,8	3,0
V	КС-14	Красный	646	710	0,15	1,2	∞	4,6	5,0

жуют в относительных единицах меру участия лучей различных длин волны построения фотографического изображения. На рис. 367, а, б, в и г приведены кривые фотоактивных потоков для различных фотографических материалов и перечисленных в табл. 58 светофильтров. Распределение энергии источника света принято соответствующим кривой „нормального солнечного света“, представленной на рис. 352.



Рис. 366. Снимок Стевенса в Аргентине. Инфрахроматическая пленка, высота 6500 м. На горизонте видны Анды с вершиной Аюшкангуа, находящейся на расстоянии 470 км. Линия горизонта на снимке охватывает 112 км, что соответствует $\frac{1}{360}$ земной окружности

Отношение площадей кривых фотоактивных потоков представляет „кратность“ светофильтров, а их сопоставление выясняет как природу этой кратности, так и относительную „активность“ излучения различных длин волн, — вопрос, имеющий первостепенное значение при решении вопросов выбора хроматического исправления объективов.

Действительно, хроматическое исправление современных объективов, в особенности предназначенных для фотографирования в инфракрасных лучах, существенно отличается от исправления, применявшегося тогда, когда фотографические слои были чувствительны только к синим и иногда зеленым лучам. Диапазон длин

* Об азросъемочных параметрах см. выше I, гл. 4, § 1.

волн, к которым чувствительна современная фотографическая пластинка или пленка, так велик, что невозможно создать такую комбинацию стекол в объективе, чтобы совершенно уничтожить его хроматическую aberrацию. Поэтому ограничиваются доведением хроматической aberrации до минимума в некоторой, более узкой, зоне спектра. Только лучи этой зоны, сходящейся в одной фокальной плоскости, будут давать резкое фотографическое изображение. Если спектральный диапазон длин волн света, попадающего в объектив, шире зоны хроматического исправления объектива, то фокус лучей с длинами волн, выходящими за эти пределы, будет лежать ближе или дальше фокальной плоскости объектива. Этот хроматизм оптического изображения приведет к нерезкости фотографического изображения. Светофильтр, сужая интервал длин волн, попадающих в объектив,

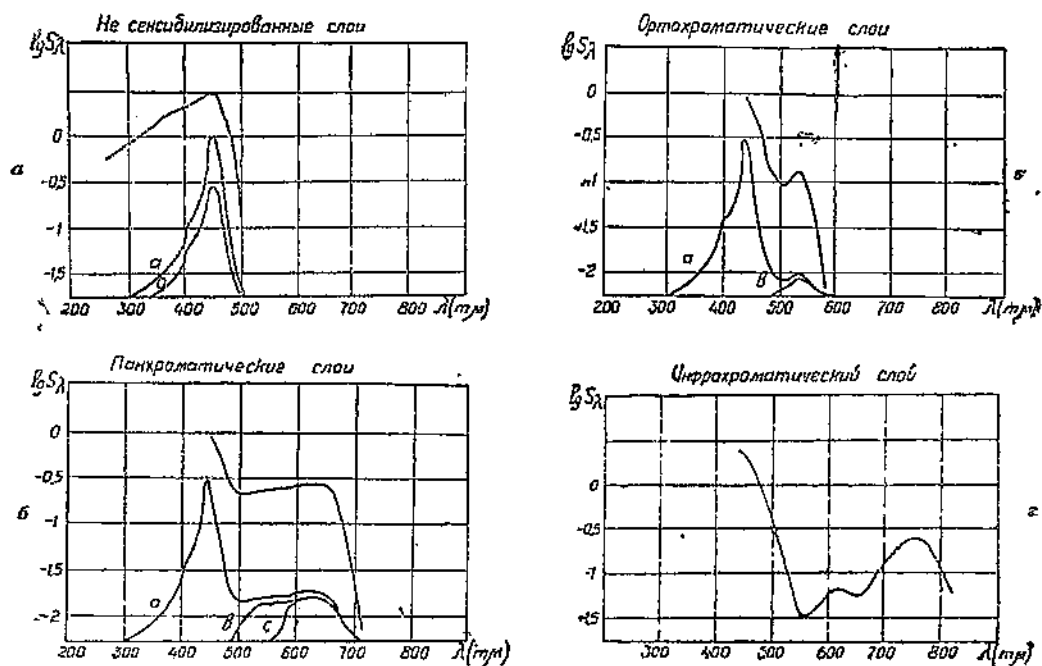


Рис. 367. Кривые спектральной чувствительности (верхние кривые) и фотоактивные кривые (нижние кривые) при действии на слой среднего солнечного света

вообще говоря, облегчает условия исправления. Но если выделяемая область длин волн сильно отличается от той, для которой объектив был исправлен, то одновременно он перемещает фокальную плоскость вдоль оптической оси и отчасти ухудшает исправление объектива. По этой причине съемка в инфракрасной области спектра требует специально рассчитанного объектива.

С обычным (не рассчитанным на такую съемку) объективом требуется перефокусировка камеры, но даже при этом условии качество изображения будет ниже того, которое будет давать объектив в зоне длин волн, для которой он был ахроматизован. Чем уже была зона, тем выше качество изображения, даваемого объективом. Наилучшее качество изображения можно получить, фотографируя в монохроматическом свете. Перефокусировка камеры в некоторых случаях может быть произведена с помощью того же светофильтра, если ему придана форма не плоскопараллельной пластинки, но плосковыпуклой линзы с очень большим радиусом кривизны. Такие „фокусирующие светофильтры“ очень практичны и удобны, но, конечно, не могут дать того качества изображения, которое может быть достигнуто с помощью специально рассчитанного для работы в заданной зоне спектра объектива.

Таким образом, свойства объектива определяются свойствами применяемого фотографического материала, светофильтра и источника света, — это обстоятельство,

о котором ни при создании объектива, ни при его эксплуатации не следует забывать.

Но использование светофильтров для увеличения дальности съемки является не единственной возможностью их применения для целей военной фотографии. С их помощью можно усилить яркостный контраст цветных деталей объекта.

Представим себе, что на лугу имеется некое искусственное сооружение, видимая поверхность которого окрашена в зеленый цвет. Очевидно, что чем точнее будет совпадать цвет этой поверхности с цветом луга и чем менее будут различаться их яркости, тем труднее будет заметить присутствие этого сооружения. Но визуальное совпадение цветов еще не означает одинаковости спектрального состава света, отраженного от обеих поверхностей. Фотографическая же пластинка чувствительна только к спектральному составу. Поэтому на снимке две цветные поверхности

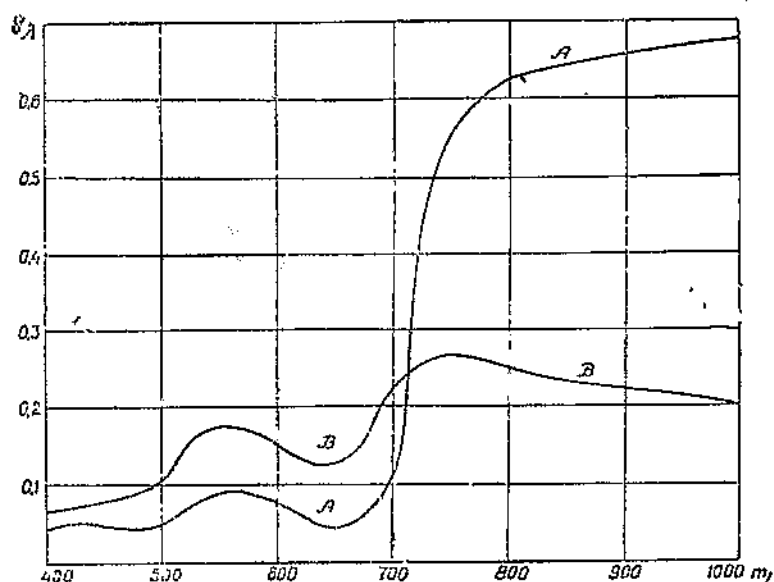


Рис. 368. Спектральный ход коэффициентов отражения:

А — естественной зелени; В — искусственной зеленой окраски

дадут одинаковые плотности только в том случае, если спектральный состав отраженного ими света был одинаков. Практически осуществить это требование во всем интервале длин волн, к которому чувствительны современные фотографические материалы, очень трудно. Обычно допускаются некоторые расхождения, в особенности в невидимых областях спектра.

На рис. 368 представлены кривые, выражающие зависимость коэффициентов отражения от длины волны для естественной зелени и некоторой зеленой окраски.

Кривая зелени в области близких инфракрасных длин волн имеет характерный подъем. Это значит, что зелень сильнее отражает инфракрасные лучи спектра, чем видимые. В то же время имитация этого подъема в искусственной покраске очень трудна и часто не имеет места. Если даже, как это и видно из кривых, в видимой области спектра достигнуто удовлетворительное совпадение хода кривых и окраска двух поверхностей кажется совпадающей и по цветовому тону и по спектральному составу, то это еще не означает их фотографической неразличимости. Напротив, достаточно поставить перед объективом красный светофильтр, поглощающий тот участок длин волн, в котором имеет место совпадение кривых отражения, и пропускающий тот участок, где такое совпадение отсутствует, чтобы получить на снимке резкое выделение участка искусственной окраски, т. е. демаскирование его (рис. 369). Это драгоценное для целей разведывательной фотографии свойство светофильтров может быть широко использовано для фотографического

демаскирования объектов. Нужно иметь в виду, конечно, что не только цвета, но и форма предметов и характер отражения ими света, то, что называется „фактурой“ предмета, является демаскирующими признаками. С другой стороны, пестрота ландшафта, огромное разнообразие деталей в нем, передающихся на снимке участками разнообразной плотности и формы, облегчает задачу маскировки, так как затрудняет нахождение демаскируемого объекта на снимке даже в том случае, когда он на нем отчетливо виден.

Можно было бы привести еще ряд примеров применения светофильтров для целей военной фотографии. Все они основаны на использовании того же принципа

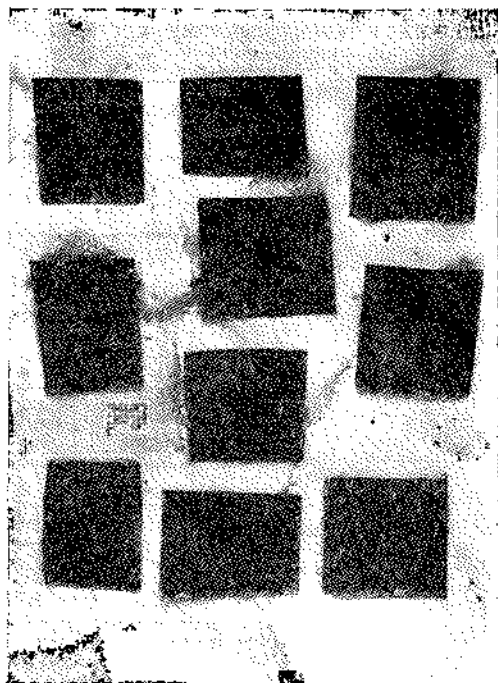
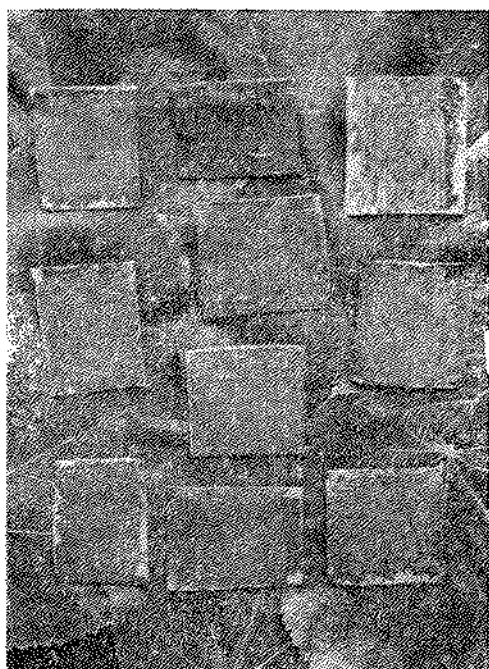


Рис. 369. Снимок зеленой покраски на фоне листьев:

а — панхроматическая пленка, оранжевый фильтр; б — инфрахроматическая пленка, красный фильтр

и отличаются между собой вариациями только тех или иных деталей. Поэтому мы ограничимся сказанным.

Б. Выбор экспозиции

Выше уже было отмечено, что для успеха съемки решающее значение имеет правильный выбор экспозиции. Если бы условия освещения были строго определенными и фотографический материал всегда имел одни и те же свойства, то и тогда выбор продолжительности экспозиции был бы задачей не простой.

В действительности и условия освещения весьма сильно меняются и чувствительность применяемых фотоматериалов чрезвычайно разнообразна. Помимо того, обязательное во многих случаях применение съемочных светофильтров еще более усложняет вопрос.

Дневной свет (почти единственный вид освещения, используемый в военной фотографии) отражается от объекта съемки. Изменивши при отражении свою интенсивность и спектральный состав, он проходит сквозь атмосферу, светофильтр и объектив и, наконец, попадает на светочувствительный слой. На этом пути происходят разнообразные изменения интенсивности и спектрального состава све-

та. Конечная освещенность, создаваемая в результате на светочувствительном слое, имеющем определенную общую и спектральную чувствительность, определяет продолжительность экспозиции, требующуюся для получения нормального фотографического изображения.

Данные о большинстве факторов, влияющих на всем пути света от солнца до фотографического объектива, рассмотрены ранее.

В главе о фотографическом объективе указаны свойства объектива, влияющие на освещенность на фотографическом слое.

При выборе освещенности, к которой надлежит относить расчет необходимой продолжительности экспозиции, мы будем руководствоваться следующими соображениями. Широта фотографических материалов обычно больше интервала яркостей фотографируемых объектов, который, как это в особенности имеет место для съемок с воздуха и при фотографировании открытых ландшафтов, вообще не велик (см. § 2).

Пусть мы желаем передать на снимке все детали яркостей объекта, видимые глазом. Для этого нужно прежде всего, чтобы в соответствующем месте негатива было получено некоторое почернение. Принимаем, что чувствительность слоя определяется количеством освещения, способным давать, при некоторых условиях проявления, почернение, превышающее по плотности на 0,2 плотность вуали. Будем считать, что для передачи на снимке наиболее темной детали объекта на слой должно упасть именно это количество освещения. Все более яркие детали объекта дадут большие освещенности на слое. Так как интервал яркостей объекта не велик, то нет опасности, что почернения на негативе, соответствующие наиболее ярким деталям объекта, будут неразличимы.

Коэффициенты отражения ρ фотографируемых объектов (альбедо) могут быть весьма разнообразны. Приводим некоторые из них.

Мы будем считать, что на снимке должны передаваться предметы, имеющие коэффициент отражения $\rho = 0,1$, что представляет собой приблизительно нижнюю границу отражательной способности с учетом просветляющего влияния дымки. Учитывая потери на отражение света от поверхностей компонентов объектива и падение освещенности на краю поля, мы получим для минимальной освещенности на слое следующее выражение:

Объект	ρ
Снег	0,8
Скалы	0,3—0,5
Лес	0,1

$$E'_{\min} = \rho_{\min} E \frac{zP}{4z},$$

где E' — освещенность на слое, E — освещенность объекта, $\rho_{\min}$ — минимальный коэффициент отражения объекта, z — коэффициент падения освещенности, указывающий, какую долю составляет освещенность на краю снимка от освещенности в центре его, P — потери на отражение ($P = 0,95^n$, где n — число отражающих поверхностей, обычно 6 или 8); $z = \frac{f}{d}$, где f — фокусное расстояние объектива, d — его диаметр.

Если минимальная экспозиция на слое, соответствующая его чувствительности, равна $E't$ люкс/сек., то продолжительность экспозиции

$$t = \frac{(E't) 4z}{\rho_{\min} E x P \eta}$$

(η — коэффициент полезного действия затвора).

Значения величин, входящих в эту формулу и относящихся к различным применяемым объективам, приведены в табл. 59. Уменьшение освещенности, применение светофильтра, уменьшение чувствительности материала — все это факторы, увеличивающие продолжительность экспозиции. В табл. 58 мы привели соответствующие факторы кратности, указывающие, во сколько раз должна быть увеличена экспозиция, чтобы получить в указанных случаях нормально экспонированный негатив.

Таблица 59

Название	Число поверхностей	Фокусное расстояние (в мм)	Относительное отверстие	Формат снимка (в см)	Разрешающая способность (в мм)	Ахроматизация
Индустар-4	6	210	1:4,5	13 × 18	23	430тр. 589тр.
Индустар-13	6	300	1:4,5	18 × 18	23	286 " 589 "
Индустар-17	6	500	1:5	18 × 24	32	486 " 656 "
Индустар-А	6	500	1:5	30 × 30	30	589 " 810 "
Орион-1	8	100	1:6,3	13 × 18	42	Не ахроматиз.
Орион-1-а	8	200	1:6,3	30 × 30	42	" "
Руссар-19	8	100	1:6,3	18 × 18	19—27*	" "
Ф-3	8	400	1:4,5	13 × 18	24	486тр. 589 тр.
Телемар	8	750	1:6,3	30 × 30	30	527 " 656 "
Арктур	8	180	1:4,5	18 × 18	33	430 " 589 "
Уран-9	10	250	1:2,5	18 × 18	40—5**	550 " 670 "

Определение экспозиции может быть произведено расчетом по приведенной формуле. Часть величин, входящих в формулу, относится к объективу и затвору фотоаппарата, и потому при всех случаях съемки данным аппаратом они могут считаться постоянными. Другая часть: освещенность объекта, чувствительность материала, продолжительность экспозиции и относительное отверстие объектива (при наличии переменной диафрагмы) являются переменными. Их взаимозависимость выражается уравнением

$$t = A \frac{z}{ES},$$

где t — продолжительность экспозиции, S — чувствительность фотоматериала ($S = \frac{1}{Et}$), E — освещенность объекта, $z = \frac{f}{d}$ — относительное отверстие.

Из формулы следует, что при данной чувствительности материала и избранном отверстии диафрагмы продолжительность экспозиции оказывается зависящей только от освещенности объекта. Таким образом, определение этой освещенности является обязательным для выбора продолжительности экспозиции. Приблизительное определение на-глаз, обычно практикуемое в любительской и художественной фотографии, даже при наличии значительного опыта часто приводит к грубым ошибкам. Но такой способ суждения становится совершенно недопустимым, когда снимок не может быть повторен, т. е. в большинстве случаев военной фотографии. Правильный выбор экспозиции тем более важен, что он определяет качество снимка и что дефекты снимка, происходящие от неправильного выбора экспозиции, в большинстве случаев не могут быть исправлены.

Таблица 60

Таблица д-ра Рэден для определения экспозиции при аэросъемке

Таблица I (S_1)

Вид съемки	S_1
Плановая съемка	5
Перспективная съемка	4

* У объектива Руссар-19 имеет место понижение разрешающей способности от 19 линий в центре до 7 линий по краю поля. При угле 47° он дает падение освещенности на краю поля такое же, что и Орион-1а (т. е. в 9 раз), а при угле 52° в 30 раз, в то время, когда Орион-1а при этом угле вообще не работает.

** Разрешающая способность изменяется по полю в указанных пределах.

Таблица II (S_2)

Время года	Время суток (часы)											
	12	11 и 13	10 и 14	9 и 15	8-30 и 15-30	8 и 16	7-30 и 16-30	7 и 17	6-30 и 17-30	6 и 18	5-30 и 18-30	5 и 19
Декабрь, 2-я половина	7	8	8	11								
Январь и декабрь, 1-я половина	7	7	8	10	12							
Январь и ноябрь, 2-я половина	6	6	7	9	11							
Февраль и ноябрь, 1-я половина	5	5	6	8	9	11						
Февраль и октябрь, 2-я половина	4	4	5	7	8	10	12					
Март и октябрь, 1-я половина	3	3	4	6	7	8	10	12				
Март и сентябрь, 2-я половина	2	3	3	4	5	7	8	10	12			
Апрель и сентябрь, 1-я половина	2	2	2	3	4	5	7	8	10			
Апрель и август, 2-я половина	1	1	2	3	4	5	6	7	8	10		
Май и август, 1-я половина	1	1	1	2	3	4	5	6	7	9	11	
Май и июль, 2-я половина	0	1	1	2	3	3	4	5	7	8	10	
Июнь и июль, 1-я половина	0	0	1	2	2	3	4	5	6	8	9	11
Июнь, 2-я половина	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	9	11

Примечание. Табл. II составлена для местностей от 43 до 52° широты.

Таблица III (S_2)

Состояние неба	S_2
Солнце и белые облака	0
Ясное небо	1
Солнце и темные облака	2
Небо слегка серое (слабое солнце)	3
Серое небо (без солнца)	4
Небо пасмурное	5

Таблица IV (S_4)

Чувствительность фотозумьсии	S_4
17,0	8
21,6	7
27,6	6
35,1	5
44,8	4
57,0	3
72,7	2
93,0	1

Таблица V (S_6)

Кратность фильтра	S_6
2-кратный	3
3-кратный	5
4-кратный	6
5-кратный	7

Таблица VI (S_6)

Относительное отверстие	S_6	Относительное отверстие	S_6
3,5	0	6,8	6
4	1	7,2	7
4,5	2	8	8
4,8	3	9	9
5,5	4	10	10
6,3	5	11	11

$$(S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6)$$

Таблица VII
Экспозиция в секундах

Десятки	Единицы									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\frac{1}{1800}$	$\frac{1}{1200}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{800}$	$\frac{1}{630}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{330}$	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{200}$
2	$\frac{1}{180}$	$\frac{1}{120}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{80}$	$\frac{1}{63}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{20}$

Для определения экспозиции по таблицам I—VI выбираются подходящие значения и по их сумме по табл. VII находится значение экспозиции.

Для определения экспозиции существуют различные экспонометрические таблицы (вроде приводимых в табл. 60) и приборы — экспонометры, оптические и фотоэлектрические. Пользование таблицами всегда несколько громоздко, так как требует вычислений. В то же время исходные данные выбираются все же на-глаз, и некоторая произвольность этого выбора приводит иногда к ошибкам.

Существует очень много различных конструкций оптических экспонометров. Они просты в обращении, но часто их показания ошибочны. В СССР они не изготавливаются, и потому на их устройстве мы останавливаться не будем.

Фотоэлектрические экспонометры — приборы, представляющие собой объективный люксметр, снабженный пересчетным приспособлением, позволяющим механически произвести вычисление продолжительности экспозиции. Принципиальная схема их устройства очень проста. Это всегда селеновый фотоэлемент, соединенный с небольшим, но высокочувствительным стрелочным гальванометром, устроенным таким образом, что отклонение стрелки пропорционально логарифму силы тока. Сила тока селенового фотоэлемента приблизительно пропорциональна освещенности на фотоэлементе. Пропорциональность эта сохраняется в очень большом интервале освещенностей от сотен тысяч до десятых долей люкса. Разумеется, никакой гальванометр, отклонения стрелки которого пропорциональны силе тока, не может работать в столь большом интервале.

Так как в данном случае требуется точность, в сто раз большая, чем свойственная обычно стрелочным гальванометрам малых размеров, то единственным решением является логарифмическая шкала. Но даже и с этой шкалой экспонометры обычно имеют шунтовое переключение, и шкала их работает в нескольких диапазонах освещенностей. Однако не только электротехнические, но и фотографические соображения требуют логарифмической шкалы гальванометра. В самом деле, отклонения стрелки, пропорциональные логарифмам освещенностей, будут прямо пропорциональны оптическим плотностям. Таким образом, они будут очень удобной мерой для установления соотношения между освещенностью объекта и величиной почернения на негативе. В сущности, шкалы прибора, градуированной в люксах, было бы достаточно для того, чтобы дальнейшим расчетом определять экспозиции. Однако существуют разнообразные пересчетные устройства, часто конструктивно связанные с самим прибором, с помощью которых можно быстро и чисто механически определить продолжительность экспозиции, если известно относительное отверстие и чувствительность слоя, или же определить величину относительного отверстия, допустимого при заданной скорости затвора и чувствительности слоя.

Существует несколько принципов подобных устройств. Для примера мы опишем прибор-аэрофотоэкспонометр, опытные образцы которого были сделаны в Государственном Оптическом институте путем небольшой переделки экспонометра, выпущенного одним из советских заводов электроизмерительной аппаратуры.

На фотографии этого прибора (рис. 370) виден фотоэлемент и гальванометр, соединенные в общем корпусе. Шкала гальванометра, градуированная в продолжительностях экспозиции, нанесена на полуокружности вращающегося кольца А. На секторе В, вращающемся вместе с кольцом А, нанесены деления, соответствующие чувствительностям фотографических материалов. На той же оси, независимо от сектора и кольца, с некоторым трением может вращаться индекс С. Сектор и индекс при вращении соприкасаются со шкалой диафрагмы. При пользовании экспонометром индекс устанавливается против деления, отвечающего чувствительности применяемого материала. Затем сектор В вместе с индексом вращается до совпадения индекса с обозначением применяемой при съемке диафрагмы. Если фотографирование производится со светофильтром, то число чувствительности должно быть уменьшено в число раз, равное кратности светофильтра.

Направив фотоэлемент на фотографируемый объект, мы по указанию стрелки гальванометра прямо прочитываем продолжительность экспозиции. Однако безошибочное определение экспозиции с этим прибором возможно только при пра-

вильном пользовании им. Дело в том, что при обычных условиях фотографирования на воздухе часть ландшафта составляет небо. Яркость его настолько велика по сравнению с яркостью земных объектов, что средняя освещенность на фотоэлементе, от которой и зависят показания прибора, оказывается выше той, которая создавалась бы светом, отраженным от фотографируемых предметов. Чтобы избежать ошибки, следует ограничить „угол зрения“ фотоэлемента, приблизив его к углу зрения фотообъектива. Различные фирмы делают это в своих приборах различно. Некоторые ставят перед фотоэлементом решетки, цилиндрические линзы, образующая которых направлена параллельно горизонту, козырьки, прикрывающие фотоэлемент сверху от лучей, идущих от небосвода, и т. п. В хороших экспонометрах эти устройства весьма совершенны и дают возможность получать с ними хорошие результаты.

По самой сути действия фотоэлектрического экспонометра, его показания пропорциональны некоторой средней освещенности, создаваемой на фотоэлементе светом, отраженным от объекта. Но расчет экспозиций мы производим по формуле, в которую входят значения минимальной освещенности объекта и коэффициенту отражения его наиболее темной детали. Таким образом, зная этот коэффициент и горизонтальную освещенность на земной поверхности, можно установить пропорциональность между этой освещенностью и отклонением стрелки фотоэкспонометра. Для того чтобы определить горизонтальную освещенность, достаточно только прикрыть фотоэлемент идеальным диффузором — молочным стеклом — и производить измерения, держа прибор горизонтально направленным к небу. Пользуясь расчетной формулой, можно произвести градуировку прибора на фотометрической скамье. Так именно устроен аэрофотоэкспонометр Государственного Оптического института. Пользование фотоэлектрическими экспонометрами очень просто и удобно, определение же экспозиции производится значительно правильнее и надежнее, чем каким бы то ни было другим способом.

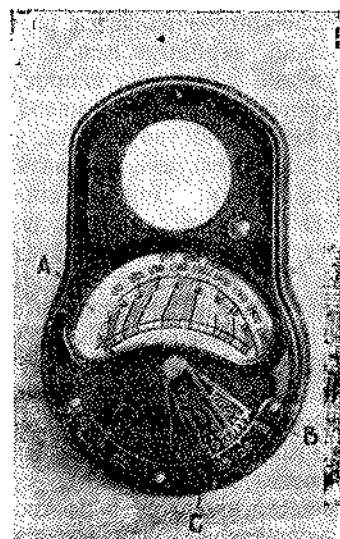


Рис. 370. Фотоэлектрический экспонометр ГОИ

§ 6. Негативный процесс

Для получения видимого изображения экспонированный светочувствительный материал должен быть проявлен.

Для этого экспонированная пластинка или пленка погружаются на необходимое время в проявитель, представляющий собой раствор проявляющего вещества, сульфита натрия, щелочи и бромистого калия.

В § 1 мы указывали, что основной реакцией процесса проявления является восстановление проявляющим веществом иона серебра в металлические атомы



(Red⁻ — анион проявляющего вещества).

Так как проявляющие вещества всегда являются слабыми кислотами или щелочами, т. е. веществами, подвергающимися в растворе электролитической диссоциации, то все факторы, сказывающиеся на степени их диссоциации, будут сказываться и на свойствах проявителя. Бромистое серебро даже в твердом состоянии состоит из ионов серебра и брома. Будучи плохо растворимым веществом, оно все же в небольших количествах переходит при проявлении в раствор, а потому

изменение концентрации ионов серебра и брома в растворе, согласно уравнению закона действующих масс

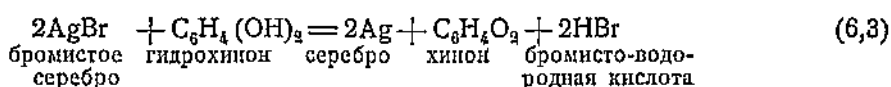
$$[Ag^+][Br^-] = L, \quad (6,2)$$

также будет отражаться на ходе процесса проявления. Известно, что химические реакции протекают тем медленнее, чем меньше концентрации реагирующих веществ. Поэтому всякое изменение состава проявителя, связанное с увеличением концентрации ионов проявляющих веществ или серебра, будет ускорять процесс проявления, всякое обратное изменение будет замедлять его.

Простейшим способом повышения концентрации ионов проявляющего вещества в проявителе является растворение больших количеств этого вещества. Действительно, варьируя концентрации проявляющего вещества в растворе, можно существенно влиять на скорость проявления. Однако повышение концентрации выше некоторых пределов невозможно, так как, с одной стороны, оно ограничивается пределом растворимости, с другой же — при этом настолько повышается вуализирующее действие проявителя, что пользование таким проявителем делается нецелесообразным. Другим способом повышения концентрации ионов проявляющего вещества в растворе является увеличение степени диссоциации этого вещества. Эту возможность создает введение в раствор щелочи. Чем сильнее вводимая щелочь, тем более диссоциированным оказывается проявляющее вещество и тем быстрее, при неизменной общей концентрации этого вещества в растворе, будет идти проявление. Обычно применяемыми щелочами являются (в порядке их силы): NaOH — едкий натр, каустическая сода; K_2CO_3 — углекислый калий (поташ); $NaCO_3$ — углекислый натрий (кальцинированная сода) и $Na_2B_2O_7$ — (бура). Иногда применяются и другие щелочные соли борной и фосфорной кислот.

Количества щелочи, входящие в проявитель, весьма разнообразны и устанавливаются из следующих соображений. Прежде всего большинство проявляющих веществ вводится в раствор в виде солей соляной или серной кислот, и потому количество щелочи в растворе должно быть таким, чтобы произвести вытеснение проявляющего вещества из этих соединений. Далее, это количество должно быть таким, чтобы была достигнута желаемая степень диссоциации проявляющего вещества, и, наконец, оно должно быть таким, чтобы придать проявителю необходимую буферность.

Под буферностью проявителя мы понимаем способность его устойчиво сохранять при подкислении свою щелочность. Это свойство весьма важно, так как восстановление бромистого серебра всегда сопровождается образованием бромистоводородной кислоты по уравнению



и, следовательно, подкислением проявителя. Подкисление проявителя уменьшает диссоциацию проявляющего вещества и таким путем замедляет проявление. Истощение проявителя, выражающееся в значительном замедлении проявления, почти никогда не связано с израсходованием проявляющего вещества. Причиной его в большинстве случаев служит подкисление проявителя и накопление бромистых солей натрия или калия. Соли эти образуются как продукт реакции между бромисто-водородной кислотой, выделяющейся при проявлении, и щелочью, содержащейся в проявителе. Буферность проявителя с углекислыми щелочами всегда больше буферности проявителя со щелочами едкими. И хотя эти последние дают всегда быстро работающие проявители, однако истощаемость проявителей с едкой щелочью настолько велика, что скорость проявления при повторных проявлениях в одном и том же растворе часто оказывается меньше, чем скорость проявления в проявителе с углекислой щелочью, в котором было проявлено столько же пленки.

Замедляющее проявление действия бромистых солей давно и хорошо известно.

Присутствие бромистых солей в проявителе имеет своим последствием снижение чувствительности и увеличение контраста изображения, при общем замедлении проявления. Но так как при этом весьма заметно уменьшается и скорость образования вуали, то бромистый калий является обычным компонентом проявителя. Даже в тех случаях, когда в основном рецепте проявителя бромистые соли отсутствуют, они немедленно образуются после начала проявления. Необходимо отметить, что проявляющие растворы, не содержащие бромистого калия, истощаются сравнительно легко, вследствие его накопления и связанного с этим накоплением быстрого изменения свойств.

Механизм действия бромистого калия сводится к уменьшению концентрации ионов серебра в растворе по уравнению (6,2). Таким образом, выделяющаяся при проявлении бромисто-водородная кислота есть главный фактор истощения проявителя, так как с ней связано и подкисление раствора и накопление в нем бромистых солей.

Наконец, существеннейшим компонентом проявителя является сульфит натрия. Это вещество, взаимодействуя и кинонами и кинониминами (продуктами окисления проявляющих веществ), частично восстанавливает их в исходные вещества и тем относительно уменьшает количество проявляющего вещества, расходуемого в общем итоге на единицу количества восстановленного серебра. С другой стороны, сульфит предохраняет растворенное в проявителе проявляющее вещество от окисления воздухом и этим создает возможность более или менее длительного сохранения проявляющих растворов.

Разнообразие рецептов проявителей и их количество очень велико.

Распространенными рецептами сравнительно быстро работающих проявителей являются: проявитель Чибисова; ускоренный № 2; № 5.

Проявитель ускоренный № 2

Воды (50°)	750 мл
Метол	5 г
Сульфита (кристаллич.)	30 "
Гидрохинона	6 "
Поташа	40 "
Бромистого калия	2 "
Воды до	1 л

Нормальная температура проявления 20°С

Время проявления 4—8 мин.

Проявитель Чибисова

Воды (50°)	750 мл
Метол	1 г
Гидрохинона	5 "
Соды (кристаллич.)	54 "
или безводной	20 "
Сульфита кристаллич.	52 "
Бромистого калия	1 "
Воды до	2 л

Нормальная температура проявления 20°С

Проявитель № 5

Воды (50°)	750 мл
Метол	8,0 г
Гидрохинона	6,0 "
Сульфита (кристаллич.)	90 "
Поташа	40 "
Бромистого калия	2 "
Воды до	1 л

Нормальная температура проявления 20°С

Время проявления 4—8 мин.

Для проявления негативов, подлежащих в дальнейшем увеличению, нужны специальные „мелкозернистые“ проявители. Вопрос о мелкозернистом проявлении является „модным“ за последние годы, в связи с широким распространением камер с форматом снимка 24×36 мм (типа Лейка). Позитивная печать со снимков такого формата всегда производится с увеличением, и это увеличение возможно сделать тем большим, чем меньше будет зернистость негатива.

Разумеется, зернистость негатива тесно связана с размерами зерен в эмульсии. В последние годы по снижению размеров эмульсионных зерен, при сохранении достаточной еще чувствительности, сделаны крупные успехи. В то же время считают, что при подходящем проявлении можно получить зерно негатива более мелким, чем обычно. Однако тщательное исследование показало, что в огромном большинстве случаев необходимая мелкость зерна получается при проявлении до низких (0,6—0,8) значений γ . Весь секрет мелкозернистых проявителей состоит в том, что они оказываются в состоянии уже при небольших временах проявления „вытащить“ всю чувствительность слоя, что делает обычный проявитель (типа ускоренного № 2, например) после довольно длительного проявления. Однако существует несколько проявителей (парафенилендиаминный, например), действительно, даже при одинаковых γ , дающих более мелкое, чем обычно, зерно изображения. Однако эти проявители для практических целей работают слишком медленно. Но и то их „мелкозернистость“ исчезает при значениях γ , больших 1.

Рецепты таких проявителей, применяемых в кинематографии (Агфа-12, Кодак D-76, D-76-д), приводятся ниже.

Проявитель Агфа-12

Воды (50°)	750,0 мл
Метола	8,0 г
Сульфита натрия (безводного)	125,0 „
Соды (безводной)	5,15 „
Бромистого калия	25 „
Холодной воды до	1 л

Проявитель от 8 до 12 мин. при 18° С.

Проявитель Кодак D-76

Воды (50°)	750,0 мл
Метола	2,0 г
Сульфита натрия (безводного)	100,0 „
Гидрохинона	5,0 „
Буры	2,0 „
Холодной воды до	1 л

Растворять в указанном порядке.

Проявлять 15—20 мин. при 18° С.

Каждое последующее проявление должно быть на 20% продолжительнее предшествующего.

Проявитель Кодак D-76-д

Воды (50°)	750 мл
Метола	2,0 г
Сульфита натрия (безводного)	100,0 „
Гидрохинона	5,0 „
Буры	8,0 „
Борной кислоты (кристаллич.)	8,0 „
Холодной воды до	1 л

Руководствоваться теми же указаниями, что в отношении проявителя D-76.

Времена проявления, указанные при соответствующих рецептах, относятся к температуре 20° С. Но возможны, конечно, случаи, когда приходится проявлять при более низких или более высоких температурах. Скорость реакции проявления

в общем подчиняется известному правилу, согласно которому повышение температуры на 10° ускоряет реакцию приблизительно в два раза. Но в то же время понижение температуры ниже 10° создает совершенно особые условия, при которых обычные проявители почти перестают проявлять. Повышение же температуры выше 25° связано не только со значительным ускорением проявления, но и с чрезвычайно большим ростом вуали и, что может быть самое главное, с размягчением и сползанием эмульсионного слоя.

Проявление при низких температурах можно, например, вести с помощью проявителя НТ-1.

Состав раствора таков:

Воды	750 мл	Едкого калия	20 г
Метолла	15 г	Бромистого калия	1 "
Гидрохинона	15 "	Воды до	1 л
Сульфита (безводн.)	50 "		

При температуре 10°C разбавить вдвое и добавить на 1 л раствора 1,5 г бромистого калия.

Проявление при повышенных температурах требует принятия специальных мер предосторожности против сползания эмульсионного слоя. Добавление в проявитель сернокислого натрия в концентрации 100—200 г на литр проявителя дает возможность проявлять при температуре $30\text{—}35^{\circ}$. Однако последующая промывка удаляет соль из слоя, и дальнейшая обработка при этой температуре делается невозможной.

Значительно лучшие результаты дает предварительное (перед проявлением) дублирование эмульсионного слоя в растворе Д-2 состава:

Воды	500 мл
Формалина (40%)	25 "
Соды (безводной или кристаллич.)	13,5 г
Воды до	1000 мл

После 5-минутной обработки в этом растворе и последующей 3-минутной промывки в проточной или 2—3 раза сменяемой воде эмульсионный слой делается вполне температуро-устойчивым и в дальнейшем может обрабатываться при повышенной температуре так же, как обычно. Однако применение обычных проявителей рекомендовано быть не может, так как они при этих температурах слишком сильно вуалируют слой. Для проявления при температурах $25\text{—}35^{\circ}\text{C}$ может быть рекомендован проявитель ВТ-2 состава:

I раствор. Воды ($50\text{—}60^{\circ}$)	500 мл
Парааминофенола	8 г
Сульфита безводного	50 "
или кристаллич.	100 "
II раствор. Воды	400 мл
Соды безводной	50 г
или кристаллич.	135 "
Бромистого калия	5 "

Растворы I и II готовятся отдельно, затем смешиваются, и объем доводится до 1 л. Время проявления — от 6 до 16 мин.

Скорость проявления с изменением температуры меняется настолько, что различные температуры в 1—2° уже заметно сказываются.

Необходимое время проявления определяется обычно с помощью специального графика (так называемого графика Стокса), который строится заранее на основа-

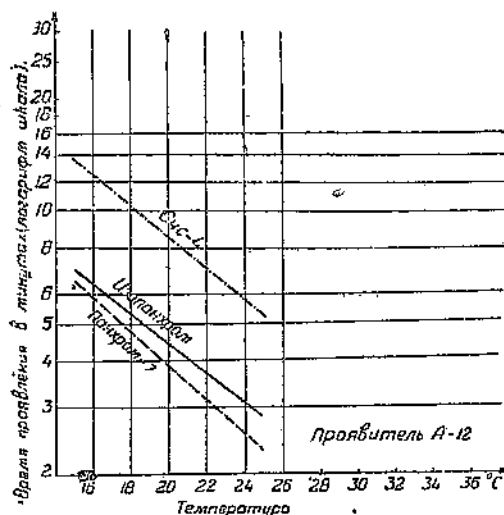


Рис. 371. Графики Стокса для проявителя Агфа-12

нии результатов специального исследования и с помощью которого оказывается возможным определить время проявления, необходимое при данной температуре для достижения определенного значения фактора проявления γ .

Графики Стокса для некоторых проявителей приведены на рис. 371.

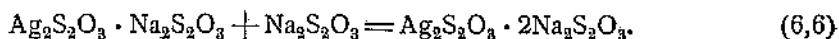
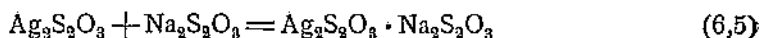
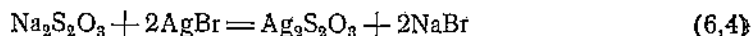
Вопрос о том, до какого значения γ должно вести проявление, в течение длительного времени является предметом дискуссии. В кинематографии, где появление звукозаписи настоятельно потребовало стандартизации режима обработки фильмов, вопрос, в конце концов, был решен в пользу строго стандартного проявления до $\gamma=0,65-0,70$. В военной фотографии, в особенности же в аэрографии, где не всегда возможен оптимальный выбор экспозиций, окончательно этот вопрос еще не решен. Здесь приходится комбинировать повышенные требо-

вания к передаче деталей в тенях, влекущие за собою требование повышения контраста негатива, и требования, вытекающие из условий печати, о чем речь будет далее. Существенно иметь в виду, что недодержанный негатив следует проявлять так долго, как это допускается ростом вуали (обычно до плотности 0,4), и в то же время не дольше, чем до прекращения заметного роста γ и s .

По истечении необходимого времени проявление должно быть прекращено. Это следует производить погружением проявляемого материала на 1 мин. в 2%-ный раствор уксусной кислоты. При этом не только останавливается проявление, но и предотвращается возможность получения в дальнейшем так называемой дихроничной вуали.

После промывки негатив фиксируется, т. е. невосстановленное бромистое серебро растворяется и таким образом удаляется из слоя. Растворение производится в результате действия тиосульфата натрия (распространенное название этого соединения «гипосульфит» не соответствует принятой в настоящее время номенклатуре химических соединений) на бромистое серебро.

Реакция растворения протекает по уравнениям:



Наблюдая изменение внешнего вида негатива при фиксировании, мы заметим, что он, спустя некоторое время после погружения в фиксирующий раствор, становится прозрачным. Этот момент соответствует превращению всего AgBr в $\text{Ag}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Но эта соль плохо растворима, и необходимо, чтобы она превратилась в $\text{Ag}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ для того, чтобы это более растворимое соединение можно было удалить из слоя при последующей промывке. Для этого требуется приблизительно в два раза больше времени, чем для того, чтобы негатив сделался прозрачным.

Если вместе с пластинкой в фиксажную ванну попадут следы щелочного проявителя, то на слое могут образоваться бурые пятна. Чтобы избежать этого, помимо кислой останавливающей ванны, применяется подкисленный фиксаж.

Приведем несколько рецептов фиксажей.

Фиксаж Кодак F-5

Воды (50°)	600,0 мл
Гипосульфита	240,0 г
Сульфита натрия (безводного)	15,0 "
Уксусной кислоты 28%	48,0 "
Борной кислоты (кристаллич.)	7,5 "
Алюминиевых квасцов	15,0 "
Холодной воды до	1,0 л

Растворять в указанном порядке, следя за тем, чтобы последующее вещество растворялось после полного растворения предыдущего.

Фиксировать около 10 мин. в свежем растворе.

В одном литре может фиксироваться до 2000 см² пленки.

Фиксаж кислый дубящий

Приготавливается 4 раствора

I. Воды (50°)	600 мл	III. Воды	100 мл
Гипосульфита	300 г	Сульфита крист.	24 г
II. Воды	90 мл	IV. Воды	10 мл
Хромовых квасцов	5 г	Серной кислоты	2 "

Раствор IV вливается в раствор III, смесь IV и III во II и смесь всех трех в I.

Фиксаж быстрый

Воды	750 мл	Хлористого аммония	25 г
Гипосульфита	360 г	Воды до	1 л

Для того, чтобы негатив мог долго сохраняться, слой должен быть очень тщательно отмыт от последних следов гипосульфита. В противном случае остающийся в слое гипосульфит постепенно окисляет серебро изображения и выделяет серу.

Для полного удаления гипосульфита негатив должен промываться в проточной воде не менее полчаса.

Промытый негатив должен быть высушен. Сушить нужно осторожно, чтобы не расплавить слой, т. е. не следует нагревать выше 25°. Это не относится к слою, задубленному формалином, который безболезненно выдерживает нагревание даже до 100° С. Очень быстро можно высушить негатив, предварительно погрузив его на 5 мин. в 85—90%-ный раствор этилового или метилового спирта.

Неправильно экспонированные и проявленные негативы могут быть частично исправлены, а именно недодержанные негативы могут быть усилены, передержанные — ослаблены. Из многочисленных рецептов для усиления негативов мы приведем способ „хромового“ усиления.

Он состоит в том, что хорошо отфиксированный и промытый негатив полностью отбеливается в растворе состава:

Воды	750,0 мл
K ₂ Cr ₂ O ₇ (бихромат калия, хромпик)	3 г
HCl (соляной кислоты уд. вес 1,19)	7 мл
Воды до	1 л

Отбеленный негатив тщательно промывается и проявляется на свету в энергично работающем свежем проявителе (например, ускоренном № 2 или ГОИ № 5), после чего вновь тщательно промывается. Если усиление недостаточно, операция может быть повторена.

Одним из лучших ослабителей является так называемый Фармеровский ослабитель.

Приготавливается он смешиванием 50 мл раствора 20⁰/₀-ного раствора гипосульфита натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) с 1—5 мл 10⁰/₀-ного раствора красной кровяной соли ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$).

Отфиксированный и промытый негатив (непосредственно после промывки или ранее высушенный) кладут в раствор ослабителя и наблюдают на белом освещенном фоне изменение плотности. Несколько ранее, чем будет достигнута желаемая плотность, негатив вынимают из раствора и тщательно промывают. Раствор годен только однажды.

Проявление несенсибилизированных и ортохроматических слоев может производиться при красном свете. Но современные панхроматические слои настолько чувствительны ко всем длинам волн видимого участка спектра, что проявление их должно вестись в полной темноте. Так как все же бывает необходимо наблюдать за ходом проявления, в особенности в случае сомнения в правильности экспозиции, то можно применять десенсибилизацию слоев перед проявлением. Явление десенсибилизации заключается в том, что некоторые красители обладают способностью снижать чувствительность галогенного серебра, не разрушая скрытого изображения. Десенсибилизация производится купанием пластинки перед проявлением, например, в водном растворе пинакриптолгрюн 1:5000—1:10 000 в течение нескольких (но не менее одной) минут. Раствор может применяться несколько раз. Хорошо десенсибилизирующим раствором является также раствор красителя пинакриптолгельб (1:5000—1:10 000). Краситель растворяется в горячей воде; после охлаждения к раствору добавляется 1—1,5 мл 70⁰/₀-ного раствора уксусной кислоты и 20 мл раствора формалина. Продолжительность предварительного купания—от 2 до 10 мин. Десенсибилизированные слои можно проявлять при довольно сильном оранжево-красном свете.

§ 7. Позитивный процесс

Для получения позитивного изображения негатив должен быть напечатан. Для этого применяются различные сорта бумаг, а также диапозитивные пластинки и пленка. Ассортимент фотографических бумаг чрезвычайно разнообразен. Бумаги по их контрасту различаются: нормальные, контрастные и особо контрастные, а в пределах этих сортов—по номерам, причем больший номер соответствует более контрастной бумаге. По внешнему виду эмульсионного слоя бумаги бывают матовые, полуматовые и глянцевые. Кроме того, бумаги для художественной фотографии различаются по внешнему виду и цвету подложки.

Казалось бы, что вопрос о воспроизведении негатива на позитивном отпечатке очень прост, так как соотношения плотностей заданы, источник света также, и потому вся задача правильной печати сводится к подбору продолжительности экспозиции и проявления. Однако в действительности вопрос сложнее. Прежде всего все бумаги обладают очень небольшой шириотой. Если принять плотность белой баритированной подложки за 0, то плотность наиболее темных мест на глянцевом отпечатке на бром-серебряной бумаге почти никогда не достигает величины большей чем 1,2. Следовательно, весь материал почернений на бумаге определяется отношением 1:15—1:20. Интервал почернений на негативе часто бывает больше, и при таких обстоятельствах возникает трудность, часто и непреодолимая, передачи всех деталей негатива на бумаге.

Очевидно, что если негатив имеет $\gamma=1$, то в прямолинейном участке характеристической кривой соотношение плотностей негатива соответствует соотношению яркостей объекта. Если $\gamma_{\text{поз}}=\gamma_{\text{нег}}=1$, т. е. в позитивном отпечатке $\gamma_{\text{поз}}=1$, то при этом в позитиве мы получим соотношение плотностей деталей,

соответствующее соотношению яркостей их в объекте. Если же γ_{neg} была больше единицы, то для того, чтобы соотношение почернений в позитиве было таким же, как соотношение яркостей объекта, нужно, чтобы произведение $\gamma_{\text{поз}} \cdot \gamma_{\text{neg}} = 1$. То же правило должно соблюдаться и в случае, когда $\gamma_{\text{neg}} < 1$.

Так как ни негативные, ни позитивные слои не имеют обычно прямолинейных характеристических кривых, то это правило (правило Гольдберга), строго говоря, должно относиться к произведению градиентов характеристических кривых* ($g_{\text{поз}} \cdot g_{\text{neg}} = 1$).

Очевидно, что если мы стремимся к тому, чтобы на снимке контраст деталей был больше, чем в объекте, т. е. чтобы на снимке детали различались лучше, чем при визуальном наблюдении, то $g_{\text{поз}} \cdot g_{\text{neg}}$ должно быть больше 1. Как $g_{\text{поз}}$, так и g_{neg} зависят от свойств бумаги и негативного материала, а также от продолжительности проявления. Проявлять бумагу можно не более, чем это возможно без появления на ней первых следов вуали. Наличие вуали на бумаге совершенно недопустимо, так как придает отпечатку неприятный серый тон и снижает различимость деталей. Таким образом, длительность проявления бумаги в каждом конкретном случае более или менее известна.

Вследствие малой ширины бумаги предельная разность плотностей негатива, которая может быть передана на отпечатке, — $\Delta D_{\text{поз}} \sim 1,2$. Отсюда возникает требование к проявлению негатива: оно должно быть таким, чтобы весь интервал яркостей объекта передавался на негативе в пределах разности плотностей, передающихся этим интервалом. В то же время средний градиент используемого негатива должен быть по возможности высок. Если он недостаточно высок, то это должно быть компенсировано за счет выбора для печати более контрастной бумаги. Таким образом, качества негативного отпечатка зависят от интервала яркостей объекта, от свойств негативного и позитивного материала и продолжительности проявления.

Так как при получении небольших количеств отпечатков с данного негатива было бы слишком сложно производить измерения, необходимые для количественных суждений о выборе сорта бумаги, которым следует пользоваться для печати данного негатива, то обычно сорт бумаги подбирается путем пробной печати. При этом руководствуются правилом брать тем более контрастный сорт бумаги, чем менее контрастен негатив. Если же контраст негатива велик, но таков, что разность плотностей не превосходит 1, 2, можно применять менее контрастную бумагу. При этом нужно, чтобы ширина бумаги как в том, так и в другом случае была достаточной. Если эти условия не могут быть соблюдены, то невозможно получить такого отпечатка, в котором были бы переданы все детали негатива.

Практика печати очень проста. Некоторые особенности нужно иметь в виду при печатании аэроснимков, сделанных объективами, у которых наблюдается значительное падение освещенности к краю поля. Плотность негативов, полученных с помощью этих объективов, в центре больше, чем на краях. Поэтому при печати необходимо распределить световой поток в копировальном станке таким образом, чтобы освещенность в центре кадрового окна была больше, чем на краях. Это делается с помощью рационального расположения ламп или оттеняющих экранов.

* Под градиентами негатива в данном отрезке его характеристической кривой мы будем понимать отношение приращения плотности негатива ΔD_{neg} к приращению логарифмов экспозиций, создающих эти плотности: $g_{\text{neg}} = \frac{\Delta D_{\text{neg}}}{\Delta \lg H}$.

Под градиентом позитива мы будем понимать отношение приращения плотности позитива в данном отрезке его характеристической кривой к приращению логарифмов освещенностей, создающих эти плотности, или им пропорциональным величинам приращения плотностей на негативе: $g_{\text{поз}} = \frac{\Delta D_{\text{поз}}}{\Delta \lg H} = \frac{\Delta D_{\text{поз}}}{\Delta D_{\text{neg}}} g_{\text{neg}}$.

Из числа проявителей, предназначенных для проявления бумаг, можно привести рецепт проявителя D-72:

Воды (50—60°)	500 мл
Метол	8 г
Сульфита кристаллич.	90 "
Гидрохинона	12 "
Соды безводной	70 "
или кристаллич.	150 "
Бромистого калия	2 "
Воды до объема	1 л

Этот раствор можно сохранять и перед употреблением разбавлять в 4—5 раз. Длительность проявления — 2—2,5 мин. Прекращение проявления и фиксирование производятся в общих чертах так же, как указано в § 5.

Фотографические бумаги, за исключением некоторых сортов, не сенсibiliзируются и мало чувствительны, а потому работа с ними может производиться при довольно сильном оранжево-красном свете.

§ 8. Аэрофотография

Наиболее распространенным и существенным видом современных военных применений фотографии является аэрофотография.

Основной особенностью аэрофотографии является то, что съемка производится

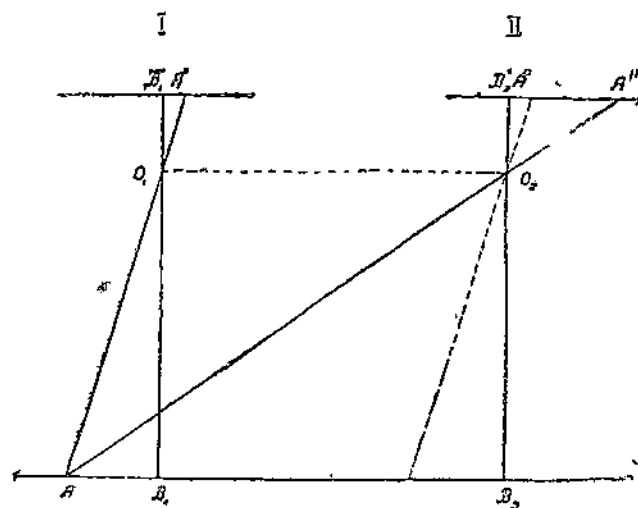


Рис. 372. Схема расчета сдвига изображения

с быстро движущегося самолета. Это значит, что прежде всего возможна только моментальная съемка. Так как скорости современных самолетов очень велики, то продолжительности экспозиции определяются прежде всего требованиями, вытекающими из необходимости устранения сдвига изображения.

Пусть A (рис. 372) — некоторая точка на местности, а A' — изображение ее на фотопленке в момент начала экспозиции. За время экспозиции самолет с фотоаппаратом переместится из положения I в положение II, и изображение точки A получится уже в другом месте снимка A'' . Это

значит, что изображение точки на снимке получится в виде линии $A'A''$. Отрезок $A'A''$ есть величина сдвига изображения λ . Из рассмотрения треугольников O_1AO_2 и $A'O_2A''$ получаем, что

$$\frac{A'A''}{O_1O_2} = \frac{B_2'O_2}{B_2O_2}, \text{ но } A'A'' = \lambda — \text{сдвиг изображения,}$$

$O_1O_2 = wt$ — путь, пройденный самолетом за время экспозиции $t_{\text{сек}}$, при путевой скорости $w_{\text{м/сек}}$,

$B_2'O_2 = f$ — фокусное расстояние объектива в метрах,

$B_2O_2 = h$ — высота съемки в метрах.

Отсюда получаем, что

$$\lambda = \frac{wtf}{h}. \quad (8,1)$$

Резкость снимка определяется числом линий на миллиметр, разрешаемых при данном сочетании объектива и слоя. Если мы поставим требование, чтобы на снимке разрешались 10 линий на миллиметр, то это значит, что допустимый сдвиг λ должен быть меньше 0,1 мм или 0,0001 м. Следовательно,

$$t_{\max} = \frac{\lambda h}{\omega f} = \frac{0,0001 \cdot h}{\omega f}.$$

Таким образом, продолжительность экспозиции при данном фокусном расстоянии объектива должна быть тем меньше, чем с меньшей высоты производится фотографирование и чем больше путевая скорость самолета.

Отношение высоты съемки к фокусному расстоянию объектива $\frac{h}{f} = M$ — есть масштаб съемки (см. гл. 12 о фотографических объективах, § 1). Дешифрирование снимков тем легче, чем больше масштаб снимка, т. е. чем меньше высота, с которой производится фотографирование. Однако для каждого данного сочетания скорости самолета, продолжительности экспозиции и объектива существует наименьшая высота, ниже которой, вследствие наличия сдвига изображения, снимать нельзя.

Из формулы (8,1) очевидно, что

$$h = \frac{\omega f}{\lambda}.$$

Так, например, при скорости самолета 360 км/час, продолжительности экспозиции 1/200 сек. и фокусном расстоянии объектива 50 см наименьшая высота, с которой возможно фотографирование,

$$h_{\min} = \frac{360 \cdot 1000 \cdot 0,5}{200 \cdot 3600 \cdot 0,0002} = 2500 \text{ м.}$$

Однако резкость изображения, получаемого при фотографировании с самолета, зависит не только от скорости и высоты самолета, но и от вибраций самолета, связанных с работой его винтомоторной группы. Если данный объектив на данном фотографическом материале на земле дает разрешение в 20—30 линий на миллиметр, то при съемке с воздуха этот предел разрешения достигнут не будет. Чем лучше амортизирован аэрофотоаппарат, тем ближе предел разрешения на снимке к возможному максимуму.

Вопросы высоты съемки играют очень большую роль в военной аэрофотографии. Чем с большей высоты производится съемка, тем большая площадь захватывается на снимке, но тем меньше масштаб снимка. С другой стороны, съемка с малых высот опасна в тактическом отношении. Поэтому наблюдается тенденция к увеличению фокусных расстояний аэросъемочных объективов и одновременно к увеличению их поля зрения. Для большинства целей аэрофоторазведки необходимо иметь масштаб снимка $\frac{1}{5000} - \frac{1}{10000}$, и только иногда допустимы более мелкие масштабы.

Съемка с воздуха бывает двух родов: плановая и перспективная. Наиболее употребительна по ряду причин плановая аэросъемка. Аэрофотоаппарат, в этом случае, устанавливается на самолете так, чтобы оптическая ось его была нормальна к поверхности земли. Снимок должен быть сделан в момент прохождения самолета над объектом съемки. Расстояние на местности, захватываемое снимком, определяется по формуле

$$L = l M_c,$$

где l — размеры сторон снимка, а M_c — линейный масштаб. Так при съемке в масштабе $\frac{1}{10000}$, т. е. 100 м в 1 см, при формате снимка 18 см $\times$ 18 см, захватываемая площадь равна 3,24 км². Обычно единичный плановый снимок бывает недо-

статочен. Чаще всего необходимо бывает заснять большую площадь или же какой-либо маршрут (реку, дорогу и т. п.). В этом случае производится ряд последовательных снимков, и притом так, чтобы попадающие на снимки участки местности перекрывались друг другом. Обычно снимают с перекрытием до 30—40% от стороны снимка. Расчет интервала времени между снимками производится по формуле

$$T = \frac{aM_c}{w},$$

где T — интервал между снимками, a — рабочая сторона снимка, т. е. сторона снимка его минус перекрытие, M_c — линейный масштаб съемки и w — путевая скорость самолета.

Количество снимков, необходимых для заснятия маршрута, вычисляется по формуле

$$N = \frac{Q}{aM_c},$$

где N — число снимков, Q — длина маршрута съемки в метрах.

Часто бывает, что направление ветра не совпадает с направлением полета. Тогда, вследствие сноса самолета, перекрывающиеся снимки будут ложиться друг на друга, как это указано на рис. 373. Чтобы этого не случилось, аэрофотоаппарат

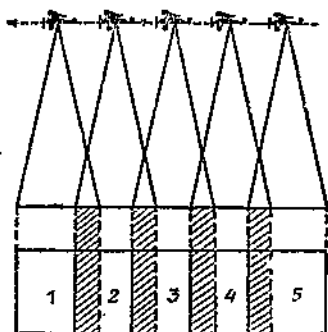


Рис. 373. Схема перекрытия аэроснимков

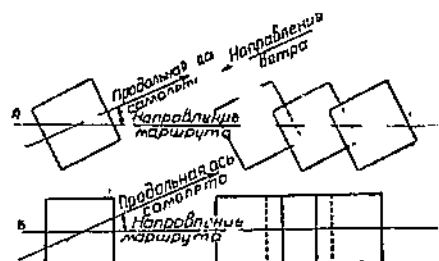


Рис. 374. Схема перекрытия при маршрутной аэросъемке

должен быть повернут по отношению направления оси самолета на угол сноса. Тогда стороны снимков продолжат одна другую и будут параллельны направлению маршрута.

Съемка площади производится путем съемки ряда параллельных маршрутов, сделанных таким образом, чтобы на снимках имело место 50%-ное перекрытие (рис. 374). Съемка этих маршрутов может производиться как одним самолетом, последовательно прокладываящим ряд параллельных курсов, так и группой самолетов, одновременно летящих на параллельных курсах и на заданном расстоянии друг от друга.

Для лучшего различения рельефа местности и для решения ряда задач по дешифрированию снимков очень полезно применение стереоскопического рассматривания снимков. Каждый общий для пары соседних снимков перекрывающийся участок снимка в сущности пригоден для этой цели, так как снят с разных точек базиса, который представляет собою участок пути, пройденный самолетом между двумя снимками.

Величина базиса для воздушной стереоскопической съемки определяется из формулы

$$B = \frac{6,5h}{f},$$

где 6,5 есть нормальное расстояние между глазами в сантиметрах, а h и f имеют прежние значения. Если интервал между снимками будет рассчитан так, чтобы за этот промежуток времени самолет проходил расстояния, равные базису, то мы

получим ряд стереопар снимков, дающих при рассматривании в стереоскоп наибольший стереоскопический эффект.

Таким образом, при аэрофотосъемке необходимо иметь возможность делать ряд последовательных снимков с постоянным и заданным интервалом между ними. Эта возможность обеспечивается конструкцией аэрофотоаппарата, представляющего собою автомат, работающий без участия летчика-наблюдателя, если только заданы, с помощью специальных устройств, условия его работы.

Общая схема устройства аэрофотоаппарата (рис. 375) не отличается от обычной. Но особые условия работы в воздухе, т. е. при низких температурах, и необходимость автоматизации всего съемочного процесса создали ряд конструктивных особенностей, не встречающихся у обычных фотографических аппаратов. К числу этих особенностей принадлежат прежде всего размеры аппарата. Мы уже указывали, что чем большую площадь желательно заснять в данном масштабе, тем большим должен быть формат снимка. Наименьший формат, применяемый в аэрофотографии, — 13×18 см, наибольший — 30×30 см. При современных скоростях самолетов и необходимом перекрытии еще недавно обычное число снимков (50) оказывается недостаточным.

Съемка при таком числе снимков продолжается всего несколько минут, и снимаемый участок местности оказывается сравнительно малым. Так как перезарядка камеры и даже смена кассет в воздухе, по условиям размещения камеры на самолете, оказывается невозможной, то израсходование пленки означает необходимость возвращения и посадки самолета, перезарядки камеры, — т. е. потерю времени. Все это в боевых условиях крайне неудобно и опасно. Вот почему стремятся увеличить формат снимка, т. е. увеличи-

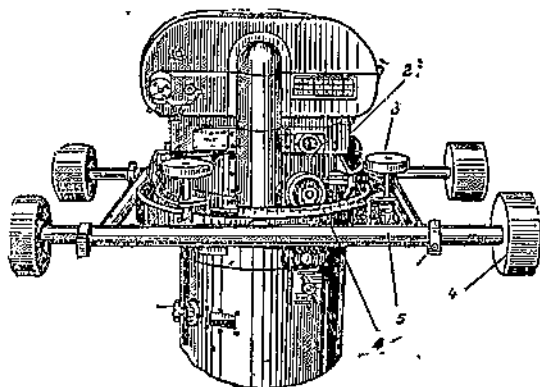


Рис. 375. Аэрофотоаппарат АФА-13

чить размеры снимаемой площади, а также удлинить пленку, т. е. увеличить полезную продолжительность полета. Так, современная германская аэросъемочная камера RB-30 заряжается 60 метрами пленки, т. е. может дать 150 снимков формата 30×30 см. При этом она имеет сменные кассеты, так что при наличии легкого доступа к ней может быть перезаряжена в воздухе. Снимок такой камерой, при масштабе 100 м в сантиметре, составляет $3 \times 3 = 9 \text{ км}^2$, и при 30%-ном перекрытии на одной катушке пленки может быть заснята полоса поверхности земли $3 \times 300 \text{ км}$.

Все современные аэрофотоаппараты, почти без исключения, фотографируют на пленку. Аэрофотопленка применяется в виде рулонов на катушках длиной от 9 до 60 м и шириною 19 и 33 см. Для выравнивания пленки в фокальной плоскости аппарата применяются особые механические или пневматические устройства. Требования к качеству выравнивания очень высоки, так как от него зависит резкость изображения, которая должна быть максимальной. Выравнивать пленку с одной плоскости с точностью до 0,2—0,3 мм при формате кадра 30×30 см очень сложно. Для форматов, больших чем 18×24 см, и для не широкоугольных объективов она достаточно удовлетворительно решается наличием в кассете особого устройства, прижимающего пленку к стеклу, плоскость которого совпадает с фокальной плоскостью объектива. Оптические качества этого стекла должны быть очень высоки, чтобы присутствие его в ходе лучей не влияло на качество изображения. Эти высокие требования к качеству выравнивающего стекла и технологические трудности изготовления таких стекол достаточно больших размеров побудили применить иные способы, из которых наилучшим является нагнетание между объективом и пленкой воздуха в герметически закрытую камеру. Повышенным давлением воздуха пленка прижимается к специальному металлическому столу. При этом эмульсионный слой ее оказывается в фокальной плоскости обь-

ектива. Как устройства для пневматического выравнивания, так и для выравнивания на стекло действуют только в момент экспозиции. В остальное время они автоматически выключаются, чтобы дать возможность механизму кассеты перематывать пленку без трения и царапин.

Центральные затворы применяются в аэрофотокамерах сравнительно редко и только на объективах с малым диаметром (до 60 мм). Наиболее распространен тип затвора «жалюзи», а также шторные затворы со шторкой перед фокальной плоскостью. Движение шторки механически блокировано с захлопкой, закрывающей объектив (изнутри камеры) на время движения щели затвора во время завода. Интервал скоростей затворов не очень велик — обычно от $1/78$ до $1/400$ сек. У затворов типа «жалюзи» он меньше, чем у центральных и шторных.

Механизмы перемотки и выравнивания пленки, а также завода и спуска затвора связаны друг с другом и приводятся в движение от электромотора постоянного тока напряжением 24 вольта, питаемого от генератора самолета. Установка скоро-



Рис. 376. Проявительный прибор ПП-4-бис

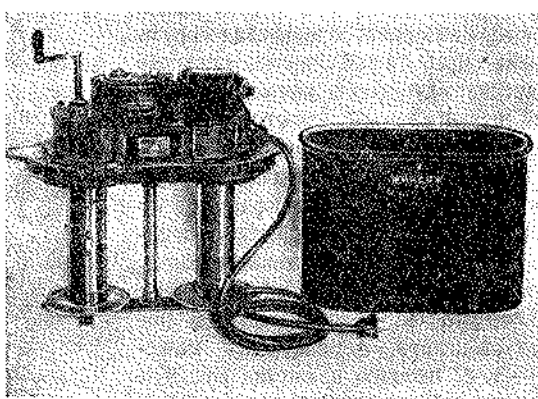


Рис. 377. Проявительный прибор АМПП-2

стей затвора, диафрагм и светофильтров производится перед полетом от руки. Управление механизмом перемотки пленки и работой затвора производится с помощью электрического коммутационного устройства, смонтированного вместе с часовым механизмом в особом командном приборе. Командный прибор связан с камерой несколькими соединенными в один шнур проводами. Он помещается в кабине летчика-наблюдателя, в то время как камера может быть помещена в другом месте самолета, иногда даже недоступном в полете. Для установления интервала работы аэрофотоаппарата достаточно повернуть рукоятку со шкалой секунд, установивши соответствующее деление против индекса. Нажимом рычажка весь механизм аэрофотоаппарата пускается в ход и работает автоматически, пока не будет выключен или же не исчерпается запас пленки. Сигнальная лампочка миганием сигнализирует о бесперебойной работе механизма камеры.

Так как аэросъемка, как правило, производится с больших высот, то почти всегда применяются желтые, оранжевые или красные светофильтры. Выбор светофильтра производится в зависимости от освещенности, наличия дымки и свойств применяемой аэропленки. Некоторые объективы имеют ирисовую диафрагму, большинство же работает только с полным отверстием, а количество поступающего в камеру света регулируется скоростью затвора и кратностью светофильтра.

Для проявления аэронегативов применяются специальные проявительные приборы типа ПП-4 бис и АМПП-2. Принцип работы этих приборов одинаков и состоит в том, что пленка во время проявления перематывается с одной катушки прибора на другую. Таким образом пленка соприкасается с большим объемом проявителя в течение короткого времени только на пути от одной катушки к дру-

гой. В остальное время смоченный проявителем слой эмульсии соприкасается с целлюлодной подложкой нижнего витка пленки, и проявление, если и идет, то только за счет проявителя, поглощенного при набухании. Эти совершенно необычные условия несколько замедляют проявление, причем тем сильнее, чем длиннее проявляемая пленка. Для достижения тех же значений γ , что при проявлении небольшого куска пленки в кювете, нужно проявлять 10 м в 1,2 раза, а 30 м в 1,8 раза дольше.

Перемотка пленки в приборе ПП-4 бис (рис. 376) совершается вручную, в приборе АМП-2 (рис. 377) механически от электромотора. Устройство этих приборов и способ работы с ними показаны на рисунках. Все последующие операции:

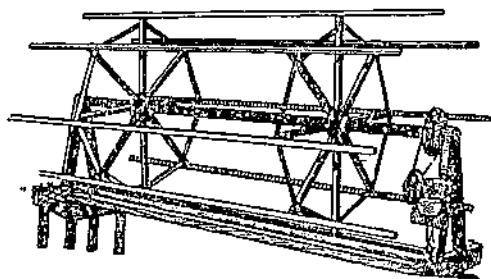


Рис. 378. Сушильный барабан

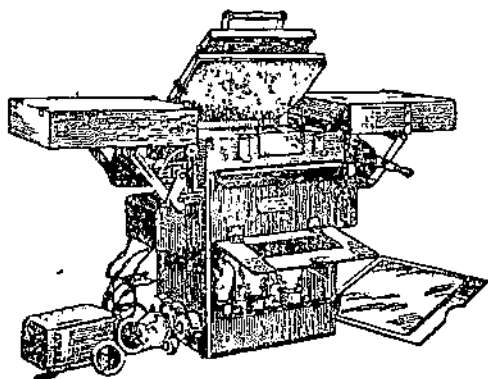


Рис. 379. Копировальный станок для печати аэроснимков

остановка проявления, фиксирование и промывка производятся в тех же приборах переносом механизмов с пленкой из одной кюветы в другую или же из одного бака в другой. Для прибора ПП-4 нужны кюветы 24×30 см, прибор АМП-2 имеет в комплекте 4 десятилитровых бака.

Сушка авиапленки производится на сушильных барабанах (рис. 378) и в специальных приборах для сушки пленки разнообразных конструкций. Ввиду малой распространенности этих приборов мы на них подробнее останавливаться не станем.

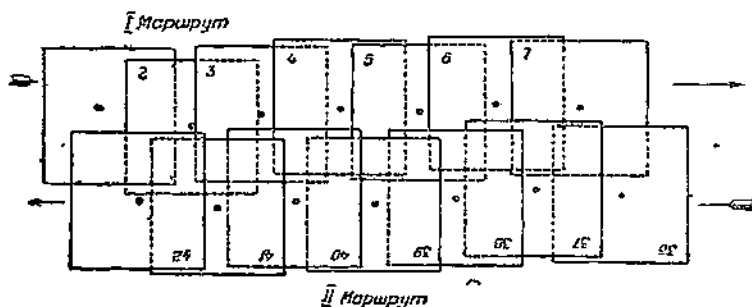


Рис. 380. Схема перекрытия отпечатков при монтаже

Промытые и высушенные аэронегативы нумеруются (если только камера не имела автоматического нумератора, нумерующего снимки в момент экспонирования), и с них делаются позитивные отпечатки. Для этой цели служат копировальные станки наподобие того, который изображен на рис. 379. Эти станки печатают контактно и имеют устройство, переключающее красный свет, горящий при отжатой крышке и тем самым позволяющий просматривать печатаемый негатив, на белый, включаемый в момент, когда крышка плотно прижимает бумагу к негативу. Длительность этого прижимания определяет длительность экспозиции.

Полученные отпечатки „монтируются“, т. е. располагаются в последовательности, соответствующей последовательности маршрутной съемки, так, чтобы пере-

крывающиеся участки аккуратно накладывались друг на друга, и скрепляются (рис. 380). Затем острым ножом прорезают оба отпечатка где-либо в месте перекрытия и наклеивают отпечатки выпитик на тонкий картон или ватманскую бумагу. На полученных таким образом фотосхемах наносят результаты дешифрирования, часто производимого одновременно с монтажом по вторым экземплярам отпечатков. Для дешифрирования применяют лупы 2-, 4- и 10-кратного увеличения, а также стереоскопы для стереоскопического рассматривания пар аэроснимков. Дешифровочный набор, состоящий из таких луп и стереоскопа, представлен на рис. 381 и 382.

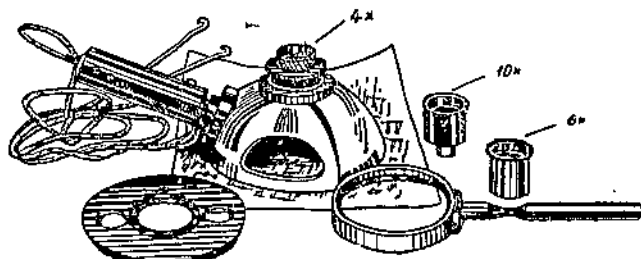


Рис. 381. Набор фотографических луп с держателем-рефлектором для работы при искусственном освещении

Для картографических целей к аэроснимкам предъявляются специальные требования, связанные с необходимостью знания точного масштаба съемки. Для этой цели в кадровом окне камеры помещаются реперы в виде уголков или выступов с отверстиями; расстояния между последними известны. Расстояния между изображениями этих отверстий могут быть легко измерены на отпечатке. Тем самым устанавливается точный масштаб снимка и искажения его, связанные с деформацией бумаги. Так как самолет не может идти все время точно по одной высоте (в особенности при съемке в условиях обстрела), то масштаб съемки в полете

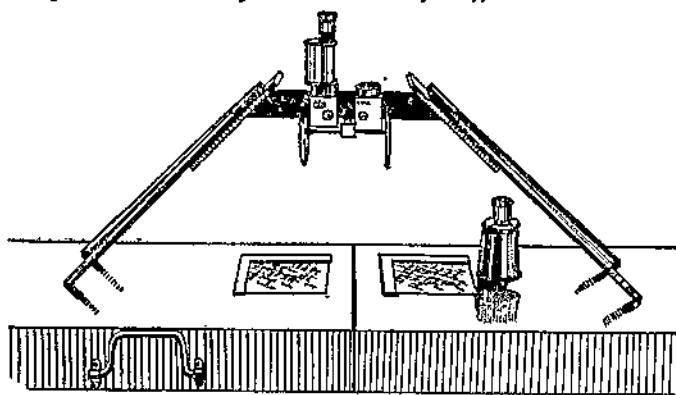


Рис. 382. Складной стереоскоп

меняется. При наклоне в выражах изменяется также и направление оси объектива. Такие снимки плохо монтируются и непригодны непосредственно для целей картографии. Использование их возможно только после трансформирования. Эта операция состоит в том, что печать с негативов производится с помощью проекции. При этом снимку и бумаге придаются такие положения и печать производится с таким увеличением, чтобы масштаб всех снимков был одинаков.

Существует большое число специальных, часто очень сложных, приборов для вычерчивания карт по фотосхемам. Простейший прием состоит в том, что смонтированная фотосхема фотографируется в репродукционной камере со специальным репродукционным объективом в нужном для составления карты масштабе. Контур

снимка очерчиваются тушью и снимаются на кальку, с которой уже размножается карта. Подробно на методах картографической обработки съемки мы не останавливаемся, так как эта область составляет в настоящее время отдельную дисциплину.

Особую область военного применения аэрофотографии составляет фотографический контроль и регистрация результатов бомбометания. Эта задача решается получением отдельных аэроснимков либо обычными аэрофотоаппаратами, либо с помощью специальных устройств. С фотографической точки зрения этот вид аэросъемки ничем особым не отличается, а возникающие при этом штурманские задачи ничего специфически фотографического в себе не содержат.

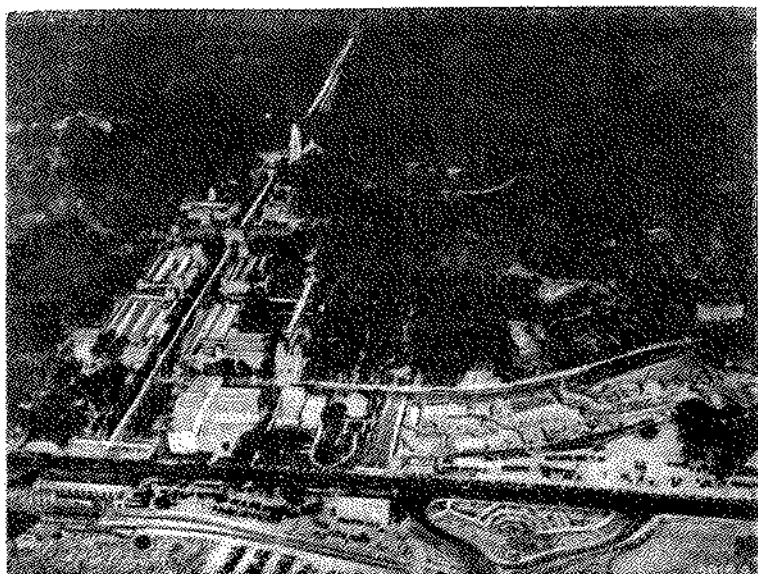


Рис. 383. Снимок города Бостон, сделан ночью с высоты 1500 м

В заключение кратко упомянем о ночном фотографировании с воздуха. Ночное освещение совершенно недостаточно для моментального фотографирования. Даже при лунном освещении (освещенность земной поверхности при полнолунии около 0,2 люкса) для получения нормального экспонированного снимка нужно, чтобы экспозиция продолжалась свыше часа. Следовательно, съемка возможна только при искусственном освещении. Источником света для такой съемки служит специальная ракета или бомба, дающая мгновенную яркость вспышки в несколько миллиардов свечей. Такая бомба сбрасывается на парашюте с самолета и вспыхивает спустя некоторое (строго рассчитанное) время после момента сбрасывания. Затвор камеры имеет устройство, действующее от фотоэлемента, регулирующее продолжительность экспозиции. В армиях разных стран разрабатывалась техника подобной съемки.

В настоящее время имеется полная возможность получать единичные снимки местности с высот от 1000 до 2000 м. Образец снимка, сделанного фотоаппаратом воздушного корпуса армии США, приведен на рис. 383.

Раздел пятый

ОПТИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ

Глава 14

ОПТИЧЕСКАЯ ТЕЛЕФОНΙΑ

§ 1. Введение. § 2. Схема оптического телефона, § 3. Модулятор. § 4. Приемная часть. § 5. Описание оптических телефонов.

§ 1. Введение

Возможность передачи речи на значительном расстоянии без проводов, при помощи световых лучей — оптическая телефония, давно уже привлекала к себе внимание конструкторской и исследовательской мысли. Еще в середине прошлого столетия, когда не только не существовало фотоэлементов, важнейшей части современных оптических телефонов и других приборов оптической связи, но и сам фотоэлектрический эффект еще не был открыт, делались попытки устроить прибор для передачи и приема оптических сигналов, модулированных звуковой частотой. В качестве индикаторов приходящих сигналов устанавливались довольно грубые устройства, действие которых основывалось на тепловом нагревании световыми лучами. Понятно, что такого рода устройства не могли работать удовлетворительно: они были мало чувствительны и обладали большой инерцией. Только после развития техники изготовления фотоэлементов оптическая телефония получила основу для своего развития. В 1880 г. Белл построил так называемый „фотофон“, состоящий из передатчика, модулированного звуковой частотой пучка лучей, и приемника с селеновым фотоэлементом (резистивного типа)*; этот год можно считать годом начала развития оптической телефонии. На протяжении последующих двадцати лет было разработано и описано различными авторами несколько систем оптических телефонов, различавшихся между собою, по преимуществу, способами получения модулированного пучка световых лучей. Последовавшее в начале нынешнего века бурное развитие электротехники и, в частности, техники проводной связи — обычного телеграфа и телефона — оттеснило на задний план оптическую телефонию, а получившее во время первой мировой войны чрезвычайно широкое распространение радио, казалось, совсем вытеснило ее из арсенала техники связи. Опыт той же войны 1914—1918 гг. показал все же, что в большом числе случаев в тактическом отношении оптические средства связи имеют значительные преимущества по отношению к прочим ее видам. Отсутствие необходимости прокладывать линию между пунктами приема и передачи выгодным образом отличает оптическую связь от проводной. С другой стороны, радио, как оказывается, не всегда может успешно разрешить проблему беспроволочной связи.

Оптическая телефония в очень большой степени свободна от недостатков того и другого применения хорошо рассчитанной оптики, и правильный выбор источника света так же, как и светосигнальных приборов, позволяет получить столь малый конус распространения световых сигналов, что перехват их становится практически невозможным. Применение в качестве приемника сигналов фотоэлементов, чувствительных к невидимым (ультрафиолетовым или инфракрасным),

* См. выше II, гл. 5, § 3.

лучам, позволяет пользоваться соответствующими участками спектра, не прибегая к видимым лучам, и таким образом в еще большей степени повысить секретность передачи и полностью исключить демаскирующее действие приборов оптической связи.

В конце прошлой мировой войны интерес к оптической телефонии сильно возрос. Нужно думать, что и в современной войне оптические средства связи находят применение там, где ими особенно удобно пользоваться, например при фортификационной системе изолированных друг от друга, хорошо укрепленных огневых точек, расположенных одна от другой на расстояниях, обеспечивающих прямую видимость между ними. Весьма удобно пользоваться ими и в условиях горного рельефа и вообще сильно пересеченной местности, а также и в широких степных районах, где прямая видимость также может быть большой.

§ 2. Схема оптического телефона

Всякая система оптического телефона состоит из станции отправления (передатчик), станции приема (приемник) и соответствующих источников питания. В некоторых системах оптических телефонов, как мы увидим ниже, один и тот же прибор путем соответствующего переключения может поочередно служить и передатчиком и приемником. Чаше, впрочем, эти функции разделяются в двух независимых аппаратах, иногда конструктивно соединенных в одном общем кожухе. Таким образом обеспечивается возможность одновременного приема и передачи (так называемая „дуплексная связь“).

Основными элементами передающей части прибора является:

- 1) источник света,
- 2) оптическая система, при помощи которой производится перераспределение светового потока источника таким образом, чтобы возможно большая часть его световой энергии была направлена в нужном направлении, и

3) модулирующая система.

Приемная часть содержит:

- 1) оптику, улавливающую возможно большую часть приходящего излучения и направляющую его на приемник-фотоэлемент,
- 2) сам фотоэлемент, трансформирующий принятые световые сигналы в импульсы электрического тока,
- 3) усилитель фотоэлектрических токов и
- 4) телефон.

Выбор источника света для оптического телефона зависит прежде всего от того, предназначается ли данная система для работы в ультрафиолетовых, или видимых, или инфракрасных лучах. При работе в ультрафиолетовой области спектра не без успеха применялась кварцевая ртутная лампа (Майорана) или дуговая лампа с угольными электродами (Циклер). Возможно, что более удобным источником ультрафиолетового света является кварцевая водородная лампа, но, насколько известно, для целей оптической телефонии она не применялась, да и вообще системы телефонов, рассчитанные на ультрафиолетовые лучи, не привились. Причина этого лежит главным образом в трудности подбора подходящих светофильтров, которые полностью бы поглощали лучи, видимые глазом, и пропускали бы без заметного ослабления более коротковолновую область. Существующие кобальтовые, так называемые „черные стекла“ заметно пропускают красный свет. Кроме того, ультрафиолетовые лучи с длинными волнами (примерно до 320 $m\mu$) видимы глазом, адаптированным на темноту, хотя и в очень слабой степени.

В более благоприятных условиях оказываются приборы, в которых используется длинноволновая часть видимого спектра и прилегающая к нему инфракрасная. В этой области заключается большая часть энергии излучения обычных температурных источников света.

Таковы разнообразные лампы накаливания с вольфрамовыми спиралями или шариками, дуговые лампы. Подбор светофильтров в этой области несравненно

легче. С большим удобством можно пользоваться одним из темнокрасных стеклянных светофильтров типа КС-10, КС-11, КС-12*. Впрочем, известны случаи, когда для повышения крутизны подъема кривой пропускания светофильтра используется комбинация двух стекол (телефон Цейсса) типа RG_1-5 и BG_1-3 по каталогу Шотта.

В оптических телефонах стационарного типа с большим радиусом действия в качестве источника света применяется или вольфрамовая точечная лампа или вольтова дуга. Для станций полевого, переносного типа используются лампочкой накаливания, с концентрированной нитью, малой мощности (4—10 ватт). Следует, однако, предостеречь читателя от ложного, но довольно распространенного представления, будто дальность действия светосигнальных аппаратов определяется мощностью источника света. Это неверно. Она зависит лишь от его яркости и от диаметра линзы или зеркала отправляющей станции. Применение большими станциями мощных источников света определяется стремлением повысить яркость (например, в дуговой лампе) или размеры тела свечения для большего удобства наводки на контрстанцию и юстировки прибора.

Газосветные лампы тлеющего разряда пока распространения в светосигнальных приборах не получили, хотя они являются более экономичными, чем лампы накаливания, и более удобными в отношении способа их модулирования. Их основным недостатком является небольшая яркость свечения.

§ 3. Модулятор

Модулятор является наиболее существенной частью передатчика в оптическом телефоне. Его назначение — трансформация механических колебаний звучащей мембраны микрофона в соответствующие им колебания интенсивности светового луча, отправляемого прибором. Разрешение этой задачи возможно различными

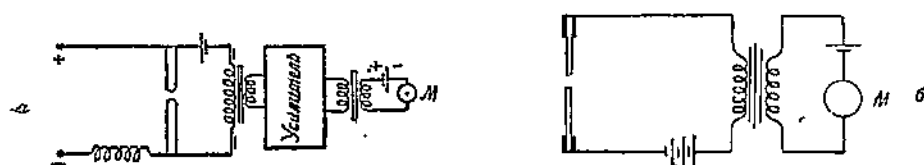


Рис. 384. Схема модулирования светового потока вольтовой дуги:
а — по Симону; б — по Дуделю.

способами. Соответственно существует несколько различных систем модуляторов, которые, однако, для удобства рассмотрения легко объединяются в две основные группы.

Первую группу составляют такие, в которых микрофонные токи, после соответствующего усиления, воздействуют непосредственно на источник света через цепь его питания. В этом случае в такт с изменениями микрофонных токов происходит изменение силы света источника. Это может быть достигнуто различными путями.

Мы укажем здесь только два способа, наиболее часто встречающиеся в практике. На рис. 384, а приведена принципиальная схема для модулирования силы света вольтовой дуги по Симону. Переменная составляющая тока в микрофонной цепи через трансформатор накладывается на постоянный ток питания дуги и модулирует ее пламя с частотой колебаний мембраны микрофона. Другая схема модулирования (по Дуделю) изображена на рис. 384, б. В этой схеме цепь питания дуги постоянного тока развязана от цепи тока модуляции соответствующим включением дросселя и конденсатора.

В современных схемах между цепью источника постоянного тока и цепью микрофона обычно включается промежуточный контур усиления тока модуляции. Таким способом удается достигать большой глубины модуляции пламени дуги,

* См. II, гл. 4, § 6.

т. е. для него величина $\frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%$ близка к 100% (ΔI —наибольшая амплитуда колебаний силы света при модуляции, I —ее среднее значение).

Яркость свечения пламени составляет лишь часть общего свечения дуги, и притом в инфракрасной области небольшую. Большая часть инфракрасной радиации дуги получается за счет свечения кратера. Модулировать свечение кратера значительно труднее. Нужно затрачивать большие мощности в цепи модулятора, чтобы получить даже незначительную по глубине световую модуляцию (при модулировании током изменения яркости происходят только в очень тонком поверхностном слое электродов; более глубокие слои угля в световой модуляции не участвуют и создают некоторую постоянную яркость). На рис. 385 приведена кривая, показывающая зависимость отношения K от частоты модуляции:

$$K = \frac{\frac{\text{амплитуда колеб. силы света дуги}}{\text{постоянн. сост. света}}}{\frac{\text{переменная сост. тока модуляции}}{\text{пост. сила тока питания дуги}}}$$

Из нее видно, что, начиная с частоты 1000 герц, в сторону больших частот величина K становится меньше единицы, т. е. глубина модуляции свечения отстает от глубины модуляции силы тока.

Все же опыты показывают, что даже и при небольшой глубине световой модуляции, порядка немногих процентов, сама величина ΔI из-за большой яркости кратера получается настолько большой, что позволяет вести телефонную передачу на значительные дистанции. При достаточно

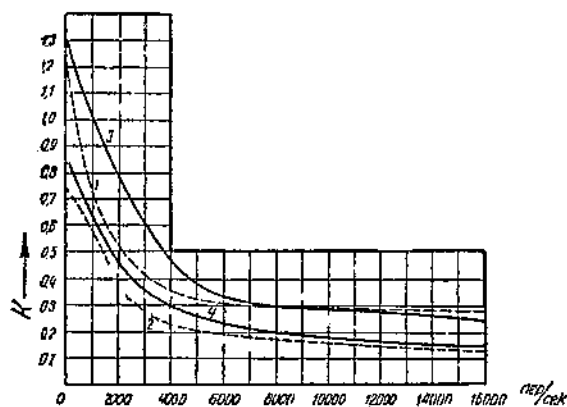


Рис. 385. Зависимость коэффициента K от частоты модуляции вольтовой дуги

1 — чистые угли 8 мм, 11 амп., 66 в; дуга при наблюдении сбоку; 2 — то же; модуляция свечения кратера; 3 — угли Герца-Бека; 30 амп., 6 в; 4 — то же; свечение кратера через дугу

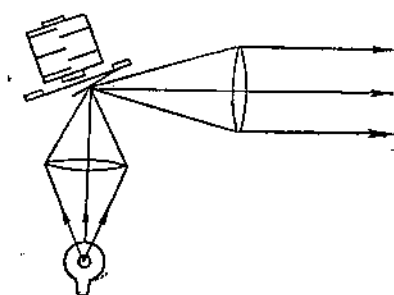


Рис. 386. Схема модулирования светового потока по Майорана.

мощном модуляторе оказывалось возможным довести глубину модуляции свечения кратера до $30\text{--}40\%$. При этом изменения силы света в отправляемом пучке так велики, что прием на инфракрасных лучах возможен на расстоянии свыше 10 км с телефоном, включенным прямо в цепь фотоэлемента без промежуточного усиления.

Большим неудобством применения системы, дающей не полную модуляцию, является неизбежность загрузки фотоэлемента светом постоянной интенсивности, что снижает его чувствительность и увеличивает неустойчивость его работы.

Модулирование свечения газосветной лампы может производиться по схеме рис. 384, как при модуляции пламени дуги. При этом нетрудно получить глубину модуляции, доходящую до 100% .

Во вторую группу могут быть объединены такие методы модуляции, в которых микрофонные токи, с помощью промежуточных механических или электромагнитных устройств, воздействуют на уже сформировавшийся в оптической

системе пучок световых лучей. Сила света самого источника при этом остается неизменной. В своем фотофоне Бэлл применил следующий способ (1880 г.): вышедший из отправительной станции параллельный пучок лучей падал на зеркальную мембрану микрофона и после отражения от нее направлялся к приемной станции. При колебаниях мембраны происходила деформация ее поверхности и, в зависимости от степени отклонения от плоскости, пучок отраженных ею лучей становился более или менее расходящимся. В приемную часть, следовательно, поступало большее или меньшее количество света.

Позднее, в 1929 г., Майорана (Италия) в своей системе телефона усовершенствовал этот способ модуляции света (рис. 386): модулирующее зеркальце, связанное с мембраной, помещено не в параллельном пучке, а в месте изображения источника света — 500-ваттной лампы накаливания. Это позволило значительно уменьшить размеры зеркальца и его вес и тем улучшить качество передачи.

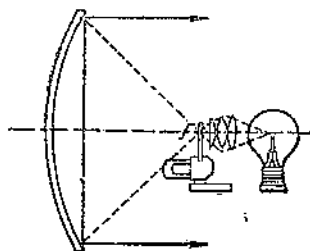


Рис. 387. Модулирование светового потока по методу ножа

Фирма Оффичине Галилео (Италия) в своей системе (1938 г.) применила для получения модулированного света так называемый метод ножа. Принципиальная схема ее модулятора представлена на рис. 387. Изображение источника света — шарика точечной лампы — при помощи светосильного объектива проектируется в фокусе параболического отражателя. В месте его изображения установлен нож модулятор, связанный с якорем электромагнитного устройства таким образом, что в нормальном положении он отрезает по-

ловину пучка лучей, идущих к зеркалу. Катушка электромагнита связана с цепью микрофона, и, когда через нее проходит ток модуляции, якорь оттягивает модулятор в ту или другую сторону, пропуская таким образом к зеркалу больше или меньше света.

Из других методов модуляции пучка лучей механическими системами укажем еще на применяющийся способ модуляции при помощи системы двух решеток. Одна решетка, состоящая из системы чередующихся прозрачных и непрозрачных параллельных штрихов одинаковой ширины, укрепляется в пучке световых лучей непо-

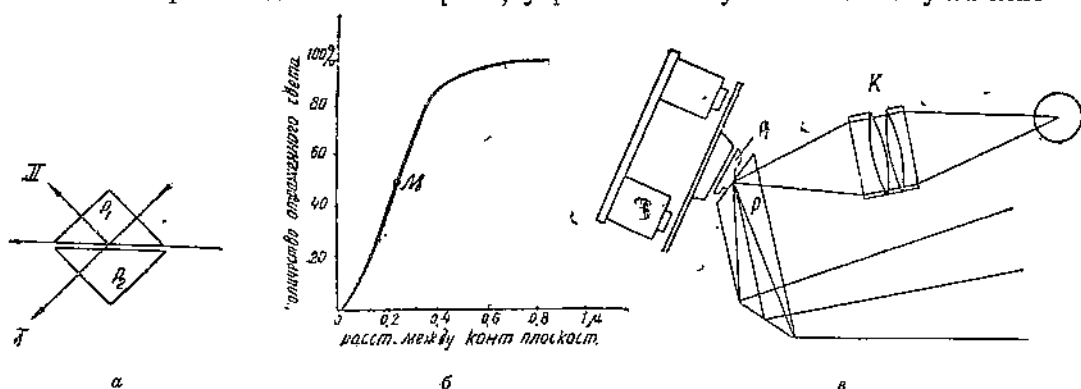


Рис. 388. Модулирование светового потока путем изменения оптического контакта

движно. Другая такая же решетка связана с подвижной частью модулирующей системы и юстируется таким образом, чтобы в среднем положении модулятора половина всей площади отверстий неподвижной решетки прикрывалась соответствующими непрозрачными зонами подвижной решетки. При колебаниях мембраны вследствие смещения решетки от среднего положения в ту или другую сторону к зеркалу передатчика проходит большая или меньшая часть пучка лучей. Сами штрихи решетки могут быть сделаны настолько узкими, чтобы полный переход от максимума к минимуму света происходил при небольших амплитудах колебаний

подвижной части системы. Помещая решетку в узком месте пучка, удастся уменьшить ее размеры и вес и таким образом получить возможность модуляции при относительно небольшой мощности, подводимой к модулятору,—порядка нескольких ватт. Большим недостатком этой системы является потеря в модуляторе половины светового потока, поглощаемого или рассеиваемого непрозрачными зонами решетки.

Фирмой Цейсс (Германия) в 1930 г. была выпущена модель оптического телефона, в котором для модулирования светового потока использовано явление изменения коэффициента отражения лучей от плоской поверхности при посадке ее на оптический контакт с другой плоской поверхностью. Это явление заключается в следующем. Пусть P_1 и P_2 (рис. 388а)—две призмы полного внутреннего отражения, изготовленные обе из стекла с одинаковым показателем преломления и имеющие хорошо полированные поверхности. Сложив их гипотенузными плоскостями вместе так, чтобы не оставалось промежутка, их можно, как говорят, „посадить на оптический контакт“. В оптическом отношении при этом обе призмы будут представлять собою сплошную среду, имеющую форму параллелепипеда. Луч света, падающий на границу раздела и испытывавший до посадки на оптический контакт полное внутреннее отражение, теперь будет полностью проходить через нее насквозь, в прежнем направлении I . Достаточно, однако, создать между призмами воздушный промежуток около одного микрона, чтобы оптический контакт перестал существовать и луч почти полностью отразился от поверхности раздела и вышел из призмы P_1 в направлении II .

При промежутках, меньших одного микрона, свет частично проходит насквозь, частично отражается. Количество отраженного света тем больше, чем больше воздушный промежуток. На рис. 388б изображена зависимость интенсивности отраженного света от величины промежутка между призмами, выраженная в процентах к интенсивности падающего света. Эта кривая получена из опыта и хорошо согласуется с выводами из теории. В средней части кривой изменение интенсивности хорошо следует линейному закону. В этой области количество отраженного света пропорционально перемещению одной из соприкасающихся поверхностей относительно другой, и такая система позволяет производить передачу речи без заметных искажений. Установленный фирмой Цейсс в первой модели оптического телефона модулятор схематически изображен на рис. 388в. Нить лампочки накаливания при помощи конденсора K фокусируется на поверхности контактной площадки призмы P . Вторая соприкасающаяся призма небольших размеров укреплена на довольно массивной мембране, расположенной, как обычно, вблизи полюсов электромагнита. В электрическую цепь его обмоток через специальный усилитель включен микрофон или зуммер. При передаче речи или тона зуммера мембрана модулятора совершает колебания и при этом прижимает или оттягивает призмочку P_1 от поверхности призмы P , образуя или нарушая оптический контакт с нею и таким образом изменяя количество света, отраженного от поверхности раздела между ними. С помощью дифференциального микрометрического винта всю подвижную систему вместе с электромагнитами (она носит общее название „осциллятор“) можно приближать или удалять от неподвижной призмы P и таким образом приводить систему в положение, соответствующее положению точки M на кривой рис. 388б. В этом положении через модулятор проходит половина света, поступающего в него при покоящейся мембране, а другая половина после прохождения через контакт задерживается в приборе.

Модулятор с оптическим контактом применен Цейссом также и во второй, более поздней, модели оптического телефона. Изменению в нем подверглась главным образом конструктивная сторона: круглая мембрана, несущая на себе одну из соприкасающихся призм, заменена более массивной стальной пластинкой-якорем, совершающим качания вблизи четырех полюсов электромагнитов в такт с изменением тока в их катушках. Дифференциальный винт заменен простым винтом, нажим которого на пружинящие части конструкции обеспечивает необходимое перемещение осциллятора.

Мы не будем здесь останавливаться на других возможных методах модуля-

ции, основанных, например, на явлениях поляризации, или интерференции света или на дифракции света от ультразвуковых волн: это выходит из рамок настоящей книги, тем более, что в военной технике эти методы модулирования пока еще не получили распространения.

§ 4. Приемная часть

Приемная часть оптического телефона состоит из входной линзы или зеркала таких же размеров, как и установленные в передатчике, и фотоэлемента, на светочувствительной поверхности которого собирается весь уловленный приемником пучок модулированных лучей. В большинстве случаев оптика приемной

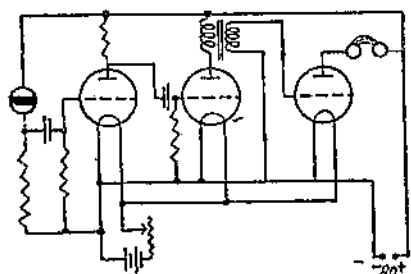


Рис. 389. Усилительная схема в приемнике оптического телефона Цейсса

части независима от оптики передающей, хотя в конструктивном отношении и приемник и передатчик могут представлять собой единый прибор. Впрочем, в первой модели телефона Цейсса выходной объектив передатчика служит и входным объективом приемника. Один и тот же прибор является, поочередно, то передающей станцией, то приемной. Вести одновременно и прием и передачу нельзя. Из известных типов фотоэлементов в первых телефонах применялись селеновые резистивные фотоэлементы, сначала потому, что в то время других фотоэлементов еще не существовало, а позже благодаря тому, что область их чувствительности лежит в видимом спектре. Теперь, когда встретилась настоящая необходимость работы на невидимых лучах, селеновые фотоэлементы вышли из употребления. В некоторых устройствах делались попытки установки фотоэлементов, чувствительных к ультрафиолетовым лучам (Майорана, Циклер, 1927—1928 гг.), но по причинам, изложенным выше, они, насколько известно, не получили широкого использования. Напротив, фотоэлементы, область чувствительности которых расположена в красной и близкой инфракрасной части спектра, часто применяются в различных оптических устройствах. Таковы серебро-цезиевые фотоэлементы эмиссионного типа и серно-таллиевые фотосопротивления („таллофиды“) — из фотоэлементов резистивного типа, с максимумом чувствительности, лежащим между $0,9-1,0 \mu$ (см. II, гл. 5, §§ 2 и 3). Эти последние в силу их высокой чувствительности к инфракрасным лучам и удобства их использования получили широкое распространение.

Электрическое сопротивление фотоэлементов этого типа в темноте составляет от 20—30 до 150—200 мегомов*. При освещенности их в 1 люкс сопротивление фотоэлементов понижается на 40—50%, а в отдельных случаях и больше. Фототоки, проходящие через фотоэлементы при освещении их модулированным светом, в обычных условиях работы очень слабы и недостаточны для непосредственного воздействия на электромагнитную систему телефона. Поэтому приходится в приемную станцию включать элемент предварительного усиления. Одна

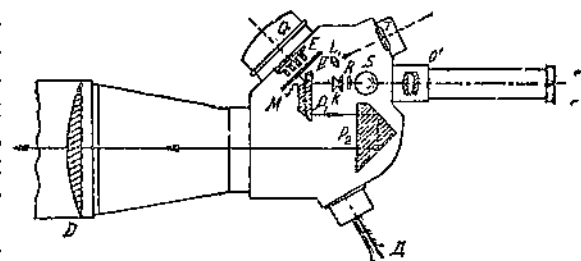


Рис. 390. Схема оптического телефона Цейсса (фирмы Нединско)

* Различные образцы фотоэлементов могут сильно различаться между собою по величине сопротивления: оно может быть от нескольких до тысячи мегомов.

из усилительных схем, применяющаяся в приемнике оптического телефона Цейсса, приведена на рис. 389. Фотоэлемент включен в цепь питающей его батареи последовательно с сопротивлением. При освещении его модулированным светом на зажимах сопротивления появляется переменная составляющая напряжения, которая через конденсатор поступает на вход обычного усилителя на сопротивлениях. Конечный каскад может иметь со ступенями предварительного усиления трансформаторную связь. На выходе усилителя включается головной телефон обычного типа.

В отношении инерционности таллофидные фотоэлементы уступают фотоэлементам эмиссионного типа, но частотная характеристика их значительно лучше частотной характеристики селеновых фотосопротивлений и при введении некоторой коррекции при усилении вполне позволяет вести нормальный телефонный прием.

§ 5. Описание оптических телефонов

Среди различных систем оптических телефонов наибольший практический интерес представляют три: две — немецкие фирмы Цейсс и одна — итальянская «Оффичине Галилео».

Первая, так называемая большая модель оптического телефона Цейсса, была выпущена голландской фирмой Нединско в 1931 г. Ее оптическая схема изображена на рис. 390. Источник света представляет собою лампочку накаливания с концентрированной нитью (10 ватт; 8,5 вольт). После прохождения через конденсор, фокусирующий спираль лампы на поверхность контактной площадки модулятора (диаметр 2 мм), весь пучок делится на две части. Одна из них, прошедшая через оптический контакт, выходит из P' в направлении T . Другая, отразившаяся часть пучка проходит последовательно призмы P_1 и P_2 и выходит через объектив D в виде модулированного параллельного пучка в заданном направлении. Объектив представляет собою ахроматическую систему, диаметром 130 мм и фокусным расстоянием 400 мм. Установка осциллятора, как упоминалось выше, производится при помощи дифференциального винта, который связан с барабаном Q , разделенным по окружности на градусы. Очень малый угол рассеяния пучка лучей (около $0,3^\circ$) повышает секретность передачи и затрудняет возможность перехвата пучка. Еще большей секретности можно достигнуть введением перед лампочкой очень плотного темнокрасного стеклянного светофильтра R , хорошо пропускающего инфракрасные лучи. Для удобства наводки луча на приемную станцию прибор снабжен шестикратным призмным монокуляром. Окуляр O позволяет наблюдать контактную площадку, которая в случае полного оптического контакта представляется в виде темного эллипса, покрытого системой параллельных вертикальных и горизонтальных светлых линий (канавки на поверхности контактной площадки, служащие для облегчения снятия ее с оптического контакта). Внутри эллипса в той же плоскости видна проекция нити лампочки.

Простым переключением в электрической цепи, с которой прибор связан через соединительный кабель L , этот же прибор переводится из положения „передача“ в положение „прием“. Вызванное переключением изменение тока в электромагнитах осциллятора прижимает друг к другу обе контактирующие поверхности P и P' . Свет передающей станции, войдя через объектив, проходит далее призмы P_2 , P_1 и выходит из P' , фокусируясь на фотоэлементе при помощи линзы L . Дальность действия телефона при благоприятных атмосферных условиях днем 6—7 км, ночью 8—9 км.

Весь прибор, кроме штатива-треноги, располагается в двух укладках-ранцах, весом по 17 кг каждая. В одной помещается оптическая приемно-передающая часть, а в другой — усилительная часть и батареи питания. Конструкция допускает включение кабеля в цепи микрофона и телефона, что позволяет вести разговор из пункта, удаленного от места установки самого прибора, например с командного или наблюдательного пункта, или же использовать оптический телефон

Таблица 61

Автор и год	Источник света	Область спектра	Ограничение области спектра	Способ возбуждения	Микрофонное усиление	Оптика передатчиков	Оптика приемников	Приемник	Усилитель фотоэлемента	Дальность действия (в км)
Бэкл 1880	Дуговая лампа	Длинноволновая и видимая	Фотоэлементом	Отражение от колеблющейся мембраны Морзе, ключом со стеклянной пластиной	—	Зеркало или линза	Зеркало	Селеновый фотоэлемент	—	0,25
Циклер 1898	Дуговая лампа 60 А	Ультрафиолетовая $\lambda < 0,35 \mu$	Прозрачными стеклами	Говорящая дуга	—	Металлическое зеркало диаметром 80 см	Кварцевая линза диаметром 4 см	Искровой промежуток при 200 мм Hg	—	1,3
Симон 1901	Дуговая лампа 30 А	Длинноволновая, видимая	Приемным фотоэлементом	Говорящая дуга	—	Зеркало диаметром 40 см	Линза диаметром 30 см	Селеновые фотоэлементы	—	2,5
Румер 1902	Дуговая лампа	Коротковолновая	Приемным фотоэлементом	Говорящая дуга	—	Зеркало диаметром 35 см	Зеркало диаметром 50 см и фок. 70 см	Чувствительный цилиндр из селена 25 мм и 18 мм, селеновый фотоэлемент цилиндрической формы	—	7,0
Румер 1904	Дуговая лампа		Приемным фотоэлементом максим. при 0,7 р.	Говорящая дуга (Дудель)	—	Зеркало диаметром 60 см	Зеркало диаметром 90 см		—	15
Тиринг 1920	—	Длинноволновая, видимая		Говорящая дуга	С усилением	Зеркало диаметром 35 см	Линза диаметром 22 см и фок. 20 см	Селеновый фотоэлемент с поверхностью 1 мм	4 лампы	9,0
Тиринг 1920	Лампа накаливания с вольфрамовой нитью 5 в			Как при горющей дуге	С усилением	—	—	—	—	1
Майорана 1927	Ртутная дуговая лампа	Ультрафиолетовая около 0,365 μ	Фильтром с окисью никеля	Говорящая дуговая лампа (Дудель)	1 лампа	Кварцевая линза 50 см	Кварцевая линза диаметром 50 см и фок. 50 см	Фотоэлемент	1 лампа	16

Продолжение таблицы 61

Автор и год	Источник света	Область спектра	Ограничение области спектра	Способ модуляции	Микрофонное усиление	Оптика переключиков	Оптика приемников	Приемник	Усиление фотоэлемента	Дальность действия (в км)
Циклер 1928	Дуговая лампа	Коротковолновая видимая максим. около 0,48 μ	Принцип фотоэлемента с максим. чувствительностью при 0,438 μ	Говорящая дуга	Лампы	Зеркала различного диаметра	Линза диаметром 11 см	Каплевидный фотоэлемент	3-каскадная лампа Лене	—
Майорана 1929	Лампа накаливания 500 вт	Инфракрасная, около 1 μ	Фильтром с окисью марганца	Отражающее и подвешенное зеркало	—	Линза диаметром 30 см	Линза диаметром 30 см	Серио-галлиевый фотоэлемент	С усиителем	10,2
Ролла и Матца 1930	Дуговая лампа 75 вт, 100 А	Инфракрасная 0,8 — 1,4 μ	Фильтром и приемным фотоэлементом	Телеграф, говорящая дуга	С усиителем	Линза или зеркало диаметром 18 см	Линза	Серио-галлиевый фотоэлемент	С усиителем	18 — средний туман 10 — густой туман
Шротер 1930	Лампа накаливания	Инфракрасная	Фильтром	Элемент Керра	С усиителем	Линза	Зеркало	Селен-теллурический фотоэлемент	С усиителем	Не дано
Шротер 1930	Дуговая лампа 600 вт	Инфракрасная $\lambda > 0,745 \mu$	Фильтром Враттена № 87	Диск с отверстиями (телеграф)	—	Линза	Зеркало	Селен-теллурический фотоэлемент	4 лампы	22,0
Шротер 1930	Тлеющая лампа тлеющая	Инфракрасная макс. 1,08 μ	Фильтром	Как при говорящей дуге	С усиителем	Линза	Зеркало	Селен-теллурический фотоэлемент	С усиителем	Не известно
Цейсс 1930	Лампа накаливания 10 вт	Видимая и красная	Красными фильтрами 3 сортов	Модулятор с оптическим контуром	С усиителем	Линза диаметром 13 см и фокусом 40 см	Та же линза	Серио-галлиевый фотоэлемент	2 трехкаскадных лампы Лене и 1 телефонный кеп 134	8 — ночью 5 — днем
Цейсс 1930	Лампа накаливания 4 вт	Видимая красная и близкая инфракрасная	Красными фильтрами 2 сортов	Модулятор с оптическим контуром	С усиителем с 1 лампой	Линза диаметром 8 см	Линза диаметром 8 см	Серио-галлиевый фотоэлемент	3-ламповый усилитель	6 — ночью 3 — днем
Оффичине Галилео 1933	Лампа тлеющая с вольфрамовой дугой	Видимая и инфракрасная	Черными стеклами	Оптический лож (адаптор)	2-ламповый усилитель	Зеркало диаметром 50 см	Зеркало диаметром 50 см	Серио-галлиевый фотоэлемент Галилео	5-ламповый усилитель	20 — ночью 15 — днем

в качестве промежуточного звена в линии обычного полевого телефона. Такое комбинированное включение оптического телефона может оказаться весьма полезным в участках, подверженных интенсивному обстрелу неприятелем, или на тех участках, на которых по каким-либо причинам оказывается невозможным или неудобным прокладывание кабеля.

Вторая модель (Цейсс) выпуска 1934 г. отличается от первой большей портативностью и облегчением веса, что сопровождается, правда, понижением дальности действия до 3,5 км днем и 5,5 км ночью.

Полная оптическая схема прибора изображена на рис. 391а. Приемная и передающая часть оптики в ней совершенно разделены, хотя и заключены в общем кожухе; имеется два объектива (диаметр 80 мм), позволяющих независимо и одновременно вести передачу и прием. Источник света здесь — лампа накаивания 1 (4 ватта; 4,8 вольта). Ее нить кон-

денсором 3, так же как и в первой модели, фокусируется на грани раздела соприкасающихся между собою призм 4 и 5, одна из которых закреплена на стальной пластине якоря. Модулированный пучок параллельных лучей выходит наружу из объектива 7. Угол расхождения пучка 0,3°. Небольшое вогнутое зеркало 2 направляет в систему часть потока, излучаемого лампочкой в противоположном на-

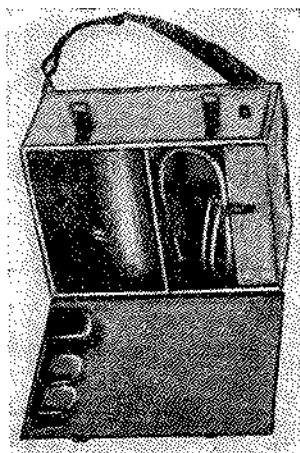
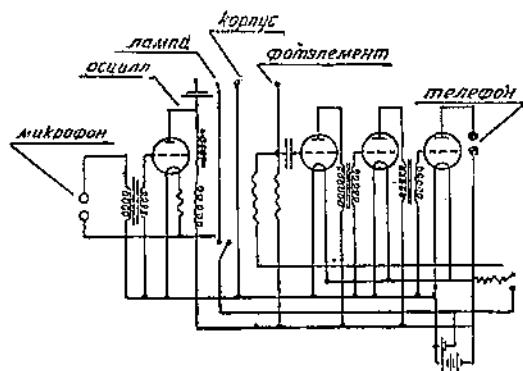
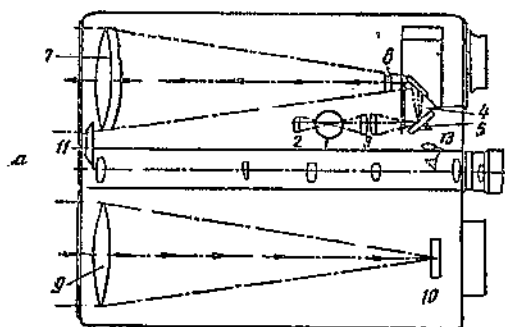


Рис. 391. Оптический телефон Цейсса (модель 1934 г.):

а — оптическая схема; б — внешний вид приемно-передающей станции; в — усилительная схема

правлении. На пути пучка может вводиться рассеивающая линза или светофильтр для инфракрасных лучей 8.

Приемная часть содержит объектив 9 и фотоэлемент 10. В средней части прибора под общей крышкой имеется труба наводки на станцию-корреспондент пятикратного увеличения. Часть пучка лучей, выходящих из объектива передатчика, улавливается призмой 11 и направляется в визирную трубу. Наводка заключается в наведении на противоположную станцию видимой в трубе светящейся спирали лампочки. Другая часть пучка, прошедшая сквозь оптический контакт при помощи системы вспомогательных призм 13, также дает изображение нити лампочки в фокальной плоскости окуляра. Совмещение изображения двух спиралей служит критерием правильной установки лампочки при ее замене.

Прибор уместается в один ящик-ранец ($32,5 \times 42,5 \times 22$ см) и весит 19 кг без треноги, но с полным комплектом батарей питания). Так же как в предыдущей модели, в прибор может быть введен удлиняющий переговорный кабель. В комплект входят, так же как и в первой модели, зуммер и ключ для телеграфной передачи по Морзе на слух и для оптической сигнализации. Внешний вид

оптической части приемно-передающей станции изображен на рис. 391б. Усиленная схема прибора изображена на рис. 391а.

Телефонно-телеграфная станция Оффичине Галилео (тип ОГ-50 1933 г.) является станцией стационарного типа, но может быть и перевозима вьюком или в повозке. Передающая и приемная части разделены. Схема передатчика была изображена на рис. 387. Источником света служит шарик 110-ваттной точечной лампы (55 вольт), изображение которой, как упоминалось выше, фокусируется в плоскости ножа-модулятора, находящегося в фокальной плоскости параболического отражателя. Диаметр отражателя 500 мм, фокус 320 мм. Перед объективом может вводиться красный светофильтр, темный для ночной работы и более светлый для дневной. Приемная часть имеет такое же зеркало и фотоэлемент типа „таллофид“. Усилитель токов модуляции и фототоков заключены каждый в свой ящик. Так же разделено питание. В комплект входит также небольшой генератор постоянного тока для питания точечной лампы и зарядки аккумуляторов, приводимый в движение бензиновым движком. Дальность действия станции на инфракрасных лучах до 20 км ночью и до 15 км днем. Комплект передатчика с усилителем, батареями и треногой, укрепленными на вьючном седле, изображен на рис. 392а, а приемник в рабочем положении на рис. 392б. Уменьшение дальности действия оптических телефонов днем, по сравнению с их „ночной“ дальностью, объясняется свойствами таллофидных фотоэлементов, а именно: нелинейностью их световой характеристики (см. II, гл. 5, § 3). Их чувствительность, т. е. изменение сопротивления ΔR , соответствующее определенному изменению освещенности ΔE , при малых освещенностях значительно больше, чем при больших. Поэтому рассеянный дневной свет, попадая на фотоэлемент, создает дополнительную постоянную нагрузку и понижает его чувствительность.

В заключение мы приводим сводную таблицу 61 известных систем оптических телефонов, с указанием их основных данных, заимствованную из книги Чуданова, „Связь на инфракрасных лучах“. [115].

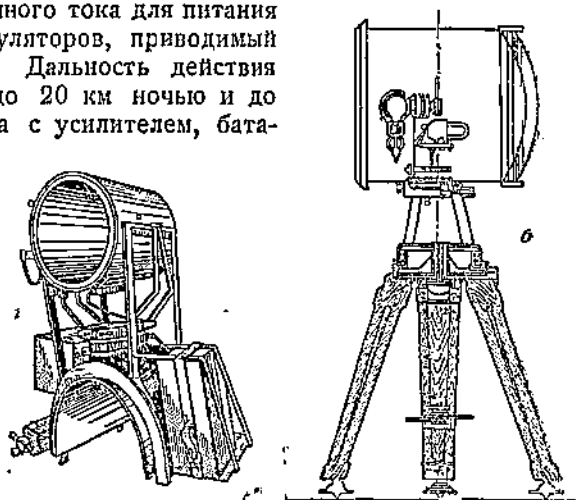


Рис. 392. Телефонно-телеграфная станция Оффичине Галилео:

а — комплект передатчика, укрепленный на вьючном седле; б — приемник в рабочем положении

Глава 15

ОПТИЧЕСКИЕ БЛОКИРОВКИ

§ 1. Блокировка с собственным источником света. § 2. Теплоуловитель. Петоскоп.

В военном деле в числе разнообразных оптических приборов применяются также приборы для оптической блокировки, т. е. устройства, позволяющие регистрировать пересечение непрозрачными движущимися предметами определенной линии визирования или же обнаруживать появление каких-либо объектов в поле зрения оптической системы.

Подобные устройства могут заменить наблюдателя и обычно применяются в тех случаях, когда визуальные наблюдения затруднительны (например, ночью или в тумане) или же когда требуется использовать невидимые участки спектра.

По характеру действия эти устройства могут быть разбиты на две основные группы. К одной из групп относятся устройства, имеющие собственный источник света, удаленный на некоторое расстояние от приемника лучистой энергии, свя-

занного с регистрирующим устройством. Обычно при этом, для целей секретности, используются невидимые участки спектра, чаще всего инфракрасные лучи.

Ко второй группе относятся устройства, не имеющие собственного источника света и регистрирующие изменения, возникающие в каком-либо участке пространства при появлении объекта, оптические свойства которого отличны от оптических свойств фона.

§ 1. Блокировка с собственным источником света

Одной из первых блокировок с собственным источником света была ночная блокировка, осуществленная Шарбоно, во Франции, во время мировой войны 1914—1918 гг.

Принцип действия этой установки основывался на свойстве инфракрасных лучей тушить фосфоресценцию*, возникшую под действием ультрафиолетовых лучей.

Схема блокировки Шарбоно дана на рис. 393. Источником лучистой энергии является прожектор 1 с вольтовой дугой, снабженный светофильтром 2, пропускающим только невидимые инфракрасные лучи. Приемник состоит из отражателя 3, в фокусе которого медленно перемещается бесконечная лента 4,

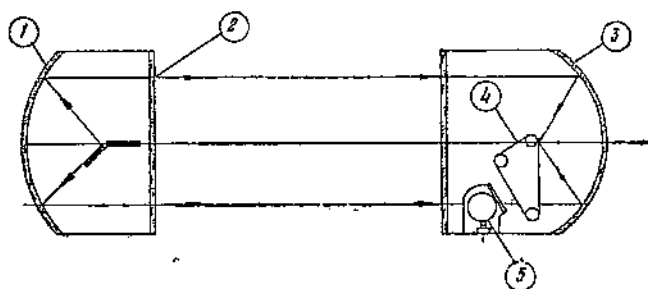


Рис. 393

покрытая слоем фосфоресцирующего вещества (сернистый цинк). Возбуждение фосфоресценции производится путем предварительного облучения ленты ультрафиолетовыми лучами, для чего служит лампа накаливания 5, снабженная специальным светофильтром.

При взаимной наводке приемника и передатчика на фосфоресцирующем слое ленты 4 концентрируются идущие от передатчика инфракрасные лучи, которые гасят фосфоресценцию. Вследствие этого на движущейся ленте 4 появляется непрерывная темная полоса, которая исчезает после повторного облучения ленты ультрафиолетовыми лучами.

При пересечении пучка инфракрасных лучей непрозрачным предметом воздействие на ленту прекращается, и на ней появляется разрыв темной полосы, по которому можно судить о пересечении линии блокировки.

Метод Шарбоно не получил широкого распространения, потому что усовершенствования фотоэлементов и в особенности фотоэлементов, чувствительных к инфракрасным лучам, а также применение усилителей на катодных лампах дали возможность создания значительно более совершенных систем для оптической блокировки.

В иностранной литературе не имеется описаний конкретных современных устройств, предназначенных для военных целей, но несомненно, что подобные устройства применяются во многих армиях и флотах. Косвенным подтверждением этого служит также и то, что многие иностранные фирмы выпускают аналогичные устройства для гражданских целей, как-то: секретная охрана банков, выставочных помещений, музеев и т. п.

Обычно подобная установка состоит из передатчика, приемника и сигнального устройства. Передатчиком чаще всего является лампа накаливания, помещенная

* См. I, гл. I, § 9.

в фокусе проекционной оптической системы (линза или зеркало), снабженной светофильтром, пропускающим только невидимые лучи.

Приемник также снабжается оптической системой, концентрирующей пришедшую от передатчика лучистую энергию на активную поверхность фотоэлемента. Ток фотоэлемента воздействует на сигнальное устройство либо непосредственно, либо предварительно усиливается катодным усилителем. Схема подобной блокировки дана на рис. 394.

Во избежание влияния постороннего, главным образом дневного, света на работу приемника, лучи передатчика модулируют, т. е. делают его прерывистым, а фототоки усиливают при помощи усилителя переменного тока. В этом случае фототоки, возникшие под влиянием посторонней освещенности (которая если и изменяется, то сравнительно медленно), не будут усилены и, следовательно, не окажут влияния на сигнальное устройство.

Для уменьшения влияния посторонней освещенности может быть также применена схема, впервые предложенная Циклером для оптического телефона. Для этого в фокусе оптической системы приемника устанавливается непрозрачный экран с небольшим отверстием, находящимся на оптической оси, а за этим отвер-

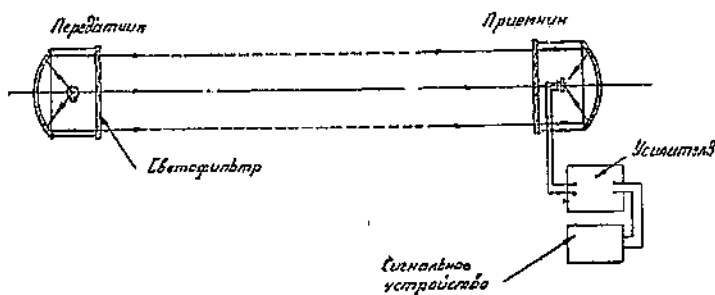


Рис. 394

ствием в конусе расходящихся лучей устанавливается фотоэлемент. Этим способом производится искусственное уменьшение поля зрения фотоэлемента, и тем самым уменьшается нагрузка фотоэлемента посторонним светом.

Одним из основных требований, предъявляемых к блокировкам этого типа, является требование, чтобы она работала, по возможности, в любых метеорологических условиях, в частности во время густого тумана, когда визуальные наблюдения особенно затруднены.

В связи с этим необходимо разъяснить одно часто встречающееся недоразумение, возникающее по поводу применения инфракрасных лучей для целей связи.

Обычно к преимуществам приборов связи, работающих на инфракрасных лучах, относят то, что эти лучи ослабляются туманом в меньшей степени, чем лучи видимые, имеющие более короткую длину волны, а из этого делают необоснованный вывод о том, что туман не является препятствием для связи на инфракрасных лучах. Ошибочность этого вывода, заключающаяся в неправильном применении закона Рэля к реальным туманам, разъяснена выше (III, гл. 9, § 3). Кроме того, абсолютная прозрачность густых туманов настолько мала, что не приходится говорить о какой-либо специальной выгоде применения инфракрасных лучей в густом тумане, за исключением работы на малые дистанции*. Поэтому увеличение надежности действия блокировки в густых туманах должно обеспечиваться другими мерами, в частности увеличением запаса мощности передатчика и повышением чувствительности приемного устройства.

Тем не менее применение инфракрасных лучей для целей оптической блокировки вполне целесообразно, но по другим причинам, а именно потому, что

* Все вышесказанное относится к современному состоянию техники использования инфракрасных лучей. Применение далеких инфракрасных лучей может значительно повысить их эффективность.

максимум излучения ламп накаливания, обычно применяемых в подобного рода устройствах, приходится в ближней инфракрасной части спектра. Кроме того, современные светофильтры позволяют достаточно экономично отфильтровывать инфракрасные лучи, чего нельзя сказать о светофильтрах для лучей ультрафиолетовых.

§ 2. Теплоувелитель. Петоскоп

Задачей теплоувовителя является обнаружение предметов, температура которых отлична от температуры фона. Теплоувовитель состоит из отражателя, в фокусе которого помещена высокочувствительная термопара*, соединенная непосред-

Рис. 395а

Рис. 3956

Первые предложения по применению теплоуловителей относятся к предохранению кораблей от столкновения с айсбергами ночью или в тумане. Идея этого применения заключается в следующем. На корабле устанавливается теплоуловитель, с помощью которого ведется наблюдение за водным пространством, находящимся перед кораблем. Если температура этого пространства однородна, то в цепи термопары будет протекать термоток, соответствующий установившемуся под влиянием радиации воды режиму, который может быть тем или иным способом компенсирован. При появлении в поле зрения теплоуловителя айсберга, температура спая термопары, находящегося в фокусе отражателя, изменится, и вызванное этим изменение термотока будет сигнализировать об опасности. Теплоуловитель может быть использован и для обнаружения нагретых тел (например: трубы корабля, моторы самолета и т. п.).

К недостаткам теплоуловителя следует отнести инерционность термопар и сложность усиления термоотоков.

Другим примером оптической блокировки второй группы является петоскоп, разработанный и описанный Аланом Фиджеральдом в 1935 г. Схема петоскопа дана на рис. 395а.

Оптическая система петоскопа состоит из двух одинаковых объективов L_1 и L_2 , оптические оси которых параллельны и в фокальных плоскостях которых помещены два экрана S_1 и S_2 из чередующихся в шахматном порядке прозрачных и непрозрачных участков. Экран S_2 является негативным изображением экрана S_1 , т. е. каждому прозрачному участку экрана S_1 соответствует непрозрачный участок экрана S_2 .

Свет, прошедший через экраны, при помощи конденсоров C_1 и C_2 направляется на два одинаковых фотоэлемента P_1 и P_2 , являющихся плечами моста Уитстона, состоящего также из сопротивлений R_1 и R_2 . В диагонали моста, через разделительный конденсатор, который пропускает только переменную слагающую фототока, включен усилитель, связанный с сигнальным реле.

Работа петоскопа происходит следующим образом. Прибор наводится на освещенный дневным светом участок пространства, за которым должно вестись наблюдение. Два изображения этого участка получаются на экранах S_1 и S_2 , но те элементы изображения, которые будут пропущены экраном S_1 , задержатся экраном S_2 .

В результате на фотоэлементах P_1 и P_2 создадутся освещенности, которые, при достаточно мелких ячейках экрана, будут равны между собой. Изменение общей освещенности наблюдаемого пространства вызовет одинаковое изменение освещенности фотоэлементов. Когда в поле зрения прибора появится какой-либо движущийся объект, более светлый или более темный, чем фон, произойдет прерывистое нарушение равенства освещенностей фотоэлементов, потому что изображение этого предмета, попадая на прозрачный элемент экрана S_1 , вызовет изменение освещенности фотоэлемента P_1 , в то время как на экране S_2 изображение этого же объекта будет приходиться на непрозрачный элемент изображения и изменения освещенности второго фотоэлемента P_2 не произойдет. В следующий момент времени изображение объекта придется на непрозрачный элемент экрана S_1 и на прозрачный элемент экрана S_2 , в результате чего освещенность фотоэлемента P_2 изменится. Под влиянием изменения освещенности фотоэлементов в диагонали моста Уитстона появится переменный ток, частота которого будет зависеть от размера ячеек экрана и угловой скорости перемещения объекта. Этот ток, после усиления, приводит в действие реле сигнального устройства.

В случае применения прибора для обнаружения объектов, движущихся в одном направлении, шахматные элементы экранов могут быть заменены прозрачными и непрозрачными полосами, ориентированными перпендикулярно движению объектов. Если необходимо определить направление движения объекта, достаточно сделать полосы экрана монотонно убывающими к одному краю поля зрения, тогда перемещение объекта в одном направлении вызывает сигнал с возрастающей частотой, а движение в другом направлении вызывает сигнал с убывающей частотой, и по этому можно судить о направлении движения объекта.

Для блокировки отдельных частей пространства, например участков, прилегающих к дорогам и т. п., участки экрана в соответствующей части пространства, не требующей блокировки, могут быть сделаны непрозрачными, как это показано на рис. 395б.

Общий вид самого прибора дан на рис. 396. Недостатком петоскопа является малый коэффициент использования светового потока, падающего на фотоэлементы, так как амплитуда переменной составляющей фототока практически обуславливается лишь изменением освещенности в одной ячейке экрана, а остальной световой поток создает вредную загрузку фотоэлементов. Поэтому для приведения в действие сигнального устройства требуется большое усиление.

Необходимость применения двух фотоэлементов, характеристики которых должны быть совершенно одинаковыми, также является недостатком прибора.

Петоскоп обнаруживает наличие в поле зрения движущегося объекта, но не дает указания, в каком участке поля зрения находится объект, в то время как для ряда практических применений важно знать положение объекта с большой точностью (например, для целей стрельбы).

Для этой цели предложено большое число различных фотоприцелов, которые в большинстве случаев не являются собственно прицелами, так как не дают решения задачи встречи, а дают лишь возможность автоматического открытия огня при появлении цели на линии визирования, либо позволяют осуществить автоматическую слежку за самолетом.

В качестве примера подобного устройства может служить следующая схема (рис. 397). Поле зрения оптической системы разделяется на 4 квадранта, свет от которых падает на 4 отдельных фотоэлемента. Эти фотоэлементы через усилители воздействуют на механизм наводки прибора таким образом, что при равенстве световых потоков, падающих на фотоэлементы, механизм наводки бездействует.



Рис. 396

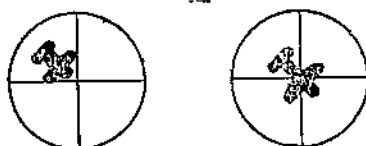


Рис. 397

При уменьшении светового потока в одном из квадрантов автоматически приводится в действие механизм наводки, который поворачивает ось прибора в сторону квадранта с меньшим световым потоком. Таким образом, прибор, будучи предварительно наведен на цель, например на самолет, начинает автоматически следить за целью, стараясь удержать ее в центре поля зрения оптической системы.

Кроме описанного примера, предложено большое число самых разнообразных фотоэлектрических систем для автоматической слежки и стрельбы, однако все эти системы обладают одним принципиальным недостатком, вытекающим из существа их действия и препятствующим широкому применению подобных систем в военном деле: они могут надежно работать лишь при равномерном фоне, на котором проектируется цель. Если же этот фон не равномерный, то изменения освещенности фотоэлемента, при появлении цели в поле зрения прибора, принципиально ничем не отличаются от изменений освещенности, вызываемых неравномерностями фона.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ К I ТОМУ

ОБЩИЕ КУРСЫ И МОНОГРАФИИ

1. Вул Р. В., Физическая оптика, ОНТИ—ГТТИ, 1936.
2. Калитин Н. Н., Актинометрия, Гидрометеорол. изд-во, Л.-М., 1938.
3. Ландсберг Г. С., Общий курс физики, т. III, Оптика, ОНТИ—ГТТИ, 1940.
4. Михельсон В. А., Курс физики, изд. 10-е, ОНТИ—ГТТИ, 1940.
5. Тудоровский А. И., Теория оптических приборов, изд. АН СССР, 1937.
6. Фабри Ш., Введение в фотометрию, ГТТИ, 1934.
7. Федоров Н. Т. (ред.), Спектрофотометрия и ее применение в промышленности.

БИБЛИОГРАФИЯ

8. Иностранную технику — на службу социалистическому строительству, вып. 20, ГХТИ, 1934.
- 9а. Гери Л. Г., Библиографический указатель по оптике. Труды ГОИ, т. XIV (юбилейный), вып. 112—120, стр. 351, № 8, 1941.

СПРАВОЧНИКИ

9. Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П., Справочник по физике. Библиотека учителя, ГУПИ НКП, 1941.
10. Лобко И. А., Стандартные физико-математические единицы и величины, Стандартгиз, 1935.
11. Лесохин А. Ф., Единицы измерений, научно-технические термины и обозначения, сб. ОСТ с пояснениями, Стандартгиз, 1936.
12. Сборник физических констант, под ред. Дорфмана Я. Г. и Фриша С. Э., ОНТИ—ГТТИ, 1937.
13. Сена Л. А., Единицы измерений физических величин, ОНТИ—ГТТИ, 1938.
14. Справочная книга оптика-механика, I, II, ОНТИ—ГТТИ, 1936.
15. Справочник физических, химических и технических величин, тт. I—IX (Техническая энциклопедия), ОГИЗ, 1932.

РАЗДЕЛ I

Глава I. Сведения из физической оптики. Популярная литература

16. Брегг В., Мир света, научно-попул. и юн. лит., 1935.
17. Вавилов С. И., Глаз и солнце, 4-е изд., научно-попул. библ. АН СССР, 1941.
18. Кляссен И., Двенадцать лекций о природе света, ГИЗ, 1922.
19. Хаустен Р. А., Свет и цвета, изд. 2-е, ГТТИ, 1935.

РАЗДЕЛ II

Глава III. Оптическое стекло

20. Варгин В. В., Производство цветного стекла, Гизлегпром, 1940.
21. Варгин В. В., Евстроньев К. С., Стожаров А. И., Кракау К. А. и Прок И. М., Физико-химические свойства стекла и их зависимость от состава, Гизлегпром, 1937.
22. Дралле Р. и Кеппелер Г., Производство стекла, пер. со 2-го изд., под ред. проф. Вайншенкова И. В., т. I. Продсиликат, М., 1928.
23. Дэве К., Руководство по обработке точных оптических стекол, пер. Радченко П. Д., под ред. Линника В. П., Госмашметиздат, 1939.
24. Жуковский Г. Ю., Производство оптических стекол, Петроград, 1918.
25. Качалов Н. Н. и Воано В. Г., Основы производства оптического стекла, ОНТИ, Химиздат, 1936.
26. Лонг Б., Физические свойства и варка стекла, пер. Мельникова К. П., под ред. Ботвинкина О. К., Гизлегпром, 1938.
27. Технология стекла, под ред. Китайгородского И. И., т. II, Гизлегпром, 1939.

Глава IV. Светофильтры

28. Гинзбург В. А., Светофильтры, ОНТИ, НКТП, 1936.
29. Гюббл А., Ортохроматическая фотография и светофильтры, Теакинопечат, 1930.
30. Фаас В. А., Светофильтры, Кинофотоиздат, М., 1936.

Глава V. Фотоэлементы

31. Зворыкин В. К. и Вильсон Е. Д., Фотоэлементы и их применение, ОНТИ, 1936.
32. Ланге В., Фотоэлементы в науке и технике, ГТТИ, 1932.
33. Лукьянов С. Ю., Эмиссионные свойства сурьмяно-цезиевых катодов, Диссертация ЛКИИ, 1941.
34. Симон Г. и Зурман Р., Фотоэлементы и их применение, ОНТИ, 1936.
35. Шиналов М. Г. и Налимов В. В., Фотоэлементы, ОНТИ, 1936.

Глава VI. Люминесцирующие материалы

36. Вавилов С. И., Холодный свет (популярная лекция), 1941.
37. Горев З. М., Светящиеся составы и их применение в светомаскировке, Труды ВЭИ, Госэнергоиздат, М.-Л., 1941.
38. Жиров Н. Ф., Люминофоры, Оборонгиз, 1940.
39. Левшин В. Л., Светящиеся составы, М., 1936.
40. Левшин В. Л., Холодный свет, М., 1938.
41. Riehl N., Physik und technische Anwendungen der Lumineszenz, Berlin, 1941.
42. Rupp, H., Die Leuchtmassen und ihre Verwendung, Berlin, 1937.
43. Vanino L., Die Leuchtfarben. Stuttgart, 1935.

РАЗДЕЛ III

Глава VII. Глаз и его работа

44. Андреев Л. А., Физиология органов чувств, изд. МГУ, 1941.
45. Гассовский Л. Н., Физиологическая оптика и оптические приборы для коррекции, защиты и исследования глаза, гл. III и XXII, Справочная книга оптика-механика, 1934.
46. Гассовский Л. Н., Очковая линза и глаз, Труды Института точной механики и оптики, т. I, вып. 3, 1941.
47. Гассовский Л. Н. и Самсонова В. Г., Глаз и пути повышения эффективности его работы, изд. ВООМП, 1934.
48. Зрительные ощущения и восприятия, сб., Соцэкгиз, 1935.
49. Кекчеев К. Х., Ночное зрение, изд. Советская наука, М., 1942.
50. Кравков В. В., Глаз и его работа, изд. 2-е, Биомедгиз, 1936.
51. Лекиш М., Свет и работа ГТТИ, 1934.
52. Майзель С. О., Свет и зрение, ГТТИ, 1938.
53. Мартин Л., Введение в прикладную оптику, Машметиздат, 1935.
54. Мешков В. В., Что дает хорошее освещение. Эпергониздат, 1932.
55. Мурашкинский В. Е., Мертц А. И., Майзель С. О. и Мильк Г. А., Офтальмологическая оптика, Л., 1928.
56. Рор М., Оптические приборы, Машметиздат, 1933.
57. Труды I-й конференции по физиологической оптике, изд. АН СССР, 1936.
58. Федоров Н. Ф., Общее цветоведение, изд. 2-е, ОНТИ, 1939.
59. Emsley, Visual optics, Hatton Press Ltd., 1939.
60. Henker, Histor. Einführung in die Brillenlehre, Vrl. R. Berkmann, 1927.
61. Luckiesh a Moss, The science of seeing, van-Nostrand Co, 1938.
62. Southall, Introduction to physiological optics, Oxford Univ. Press., 1937.

Глава VIII. Видение в темноте

63. Брюхе Е. и Шерцер О., Геометрическая электронная оптика, пер. с немец., под ред. Остроумова Б. А., Ленинград, 1944.

Глава IX. Дальность видимости и прозрачность атмосферы

64. Березкин В. А., Руководство по актинометрии, ч. II, изд. Главсевморпуть, 1937.
65. Вейцер Ю. М. и Лучинский Г. Ю., Химия и физика маскирующих дымов, Оборонгиз, 1938.
66. Виллет Г., Туман и мгла, их причины, распределение и предсказание, ГМК СССР, М., 1932.
67. Материалы совещания по видимости и прозрачности нижних слоев атмосферы, созванного Гос. Оптическим институтом в Ленинграде 19—22 октября 1940 г., Известия АН СССР, серия географич. и геофизич., № 3 и 4, 1942.
68. Оболенский В. Н., Метеорология, ч. I и II, 1938—1939 гг.
69. Хвостиков И. А., Теория рассеяния света и ее применение к вопросам прозрачности атмосферы и туманов, Успехи физ. наук, т. XXIV, вып. 2, 1940.

70. Хвостиков И. А., Съемка, наблюдение и сигнализация сквозь туман, Военно-физич. библ. ОГИЗ, 1942.
71. Шудейкин В. В., Физика моря, изд. АН СССР, М. — Л., 1941.

Глава X. Светомаскировка

72. Гершун А. А., Принципы и приемы световой маскировки, изд. АН СССР, 1942.
73. Майзель С. О., Теоретические основы светомаскировки, 1940.
74. Майзель С. О., Светомаскировка и маскировка, Гостехиздат, 1942.
75. Статьи в журналах: Transactions illumination engineering society (New York), Transactions illumination engineering society (London), Light and lighting (London).

Главы XI. Принципы оптической маскировки и демаскировки

76. Бурге Е. Ф., Воздушная война и военная маскировка, ЦС Осоавиахим, М., 1936.
77. Бурге Е. Ф., Маскировка в работе воздушных сил, Госвоениздат, 3-е изд., М., 1936.
78. Войсковая маскировка. Временное наставление для инженерных войск РККА (Маск-39), Воениздат, 1939, ч. I. Техника маскировки; ч. II. Маскировка войсковых объектов.
79. Временное наставление по войсковой маскировке РККА, ч. II, техника маскировки, изд-во Военный вестник, 1928.
80. Временное французское наставление по технике маскировки, Госиздат, 1928.
81. Военно-маскировочный сборник ВШВМ, т. I, М., 1923; т. II, М., 1924.
82. Диденко А., Маскировка, Воениздат, 1928.
83. Иконников И. Л., Маскировка бойца зимой, Воениздат, М., 1941.
84. Келейников А. М., Маскировочное окрашивание, ВПА, М., 1928.
85. Келейников А. М., Маскирующие окраски подвижных объектов, Воениздат, М., 1942.
86. Кригер Ф., Маскировка, ГВИЗ, М., 1925.
87. Левитин И. В., Маскировочное окрашивание подводных кораблей, Воениздат, 1940.
88. Маскировка огневой позиции артиллерии, Воениздат, М., 1942.
89. Маскировка. Пособие для военно-инженерных училищ РККА, Воениздат, 2-е изд., М., 1941.
90. Описание табельных маскировочных средств, Воениздат, 1939.
91. Покровский Г. И., Физические основы маскировки, ч. I.
92. Руководство по зимней маскировке, Воениздат, М., 1942.
93. Яновский А. Я., Маскировка железных дорог в условиях ПВО, Трансжелдориздат, 1941.
94. Ясин Е. З., Маскировка ВРС, Воениздат, 1939.
95. Щеглов Д. М., Военная маскировка, Воениздат, 1940.
96. Chesney C. H. R., The art of camouflage, London, 1941.
97. Cott H. B., Adaptive coloration in animals, New York, 1940.

РАЗДЕЛ IV

Фотография

98. Ангелерер Е., Научная фотография, КУБУЧ, Л., 1933.
99. Варгафиг М., Кинофотоматериаловедение, Госкиноиздат, 1939.
100. Гольдберг Е., Образование фотографического изображения, Огонек, 1929.
101. Курс общей фотографии, т. I, под ред. проф. Рабиновича, Искусство, 1936.
102. Неблунт. Общий курс фотографии, Огонек, 1930.
103. Царевский Е. Н., Фотообъективы, КУБУЧ, Л., 1931.
104. Чибисов К. В., Теория фотографических процессов, т. I, Кинофотоиздат, 1939.
105. Щеберстов Б. И., Химия проявителей и проявления, Госкиноиздат, 1941.

Аэрофотография

106. Дешифрирование аэроснимков, текст и атлас, изд. Военно-топографич. упр. Ген. штаба РККА, 1942.
107. Инструкция по использованию аэрофотоснимков в боевой обстановке, ГВИУ КА ГВИ НКО, 1941.
108. Карпович Н. К., Военная аэрофотограмметрия, ГВИ НКО, 1942.
109. Карпович Н. К., Соловьев Е. Н., Рождествен Н. П., Аэрофоторазведывательная служба, ГВИ, 1940.
110. Рождествен Н. П., Аэрофотография, ГВИ, 1942.
111. Сыров А. А., Пособие для фотолаборанта артиллерии, ГВИ НКО, 1940.

РАЗДЕЛ V

Глава XIV и XV. Оптическая телефония

112. Бокин П. Р., Оптическая телефония, Природа, № 6, стр. 39—45, 1937.
113. Грески Гергардт, О применении видимых и невидимых и в особенности инфракрасных лучей для связи и других целей, Успехи физич. наук, вып. 2—9, 1932.
114. Фейгин А. Л., Войсковая сигнализация, ГВИ НКО, 1940.
115. Чудakov П., Связь на инфракрасных лучах, ОНЗ НКВМ, 1934.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аббе инвариант 72
 " диаграмма 97
 " число 134
 Аберрации осевые 84
 " полевые 84
 Аберрация астигматизма 86, 312
 " дисторсии 87, 313
 " комы 85, 311
 " сферическая 85, 310
 " хроматическая 84, 313
 Авнабомбы светящиеся (САБ) 283
 Адаптация 196
 Аккомодация 179, 187
 Активатор 166
 Альбедо 35
 Алюминирование зеркал 132
 Амплитуда колебаний 17
 Аметропия 184, 189
 Анастигмат 87, 312
 Апертура 82
 " числовая 83
 Апостильб 55
 Апохромат 89, 313
 Астигматическая разность 67
 Атмосфера, структура приземного слоя 245
 Ахроматизация оптической системы 89
 Аэрофотография 356
 Аэрофотоаппарат 359

 Блокировки оптические 375
 " " Шарбонно 376
 " " петоскоп 379
 " " теплоуловитель 378
 " " фотоприем 380
 Брюстера угол 35
 Бумаги фотографические 354

 Випа закон смещения 49
 " формула 48
 Видение в невидимых лучах 241
 Видимость горизонтальная (теория) 252
 " дальность 256
 " измерители 262
 Видности кривые 199
 Визир зеркальный 69
 Вишветирование 84
 Возбуждение атомов и молекул 44
 Волны длина 18
 Волновое движение 17
 " число 19
 Выход свечения абсолютный 167
 Вуаль фотографическая 322
 Вязкость стекломассы 115

 Гамма светочувствительного слоя 328
 Гармоническое колебание 17

 Градиент светочувствительного слоя 355
 Гаусса уравнение 78
 Главные точки оптической системы 75
 Глаз амблиопический 228
 " аметропический 185, 189
 " астигматический 186
 " афакический 181
 " гиперметропический 185
 " миопический 185
 " редуцированный 181
 " схематический 181
 " эметропический 184
 " кривые основных возбуждений 234
 " оптической системы недостатки 193
 " точки дальнейшие 184, 215
 График Стокса при проявлении 352
 Глубина резкого изображения фотообъек-
 " тива 306
 Гомоцентрический пучок 62
 Горютера поверхность 210
 Гульстранда формула 180
 Гюбля единицы 145

 Дальностьзоркость 185
 " старческая (пресбиопия) 189
 Дальтонизм 235
 Действующее отверстие (фотообъектива) 301
 Демаскировка 286, 294, 342
 Десенсибилизация 354
 Диаграмма Аббе 97
 Диафаноскоп Шаронова 264
 Диафрагма апертурная или действующая
 " 82, 301
 Диафрагма поля зрения 82
 Дистория 79
 Дисперсия света 31
 " стекла, допуски 134
 " " относительная 134
 " " показатель
 " " (число Аббе) 134
 " " средняя 133
 " " частная 133
 Дисторсия 87, 313
 Диффракция света 21, 39
 " " от щели и круглого от-
 " верстия 39
 Диффракционная решетка 40
 Дихроизм 42
 Длина волны 18
 Дневной свет, спектральный состав 325
 " освещенность 303
 Дымка 247, 252
 " влияние при съемке 295, 338
 Дымкомер Шаронова 262

Закон излучения абсолютно-черного тела (Стефана—Больцмана) 48
 Закон Кирхгофа 47
 " Ламберта 54
 " отражения света 28
 " Пинпера 269
 " Планка 48
 " преломления света 28
 " Рикко 269
 " Рэлея (рассеяния света) 247
 " смещения Випа 49
 " Тальбота 208
 " эквивалентности Эйнштейна 60
 Затвор фотоаппарата 333
 Затухание светящихся составов 167
 Зеркал алюминирование 132
 " серебрянные 132
 Зеркало плоское 63
 Зрачок входной 83, 301
 " выходной 83, 301
 Зрение биноккулярное 209
 " глубинное 211
 " острота 202
 " трехцветное (теория Гельмгольца) 234
 Излучение тепловое 46
 Инвариант Аббе 72
 Индикатрисса рассеяния 248
 Индукция фотографического слоя 330
 Интерференция 25
 Иррадиация 195
 Исправление фотографических негативов 353
 Испускание света, связь с поглощением 43
 Источники света, сила света 59
 " " яркость 59
 Камуфляж 293
 Кванты света 43
 Кирхгофа закон 47
 Клинь стеклянный 70
 Клинь фотометрический 151
 Кольцо Ландольта 204
 Колебания период 17
 Кома 85, 311
 Компенсатор Митэ 305
 Конвергенция, угол ее 211
 Конгруэнтность изображения 64
 Константа фотометрического клина 151
 Контраст 283
 " теневой 285
 " цветовой 284
 " яркостный 284
 Коррекция аберраций простейших оптических систем 91
 Коррекция аметропии 212, 214
 " визуальная 89
 " фотографическая 89
 Коэффициент отражения 35
 " поглощения 34
 " поглощения 34
 " прозрачности воздуха 247, 257
 " пропускания 33
 " " фотообъективов 304
 Кривая характеристическая (фотографических слоев) 328
 Кривизна изображения фотообъектива 312
 Кристаллы двупреломляющие 42
 Крон (стекло) 98
 Кружок освещения фотообъектива 310

Крутизна поглощения (в цветных стеклах) 143
 Ламберта закон 54
 Лампы газосветные 58
 " накаливания 58
 Ландольта кольцо 204
 Линзы астигматические 214
 " анизотропические 224
 " бифокальные 219
 " защитные 227
 " конечной толщиной 80
 " контактные 226
 " отрицательные 74
 " очковые 215
 " положительные 74
 " пунктальные 218
 " сферические 73
 " центрировки 122
 Луч световой 20
 Лучи параксиальные 66
 Лучепреломление двойное 42
 Люкс 55
 Люмен 55
 Люминесценция 44
 Люминофоры (свет. составы) 164—175
 Маскировка, освещение при маск. 274
 Маскировка фар 278
 Масштаб съемки 298
 Материалы сырые при стекловарении 110
 Меридиональное изображение 86
 Митэ компенсатор 305
 Модулирование света (в оптическом телефоне) 366
 Моллирование стекла 117
 "Мошка" в оптическом стекле 114
 Налеты на стекле 125
 Наложения принцип 24
 Неоднородности оптических стекол 135
 Нефелометр ГОИ 265
 Ньютона уравнение 77
 Обработка стекла, горячая 117
 " " холодная, контроль 121
 " " " обдирка 119
 " " " полировка 120
 " " " распиловка 119
 " " " шлифовка 119
 " " " центрировка 122
 Объективы 92, 93
 " фотографические 297
 Оптический контакт 369
 Оптические постоянные стекол (каталожные данные) 99—102
 Оптическая сила линзы 79, 179
 " " приведенная 92
 Оптические системы идеальные 74
 " " сложение 79
 " " телескопические 80
 Оптическая телефония 364
 " " модель Цейсса I 371
 " " " II 374
 " " " Оффичине
 Галлилео 373
 Ортоскопия фотообъектива 313
 Осветители оптического стекла 114
 Освещение естественное 282

Освещение естественное, спектральный состав 325
 Освещенность 52
 " изображения 301
 " ночью 237
 Острота зрения 202
 " глубинного зрения 211
 Острота различения 206
 Отверстие относительное 83, 301
 Ось оптическая 71
 Отжиг оптического стекла 117
 Отражение света 35
 " " диффузное 35
 " " от естественных земных покровов 287
 Отражение, коэффициент 36
 " от металлов 37
 " полное внутреннее 30
 Очки телескопические 229
 " дюрчатые 191
 Очковые оправы 219

 Параксимальная оптика 84
 Период колебания 17
 Перспектива при фотосъемке 308
 Петоскоп 379
 Петцваль условие 313
 Пипера закон 269
 План передний и задний фотообъектива 306
 Планка закон 48
 Плоскости главные 75
 " сопряженные 76
 " фокальные 76
 Плоскость Гаусса 87
 " картинная фотообъектива 306
 " поляризации 21
 " установки 306
 Плотность оптическая 33, 327
 " вуали 328
 Поверхность горютера 210
 Погашения коэффициент 34
 " показатель 34
 Поглощательная способность 47
 Поглощение света в глазу 195
 " " в стекле 138
 " коэффициент 34
 " показатель 34
 Показатель погашения 34
 " поглощения 34
 " преломления 29
 " " относительный 29
 " " стекла, допуск 134
 " " изменение
 " во время отжига 118
 Поле взгляда 224
 " зрения 82
 " " глаза 206
 " " фотообъектива 310
 Полное внутреннее отражение 30
 Поляризация волны 21
 " света круговая 28
 " " эллиптическая 28
 Поляририд 43
 Порог глубинного зрения 212
 " контрастности 200
 " ослепления 201
 " световой абсолютный 199
 " " относительный 199
 Последовательные образы 207
 Постоянная солнечная 282
 Построение изображений 78

Потенциал зажигания фотоэлемента 158
 Поток лучистый 16
 " световой 51
 " фотоактивный 337, 340
 Преломление света 28
 Пресбиопия 189
 Призма Дове 70
 " куб 70
 " отражательная 69
 " пентапризма 70
 " полного внутреннего отражения 69
 " ромбоидальная 70
 " трипель 260

 Принцип наложения 24
 Прицел пулеметный (зеркальный визир) 69
 Прозрачность воздуха в нижних слоях 247
 " коэффициент 247
 Прозрачность воздуха, методы определения 257
 Пропускания коэффициент 33
 Просветление оптики 36
 " " химическое 128
 " " физическое 129
 Процесс фотографический 320
 " " негативный 347
 " " позитивный 354
 Проявитель, буферность 348
 " рецепты 349, 350, 356
 Проявительные приборы 360
 Проявление фотослоя 322
 Прямолинейное распространение света 20
 Пузыри в оптическом стекле 137
 Пуркине явление 199
 Пурпур зрительный 193
 Пучок гомоцентрический 62
 Пятно желтое 192
 " слепое 192

 Разрешающая сила приборов 40
 Разрешающая способность эмульсии 328
 Разрешающая сила фотообъектива 313
 Рассеяние света, закон Рэлея 247
 " индикатрисса 248
 Расстояние фокусное 76
 " " переднее 76
 " " заднее 76
 " " вершинное (в глазу) 180
 Расчет оптических систем 89
 Расчет объективов 92
 " очковых линз 91
 Рефракция вершинная линзы 180
 " глаза 182
 Ринко закон 269
 Роговица 178
 Рэлея формула рассеяния 247

 Сагиттальное изображение точки 86
 Свет монокрохматический 24
 Светимость 53
 Светлота 231
 Световая отдача излучения 57
 " сумма 167
 Световой поток 51
 Светомаскировка 266—280
 Светорассеяние глаза 195
 Светосила зрительной трубы 83
 " объектива 83
 " фотообъектива теоретическая 302
 " " физическая 303
 Светосоставы (постоянные и переменные) 165

Светофильтры аэросъемочные 147, 338
 Светофильтры для выделения узких участков спектра 148
 Светофильтры для инфракрасной области 153
 Светофильтры для селеновых фотоэлементов 150
 Светофильтры для темных фотолабораторий 147
 Светофильтры для ультрафиолетовой области 153
 Светофильтры желатиновые 144
 " кратность 338
 " крутизна 143
 " нейтральные 149
 " спектрофотометрич. характеристики 141
 Светофильтры фокусирующие 340
 Светочувствительность фотоматериалов 328, 330, 340
 Свеча новая 55
 Свилы в оптическом стекле 135
 Сенситометрия 327
 Серебрение зеркал 132
 Сетки оптических приборов 130
 Сетчатка глаза (устройство) 191
 Сила оптическая 79
 Сила света 52
 Синусов условие 85
 Склейка оптических деталей 130
 Скорость света 16
 Слепое пятно 192
 Слепота цветовая 235
 Сложение колебаний 27
 Сложение оптических систем 79
 Снеллена таблица 204
 Созревание фотографической эмульсии 327
 Спектр 32
 " вторичный 89, 313
 " испускания 45
 " линейчатый 45
 " поглощения 45
 " полосатый 45
 " сплошной 45
 Способность излучательная 47
 " поглощательная 47
 Стекло оптическое, варка 112
 " " крон и флинт 98
 " " обработка горячая 117
 " " " холодная 119
 " небьющееся 140
 " теплозащитное 124, 153
 " триплекс 140
 Стекло оптическое, химическая устойчивость 108
 Стекло цветное 122, 145
 Стерadian 52
 Стильб 55
 Стокса график 352
 Сумма световая 167
 Сферометр 121

 Тальбота закон 208
 Телеобъективы 319
 Телескопическая система 80
 Телеувеличение 320
 Температура отжига стекла 117
 Теплоуловитель 378
 Технические условия на оптическое стекло 133
 Технические условия на сырые материалы стекловарения 111

Точка дальнейшая в глазу 184
 Точки в глазу диспаратные 219
 " " идентичные 210
 Точки " оптической системы (главные) 75
 Туманы 247
 Турбулентность атмосферы 326
 Тушение фосфоресценции 45, 242

 Увеличение линейное 75
 " телескопической системы 80
 " угловое 80
 Угол апертурный 83
 " Брюстера 86
 " конвергенции глаз 209
 " параллактический 212
 " поля зрения 82
 " предельный 30
 Уравнение Гаусса 78
 " Ньютона 77
 Уровни энергии 44
 Условие Петцваля 313
 " синусов 85
 Устойчивость ясного видения 209

 Фаза колебаний 17
 Фактор контраста фотослоя 328
 Фактурные свойства земных покровов 291
 Фиксирование 352
 " рецепты 353
 Флинт (стекло) 98
 Флуоресценция 164
 Фовеа (fovea centralis) 192
 Фокус главный 73
 Фокусное расстояние
 заднее и переднее 73, 76
 Фосфоресценция 164
 Фотографический процесс 320
 Фотометр 56
 " звездный 257
 Фотометрия 51
 Фотообъективы светосильные 318
 " теле 319
 " универсальные 315
 " широкоугольные 316
 Фотоприцел 380
 Фотосопротивления (фотоэлементы резистивного действия) 161
 Фотохимическое действие 60
 Фотозлектрический ток 61
 " эффект 60
 Фотоэлементы с заградительным слоем (вентильные) 160
 Фотоэлементы купроксные 161
 Фотоэлементы резистивного действия (таллофиды) 161
 Фотоэлементы селеновые 160
 " эмиссионные 157
 Фронт волны 20

 Характеристика фотоэлемента частотная 161
 Химическая устойчивость оптических стекол 108
 Холста стакан 243
 Хроматическая aberrация 88
 " разность увеличения 88
 Хроматическое исправление объективов 89

 Цвета насыщенность 231
 " светлота 231
 Цвета первичные 233
 " дополнительные 232

- Цветовой тон 231
" треугольник 233
Центр вращения глаза 215
Центрировка линз 122
- Частота колебаний 18
Черное (абсолютно) тело 47
" " законы излучения 47
Черное стекло 278
Чистка оптических деталей 125
Чувствительность глаза (контрастная) 200
Чувствительность фотослоя интегральная 328
Чувствительность фотослоя спектральная 330, 340
Чувствительность фотоэлемента абсолютная 158, 160
Чувствительность фотоэлемента спектральная 159
- Широта фотографического материала 328
Шлифовка стекла 119
- Экспозиции выбор 342
Экспозометры фотоэлектрические 346
Электромагнитные волны 22
Электромагнитная теория света 21
Энергия электромагнитной волны 22
Энергии уровни 44
Эмульсии фотографические 327
Эмульсии фотографические пифрахроматические 330, 340
Эмульсии фотографические ортохроматические 330, 340
Эмульсии фотографические панхроматические 329, 330, 340
Эмульсии фотографические не сенсibilизированные 331, 340
- Явление Пуркинье 199
Яркость природных объектов, интервал 325
Яркость 53
" видимая источника света 54



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	Стр. 3
Краткий обзор состояния оптической промышленности, Д. П. Чехматаев	5

Раздел первый

СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Глава 1. Природа и свойства света. М. А. Ельяшевич	15
§ 1. Общие представления о свете	15
§ 2. Волновое движение и его законы	17
§ 3. Электромагнитные волны	21
§ 4. Принципы наложения	21
§ 5. Распространение света в среде	28
§ 6. Ослабление света при поглощении и отражении	32
§ 7. Дифракция света	38
§ 8. Распространение света в кристаллах	41
§ 9. Испускание и поглощение света	43
✓ § 10. Тепловое излучение	46
§ 11. Измерение лучистой энергии	51
§ 12. Источники света и их свойства	57
§ 13. Действия света	59
 Глава 2. Геометрическая оптика и расчет оптических систем. Д. С. Вологов ..	 61
§ 1. Основные понятия геометрической оптики	62
§ 2. Плоское зеркало и система плоских зеркал	63
§ 3. Преломление светового пучка через плоскости и системы плоскостей	66
§ 4. Преломление светового пучка через сферическую поверхность и системы сферических поверхностей	71
§ 5. Теория идеальной оптической системы	74
§ 6. Сложение оптических систем	79
§ 7. Ограничение пучков в оптических системах	82
§ 8. Погрешности изображений в оптических системах	84
§ 9. О расчете оптических систем	89

Раздел второй

НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИЕМЫ И ПРИБОРЫ

Глава 3. Оптическое стекло. К. С. Евстропьев и А. И. Стожаров	96
А. Технологический процесс изготовления оптического стекла	97
§ 1. Состав стекла и его влияние на оптические постоянные. К. С. Евстропьев	97
§ 2. О химической устойчивости стекол. К. С. Евстропьев	108
§ 3. Основные этапы производства оптического стекла и его обработки. К. С. Евстропьев	110
§ 4. Влияние на показатель преломления температуры и тепловой обработки. А. И. Стожаров	118
§ 5. Холодная обработка стекла. К. С. Евстропьев	119
§ 6. Цветное стекло. К. С. Евстропьев	122
§ 7. Налеты и чистка оптических деталей. К. С. Евстропьев	125
§ 8. Просветление оптики. К. С. Евстропьев	126
§ 9. Изготовление сеток. К. С. Евстропьев	130
§ 10. Склеивка оптических деталей. К. С. Евстропьев	130
§ 11. Серебрение и алюминирование. К. С. Евстропьев	132
Б. Технические условия на оптическое стекло	133
§ 1. Оптические постоянные стекла. А. И. Стожаров	133
§ 2. Оптическая однородность стекла. К. С. Евстропьев	135
§ 3. Поглощение света в стекле. А. И. Стожаров	138

4.	Двойное лучепреломление стекла, <i>А. И. Стожаров</i>	139
5.	Термические и механические свойства стекол	139
Глава 4. Светофильтры. Л. А. Вентман		141
1.	Фотометрические элементы светофильтра	141
2.	Классификация светофильтров	144
3.	Желатиновые светофильтры	144
4.	Светофильтры из стекла, окрашенного в массе	145
5.	Светофильтры из окрашенных пластмасс	145
6.	Светофильтры для фотографических работ	146
7.	Светофильтры для выделения узких участков спектра	148
8.	Светофильтры для равномерного (не селективного) ослабления спектра	149
9.	Светофильтры для "изменения" чувствительности приемника или излучения источника света по спектру	150
10.	Светофильтры с изменяющейся характеристикой — фотометрические клинья	151
11.	Светофильтры для инфракрасной и ультрафиолетовой частей спектра	153
Глава 5. Фотоэлементы. В. В. Балаков		157
1.	Фотоэлементы эмиссионного типа	157
2.	Фотоэлементы с заградительным слоем	160
3.	Фотоэлементы резистивного действия	161
Глава 6. Люминесцирующие материалы, применяемые в военном деле. А. Н. Севченко и П. П. Феофилов		164
1.	Введение. Основные понятия, <i>П. П. Феофилов</i>	164
2.	Люминофоры временного действия, <i>А. Н. Севченко</i>	166
3.	Светящиеся составы постоянного действия, <i>П. П. Феофилов</i>	170
4.	Органические люминофоры, <i>П. П. Феофилов</i>	172
5.	Нанесение люминофоров, <i>П. П. Феофилов</i>	173
6.	Применение люминесцирующих материалов в военном деле, <i>П. П. Феофилов</i>	174

Раздел третий

ГЛАЗ НА ВОЙНЕ

Глава 7. Основные сведения о работе глаза. Л. Н. Гассовский		177
1.	Устройство глаза	178
2.	Основные понятия и формулы диоптрийной оптики	179
3.	Глаз как оптический прибор	181
4.	Построение изображений в глазу. Эмметропический и аметропический глаз	183
5.	Астигматический глаз	186
6.	Аккомодация	187
7.	Аметропический глаз и видимость далеких предметов	189
8.	Устройство сетчатки глаза	191
9.	Недостатки (абберации) оптической системы глаза	193
10.	Явление иррадиации. Поглощение света в глазу	195
11.	Световая и темновая адаптация глаза	196
12.	Световые пороги глаза	198
13.	Контрастная чувствительность глаза	200
14.	Порог ослепления	201
15.	Острота зрения	202
16.	Факторы, влияющие на остроту зрения	204
17.	Возникновение светового ощущения. Последовательные образы. Восприятие мелькающих	207
18.	Быстрота восприятия. Устойчивость ясного видения	208
19.	Биноклярное зрение	209
20.	Восприятие глубинности пространства. Острота глубинного зрения	211
21.	Принцип коррекции аметропического глаза	212
22.	Коррекция аметропии выдвижением окуляра оптического прибора	214
23.	Различные формы очковых линз	215
24.	Очковые линзы для работы на близких расстояниях	218
25.	Точность юстировки очковых линз относительно глаза. Очковые оправы	219
26.	Изменения, вносимые очковой линзой в работу глаза и восприятие предметов внешнего мира. Контактные очковые линзы	222
27.	Защитные очковые линзы	227
28.	Очки для слабовидящих	228
29.	Цвет и цветоощущение	230

30. Цветовой треугольник	233
31. Теория цветного зрения. Аномалии в восприятии цветов	234
32. Пути и значение рационализации зрительных условий работы	235
Глава 8. Световые условия ночью и видение в темноте. А. И. Колядин	237
1. Источники естественного освещения ночью	237
2. Возможность восприятия при низких освещенностях	238
3. Видение в оптические приборы при низких освещенностях	240
4. Видение в невидимых лучах	241
Глава 9. Дальность видимости и прозрачность атмосферы. Н. Э. Ритинь	244
1. Видимость и ее значение	244
2. Структура приземного слоя воздуха	245
3. Ослабление света воздухом	247
4. Теория горизонтальной видимости	252
5. Методы непосредственного определения прозрачности атмосферы	257
6. Методы косвенного определения прозрачности атмосферы	261
Глава 10. Светомаскировка. А. А. Гершун	266
1. Общие положения	266
2. О выборе спектрального состава света при маскировке	268
3. Расчет освещения в условиях маскировки	269
4. Наружное освещение в условиях маскировки	274
5. Освещение помещений в условиях маскировки	275
6. Люминесцентные приемы светомаскировки	277
7. Маскировка фар	278
Глава 11. Принципы военной оптической маскировки и демаскировки. М. М. Гуревич и Е. К. Пуцейко	280
Введение	280
1. Освещение и глаз. М. М. Гуревич	282
2. Контраст. М. М. Гуревич	283
3. Основные задачи оптической маскировки и демаскировки. М. М. Гуревич	286
4. Спектральное и фактурное изучение фонов. Е. К. Пуцейко	287
5. Камуфляж. Е. К. Пуцейко	293
6. Приемы оптической демаскировки. Е. К. Пуцейко	294

Раздел четвертый

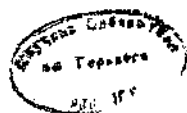
ФОТОГРАФИЯ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

Военное назначение фотографии. Г. П. Фаерман	297
Глава 12. Фотообъективы. К. С. Андронников и А. Л. Курицкий	297
Введение	297
1. Фокусное расстояние объектива и масштаб съемки. А. Л. Курицкий	298
2. Действующее отверстие. Относительное отверстие. А. Л. Курицкий	301
3. Освещенность изображения. Светосила объектива. А. Л. Курицкий	301
4. Глубина резкого изображения. А. Л. Курицкий	306
5. Пространственные представления при рассматривании плоских снимков (одним глазом). А. Л. Курицкий	308
6. Поле зрения объектива. А. Л. Курицкий	310
7. Аберрации фотографических объективов. К. С. Андронников	310
8. Разрешающая сила фотообъективов. К. С. Андронников	313
9. Типы фотографических объективов. К. С. Андронников	315
10. Советские фотообъективы. К. С. Андронников	320
Глава 13. Фотографический процесс. Г. П. Фаерман	320
1. Основы фотографического процесса	320
2. Фотометрические свойства фотографируемого объекта	324
3. Фотографические материалы	327
4. Элементы устройства фотографического аппарата	333
5. Съемочный процесс	336
6. Негативный процесс	347
7. Позитивный процесс	354
8. Аэрофотография	356

Раздел пятый

ОПТИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ

✓ Глава 14. Оптическая телефония. В. В. Балаков	364
§ 1. Введение	364
§ 2. Схема оптического телефона	365
§ 3. Модулятор	366
§ 4. Приемная часть	370
§ 5. Описание оптических телефонов	371
Глава 15. Оптические блокировки. Н. Э. Ритман	375
§ 1. Блокировка с собственным источником света	375
§ 2. Теплоуловитель. Петоскоп	378
Указатель литературы к I тому	381
Предметный указатель	384



Handwritten signature

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
56	23 снизу	воспринимающей	восприимаемой
56	25 снизу	рис. 3 и 6	рис. 164
142	рис. 147, подпись	1—упавший...; 2—прошед- ший...	1—прошедший...; 2—упав- ший...
247	9 сверху	количество яркости	яркость
259	2 снизу	отражения	отражателя
274	6 сверху	рис. 290	рис. 294
302	20, 21, 23 и 27 сверху	Ф	F

Опечатка в военном деле, т. 1