

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"



# Фізика (додатковий курс)

комплект дидактичних матеріалів з дисципліни  
для студентів спеціальності  
«Прилади та системи екологічного моніторингу»

*Старший викладач, к. т. н.*

*Маркін Максим  
Олександрович*

*E-mail: [наука@naeps.kpi.ua](mailto:наука@naeps.kpi.ua)*

Київ-2012

# Физика как наука

**Физика** – наука, изучающая закономерности окружающего мира, его структуру и эволюцию.

*Законы физики формулируются в математической форме, математика предоставляет аппарат, с помощью которого формулируются физические закономерности.*

**Экспериментальная физика** исследует собственно природные закономерности, часто в специально выбранных условиях (*физический эксперимент*); эти закономерности выражаются в численной форме.

**Теоретическая физика** ставит в соответствие природным закономерностям (определенным экспериментально) *математические модели*. Изучение этих моделей (*физических теорий*) должно иметь предсказательную силу: поведение модели должно описывать не только те эксперименты, на основе которых она была создана, но и другие, еще не поставленные эксперименты. Физическая теория применима к некоторому кругу явлений и не обязана адекватно описывать явления за своими *пределами применимости*. Более общие теории способны описать более широкий круг явлений, но они могут быть достаточно сложны; поэтому менее общие теории часто применяются там, где их точности достаточно.

# Измерение в физике

Получаемые в опыте физические величины имеют некоторое численное выражение, получаемое в результате *измерения*.

**Измерение** - определение отношения измеряемой величины к другой величине, принятой за единицу (*единицу измерения*). Измерение проводится с помощью *измерительных приборов*. Единицы измерения определяются с помощью эталонных величин (*эталонов*). Исторически существовало и до сих пор существует множество эталонов, например, *метр, килограмм, ампер* и т. д.

Любое измерение имеет определенную точность, характеризуемую *погрешностью измерения*.

В некоторых случаях физическая величина оценивается по условным шкалам, например, *шкала твердости Мооса*.

Вопросами, связанными с методами и техникой измерения, занимается *метрология*.

Существуют различные наборы эталонов. Совокупность эталонов определяет *систему единиц измерения*. Сегодня используется несколько систем единиц, основной является *международная система единиц СИ*.

Помимо нее, используется также система СГС и другие. В некоторых разделах физики используются, из соображения удобства, особые системы единиц (например, атомная система единиц). Количество основных единиц измерения в разных системах единиц различно, оно определяется соображениями удобства.

Прежде эталоны воспроизводились с помощью легкодоступных предметов, например, длины руки или ноги. Впоследствии возникла потребность в более точных эталонах; тогда в их качестве стали использовать отличавшиеся постоянством величины. Например, в качестве единицы длины использовалась доля длины Парижского меридиана. Сегодня в роли эталонов все больше используются прецизионные атомные единицы. Например, сегодня метр в СИ определен через секунду скорость света в вакууме, а секунда - через период определенного типа излучения атома цезия-133.

**Система единиц СИ.** В СИ имеется 7 **основных единиц**:

- **метр** - единица длины;
- **секунда** - единица времени;
- **килограмм** - единица массы;
- **моль** - единица количества вещества;
- **ампер** - единица силы тока;
- **кельвин** - единица термодинамической температуры;
- **кандела** - единица силы света.

К этим единицам примыкают единицы измерения угла **радиан** и телесного угла **стерадиан**.

Используются также **кратные** и **дольные** единицы, соответствующие произведению единицы на 10 в некоторой степени:

$10^1$ – дека	$10^9$ – гига	$10^{-1}$ – деци	$10^{-9}$ – нано
$10^2$ – гекто	$10^{12}$ – тера	$10^{-2}$ – санти	$10^{-12}$ – пико
$10^3$ – кило	$10^{15}$ – пета	$10^{-3}$ – милли	$10^{-15}$ – фемто
$10^6$ – мега	$10^{18}$ – экса	$10^{-6}$ – микро	$10^{-18}$ – атто

Название *килограмм* уже содержит приставку *кило-*, поэтому с приставками используется *грамм*: *миллиграмм* и т. п.

Помимо основных единиц, используются **производные единицы**.

Например, скорость выражается в единицах длины, отнесенной к единице времени:  $[v] = \text{м/с}$ .

Многие производные единицы имеют свои названия. Например, единица силы  $[F] = \text{кг}\cdot\text{м/с}^2 = \text{Н}$ .

Единицы, названные в честь людей, пишутся с **маленькой** буквы, будучи написанными полностью, но их сокращения начинаются с **большой** буквы, например **5 ватт** = **5 Вт**.

Выражение физической величины через единицы измерения называется **размерностью**. Так, размерность длины – 1 м, размерность силы – 1 Н.

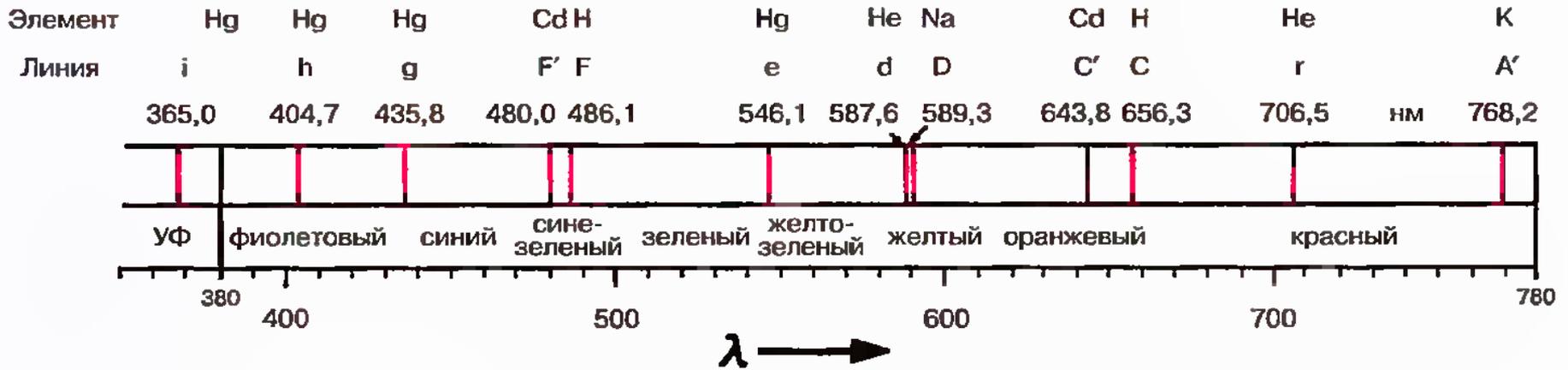
Некоторые величины совершенно разной природы могут иметь одинаковую размерность (в данной системе единиц), например, размерность *работы* и *момента силы* одинакова: 1 Н·м.

Существуют **безразмерные величины**, например, коэффициент трения скольжения.

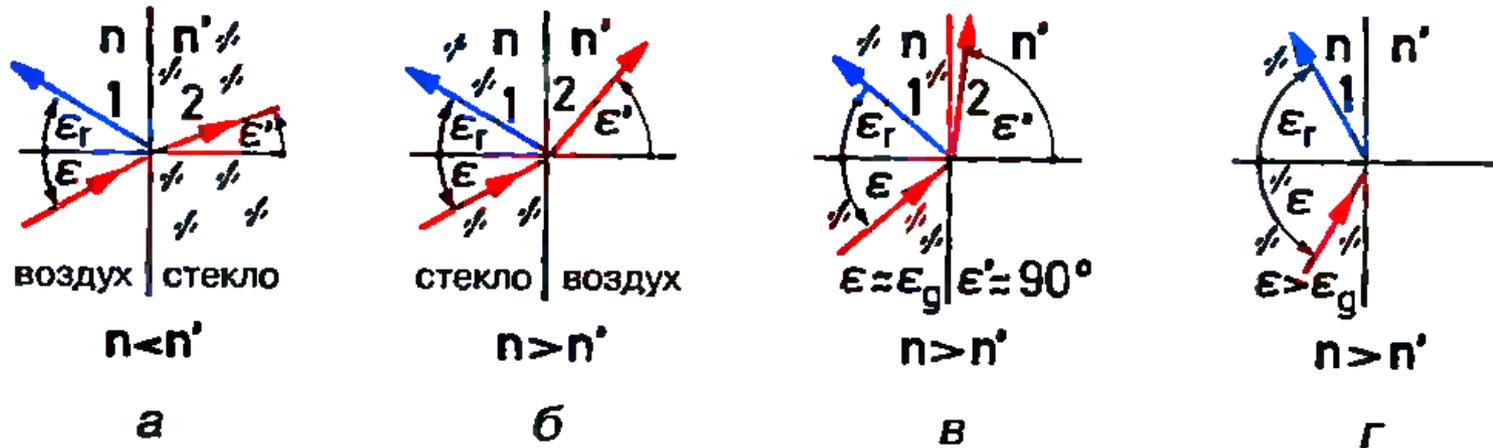
Используются также **внесистемные величины**, например, 1 час = 3600 с, 1 дюйм = 2,54 см.

**Анализ размерности.** Не имеет смысла сравнивать длину с массой, время с силой. 2 яблока не могут быть больше 2 секунд. То же самое верно для любых физических величин. Отсюда следует, что **складываться, вычитаться и сравниваться могут только величины одинаковой размерности**. Т. е. только такие величины могут стоять по разные стороны знаков +, -, =, <, >. Проверка размерности получаемых в задаче величин – простой способ нахождения ошибок. Если полученная из решения размерность не совпадает с действительной размерностью величины (например, для длины получен 5 м/с), то решение содержит ошибку. С другой стороны, правильность полученной размерности **не гарантирует** верности решения (поскольку могут быть ошибки в безразмерных коэффициентах или случайное совпадение размерности).

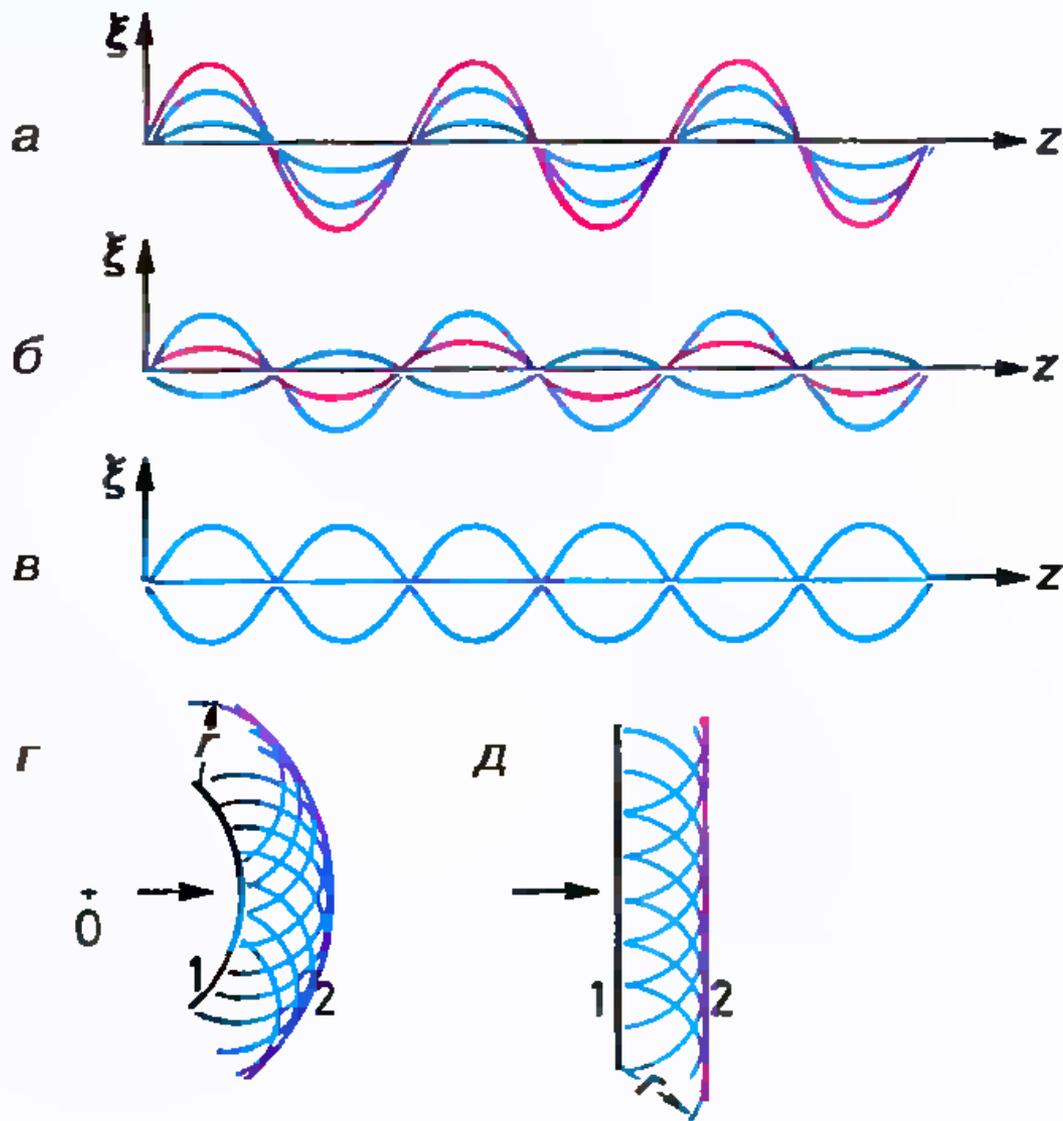
Иногда анализ размерности позволяет найти общий вид зависимости одной физической величины от других. Например, известно, что период колебаний маятника  $T$  зависит от его длины  $L$  и ускорения свободного падения  $g$ . Период измеряется в  $s$ , длина - в  $m$ ,  $g$  - в  $m/s^2$ . Из  $m$  и  $m/s^2$  составить  $s$  можно единственным способом:  $s = [m/(m/s^2)]^{1/2}$ . Можно заключить, что  $T \sim (L/g)^{1/2}$ . Безразмерный коэффициент пропорциональности (для **математического маятника** он равен  $2\pi$ ) таким образом получить невозможно.



## Спектральные цвета и спектральные линии

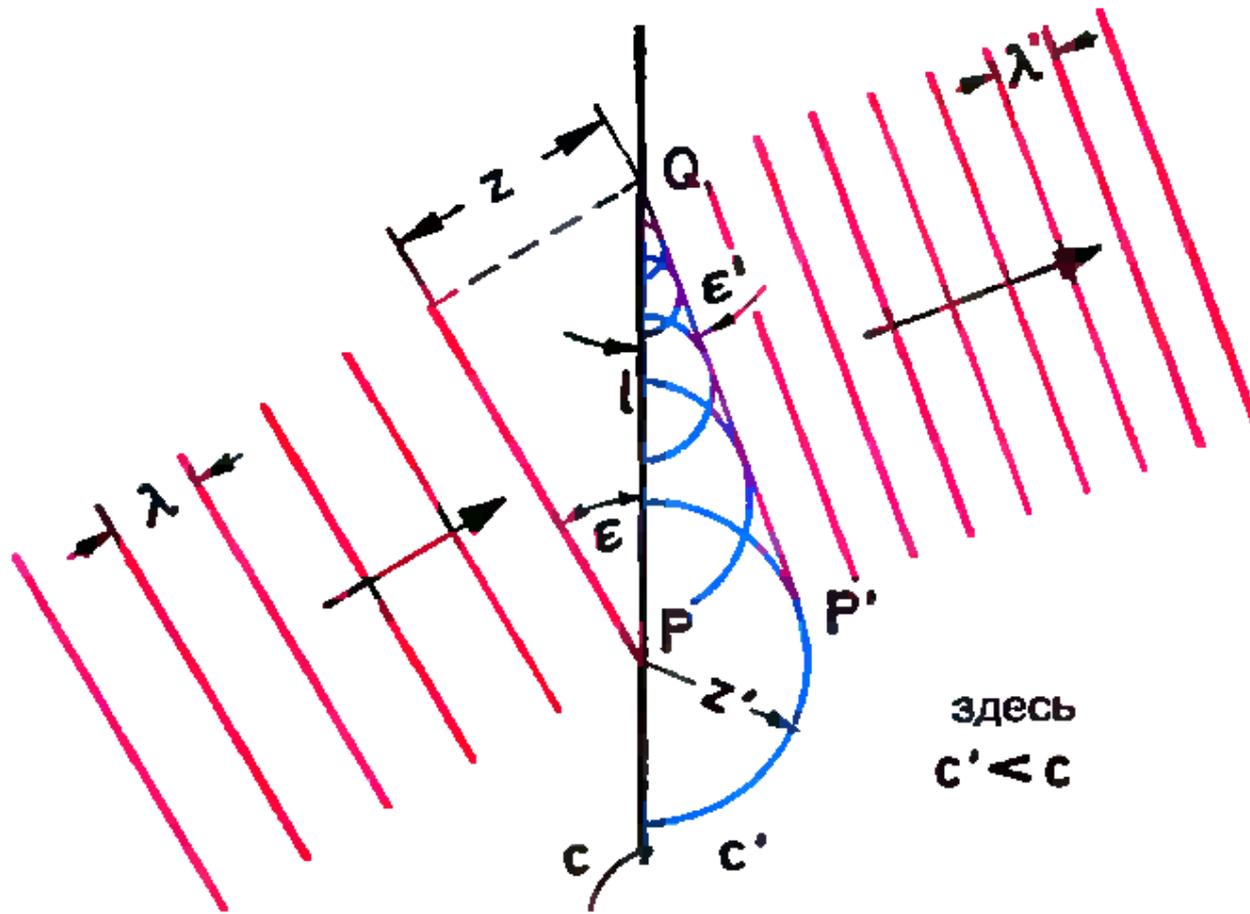


Преломление и отражение (а, б), практически предельный случай полного внутреннего отражения (в), полное внутреннее отражение (г)



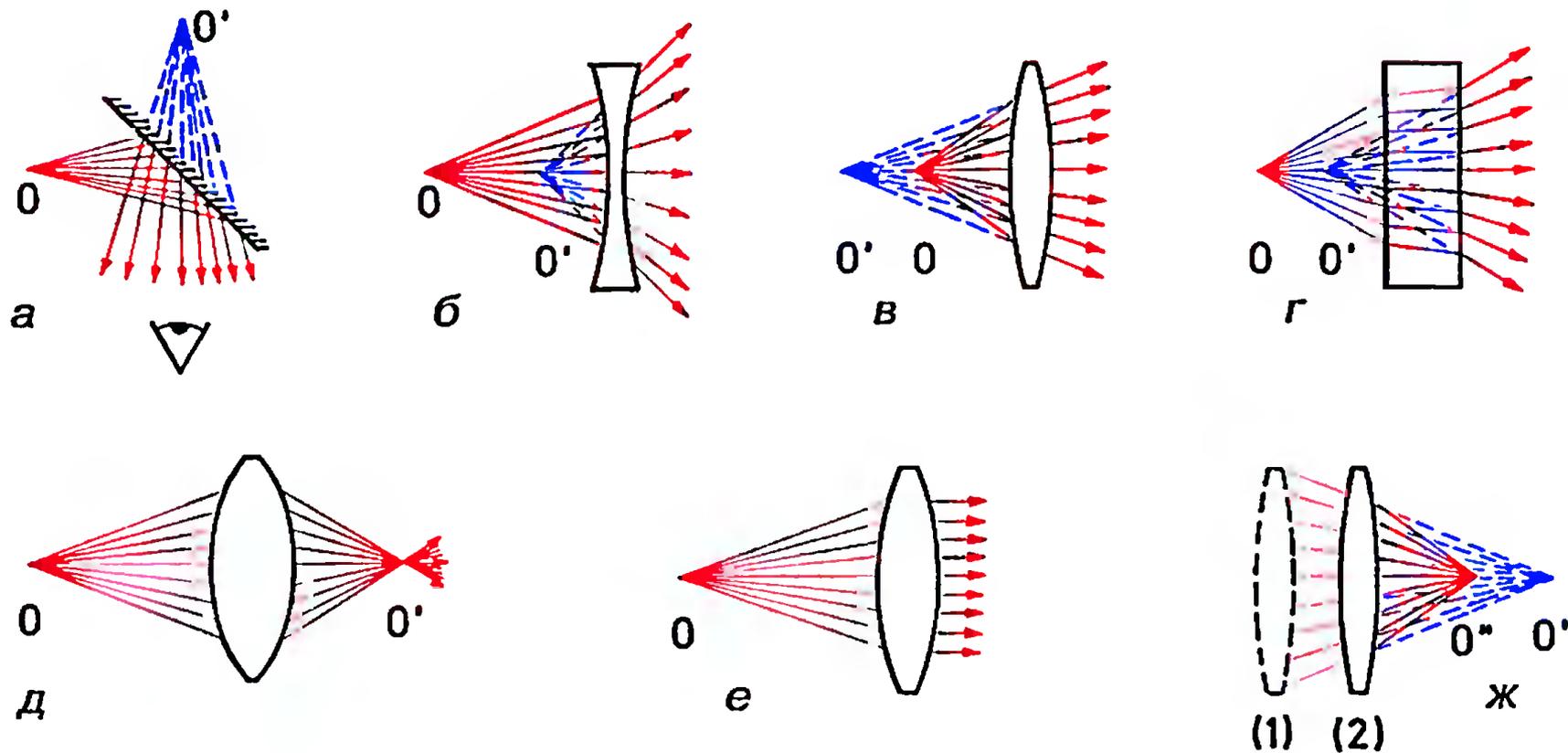
## Интерференция волн

а, б, в – интерференция двух волн;  
 г, д – плоская и сферическая волны  
 соответственно



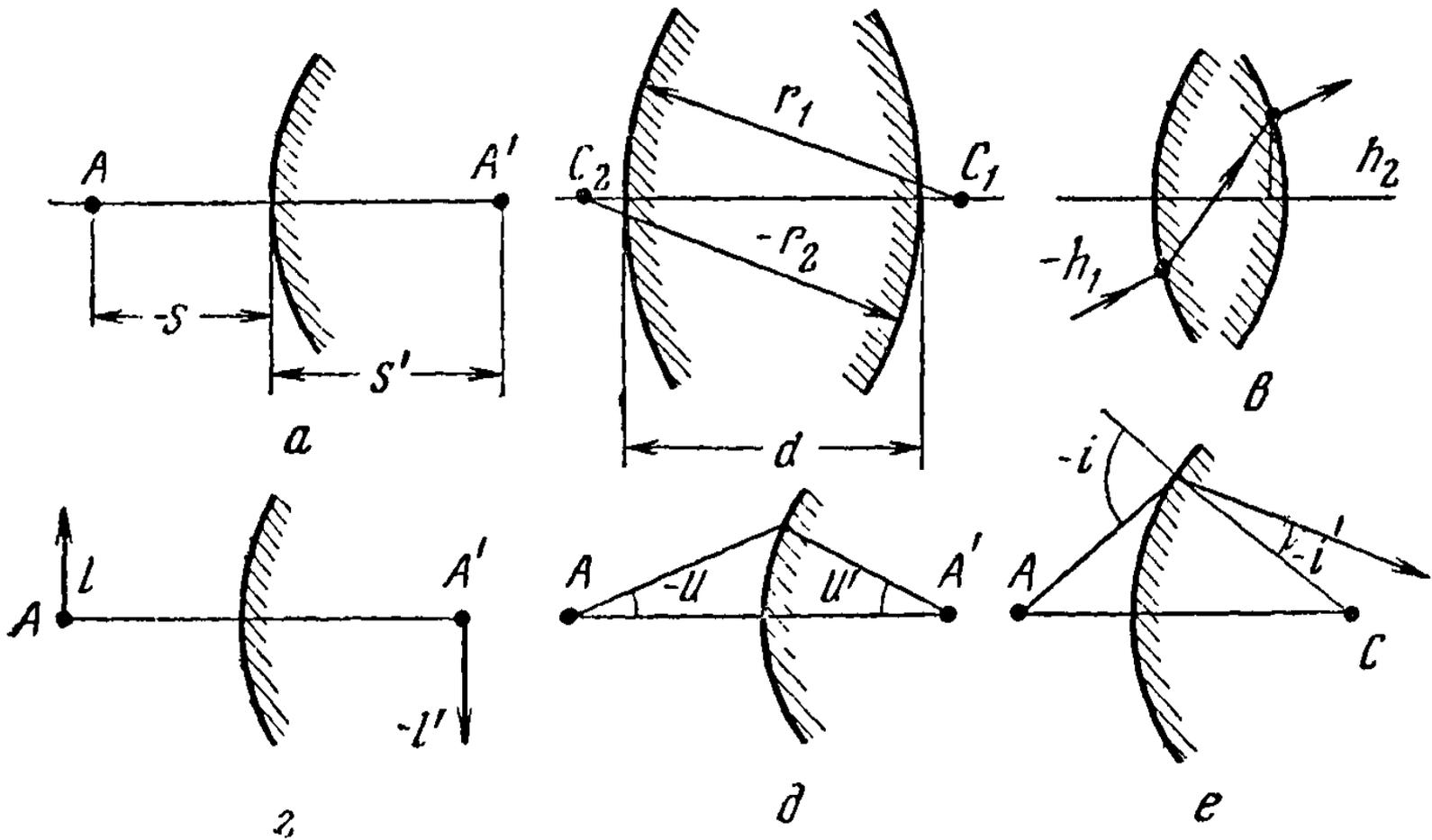
поверхность, разделяющая две среды

Преломление волны в соответствии с принципом Гюйгенса

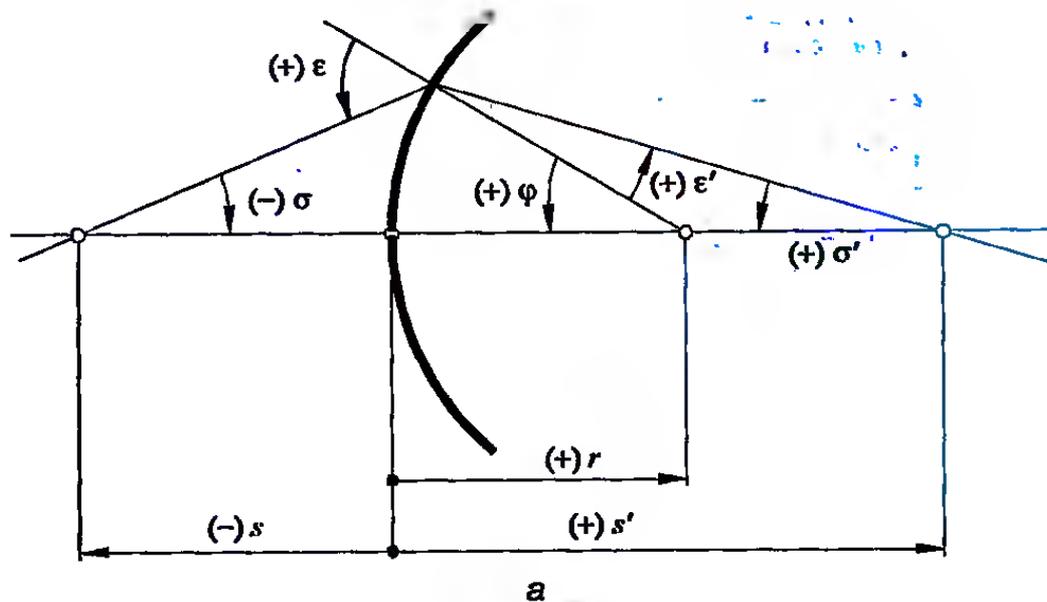


## Виды оптических преобразований пучка, исходящего из точки O:

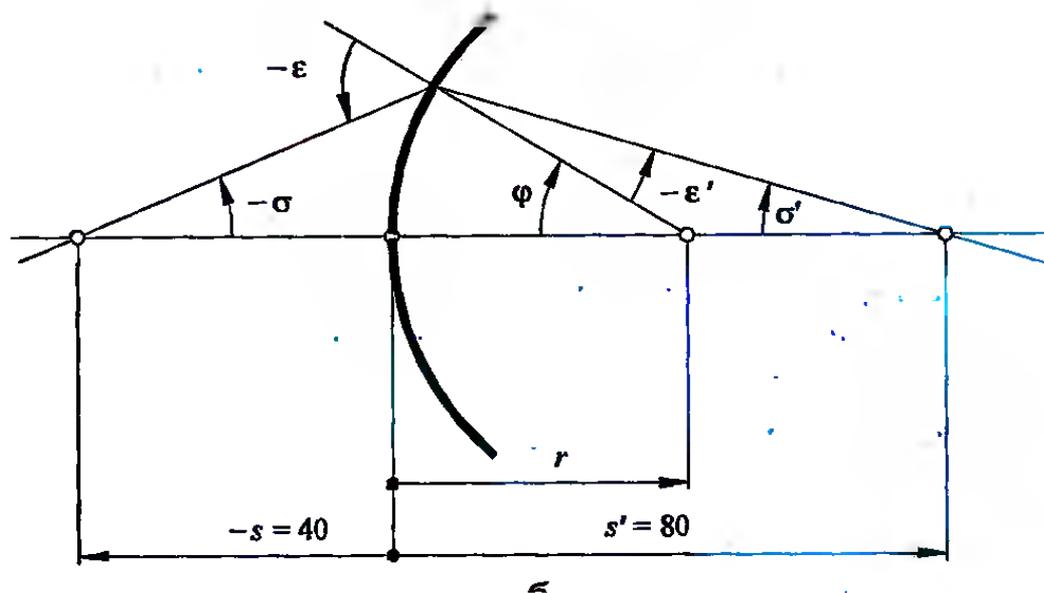
а-г – изображение мнимое; д – действительное изображение; е – бесконечно удаленное изображение; ж – мнимая точка предмета O' и ее действительное изображение – точка O

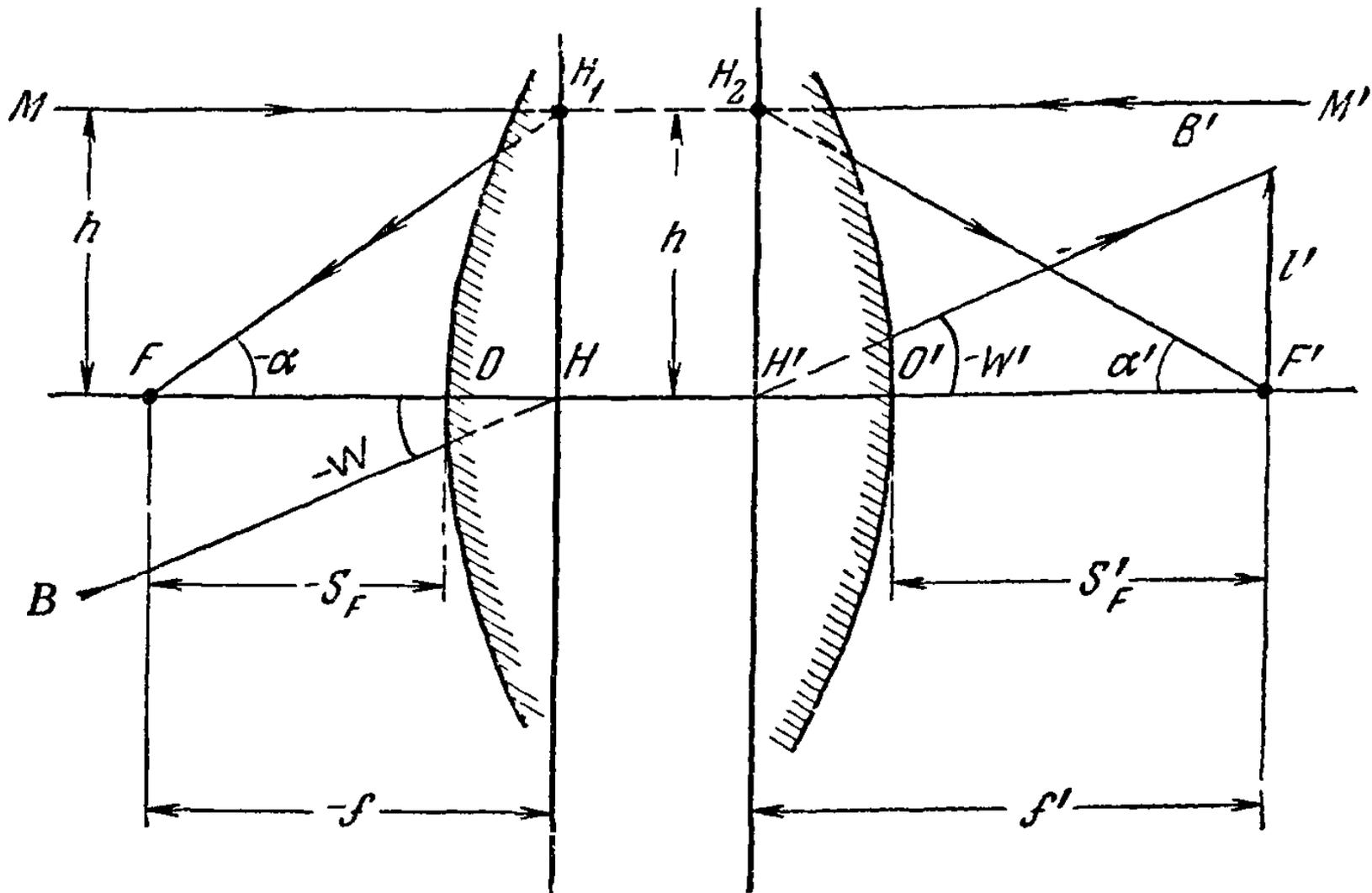


Знаки отрезков и углов



Сравнение правил  
знаков и  
обозначений по  
DIN 1335 (а) и  
ГОСТ 7427-76 (б)





Главные точки и фокусные расстояния

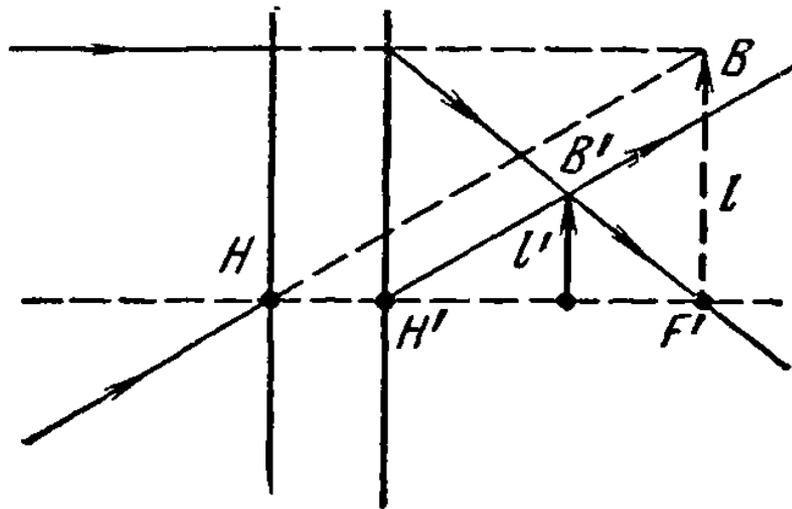
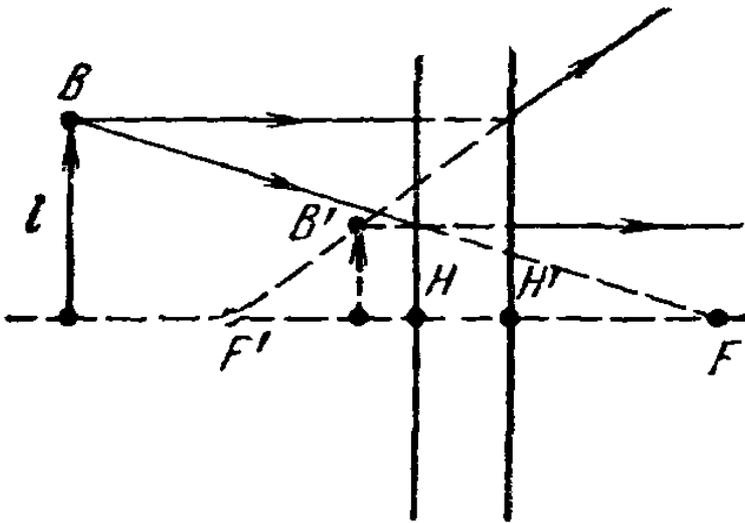
## Фокусные расстояния

$$f' = \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha'}; \quad f = \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha};$$

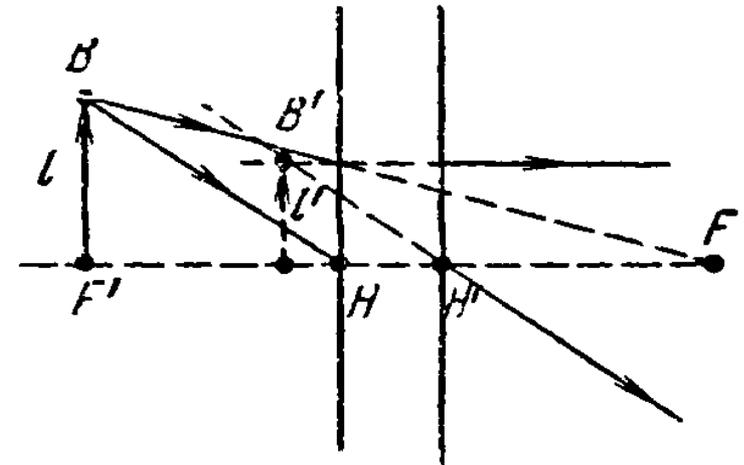
$$f' = -\frac{l'}{\operatorname{tg}\varpi'}; \quad f = \frac{l'}{\operatorname{tg}\varpi}; \quad f' = -\frac{l'}{\operatorname{tg}\varpi}.$$

# Построение изображения

Предмет расположен перед  
оптической системой



Предмет расположен за  
оптической системой



Предмет расположен в  
заднем фокусе оптической  
системы

## Оптическая сила системы

$$-\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$$

$$\Phi = \frac{1}{f'} \quad \Phi = \frac{1000}{f'}$$

## Параксиальная область

$$\sin \varepsilon = \varepsilon - \frac{\varepsilon^3}{3!} + \frac{\varepsilon^5}{5!} + \dots$$

$$\cos \varepsilon = 1 - \frac{\varepsilon^2}{2!} + \frac{\varepsilon^4}{4!} + \dots$$

$$\sin \varepsilon = \varepsilon \quad \cos \varepsilon = 1$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varepsilon} = \varepsilon$$

$$n\varepsilon = n'\varepsilon'$$

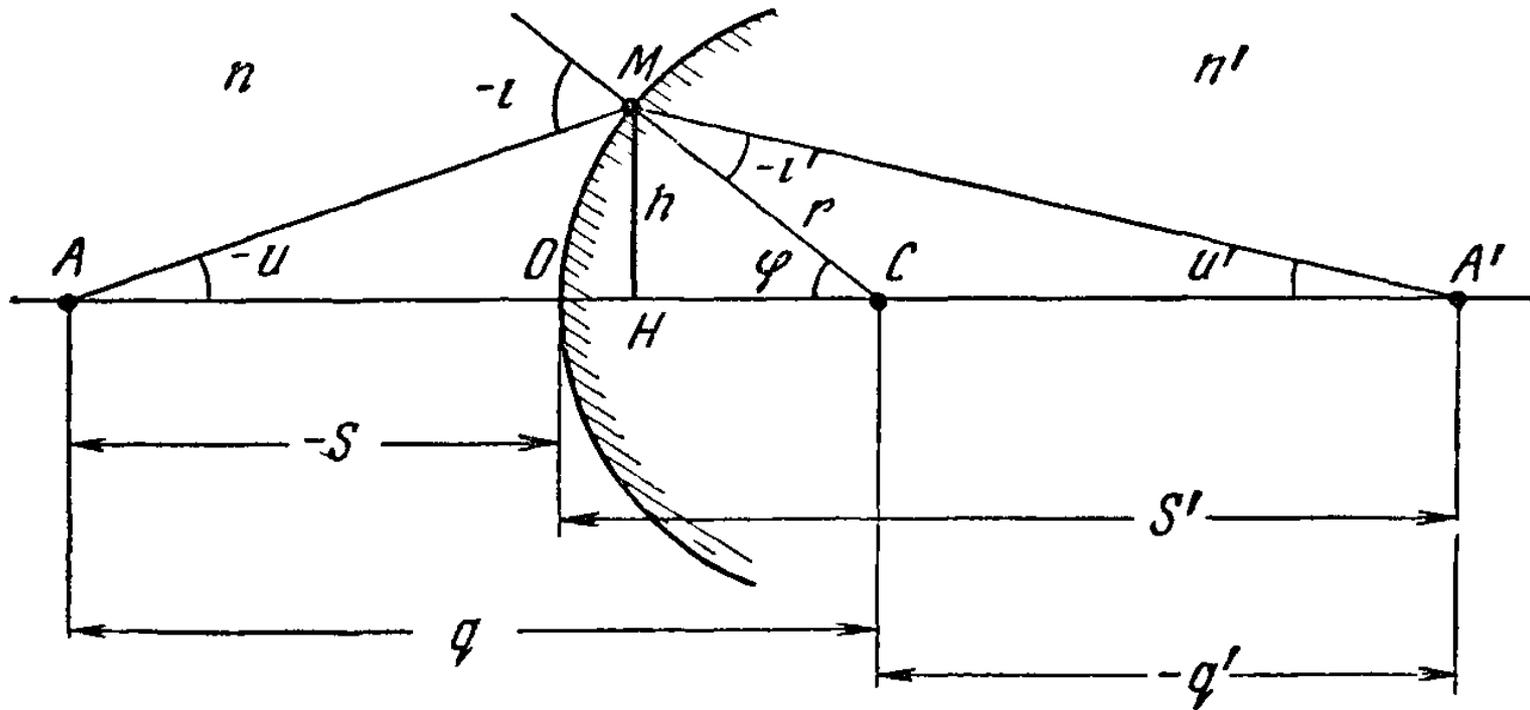
$\varepsilon$	$\varepsilon'$ (точное значение)	$\varepsilon'$ (параксиальное приближение)
2°	1,3332°	1,3333°
4°	2,6655°	2,6667°
8°	5,3237°	5,3333°
16°	10,5887°	10,6667°

## Оптическое стекло

$$n^2 = A_0 + A_1 \cdot \lambda^2 + A_2 \cdot \lambda^{-2} + A_3 \cdot \lambda^{-4} + A_4 \cdot \lambda^{-6} + A_5 \cdot \lambda^{-8}$$

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$$

Для краткого описания оптических свойств указывают основной показатель преломления  $n_e$  и число Аббе  $v_e$ . Большая величина числа Аббе соответствует низкой дисперсии.



Сферическая преломляющая поверхность

$$q = r - s \quad (1)$$

$\Delta AMC$  по формуле  
синусов  $\Rightarrow$

$$\frac{r}{\sin u} = \frac{q}{\sin(180^\circ + i)}$$

$$\sin i = \frac{q \sin u}{r} \quad (2)$$

$$\sin i' = \frac{n \sin i}{n'} \quad (3)$$

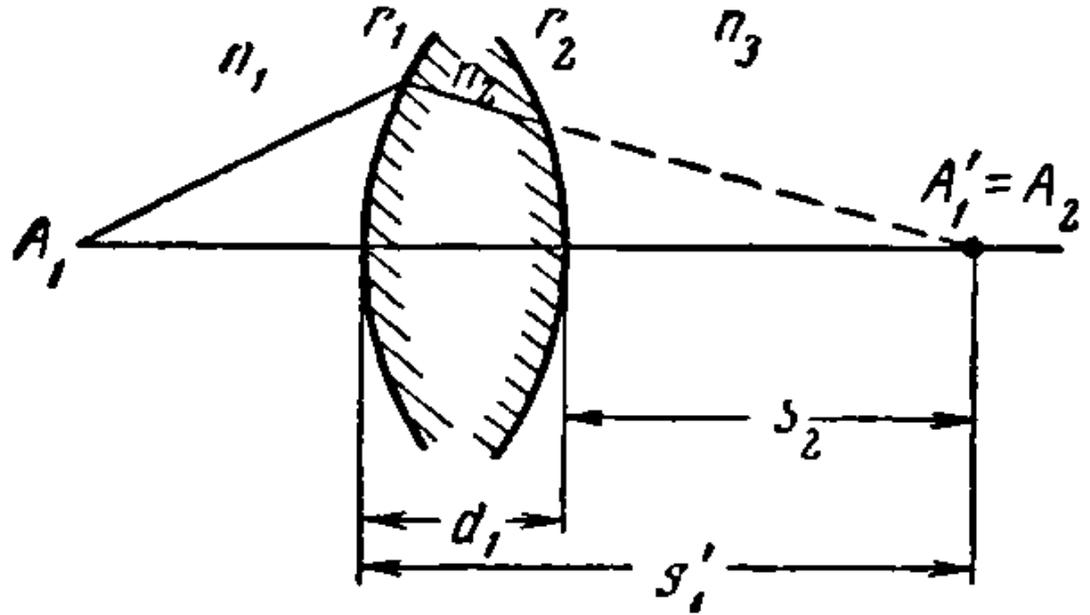
Из  $\Delta AMC \Rightarrow$   $-i = \varphi - u$

Из  $\Delta CMA'$   $\varphi = u' - i'$

$\Delta CMA'$  по формуле  
синусов  $\Rightarrow$

$$q' = \frac{r \sin i'}{\sin u'} \quad (5)$$

$$s' = r - q' \quad (6)$$



К определению положения  
предмета для второй поверхности

$$n \sin i = n' \sin i'.$$

$$u' = u + i' - i \quad (4)$$

$$s_2 = s'_1 - d_1. \quad (1)$$

$$\text{Из } \triangle MHC \Rightarrow h = r \sin(u' - i'). \quad (2)$$

$$\frac{q \sin u}{\sin i} = \frac{q' \sin u'}{\sin i'}. \quad (3)$$

$$\frac{u(r-s)}{s} = \frac{u'(r-s')}{s'}. \quad (4)$$

$$n \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left( \frac{1}{s'} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

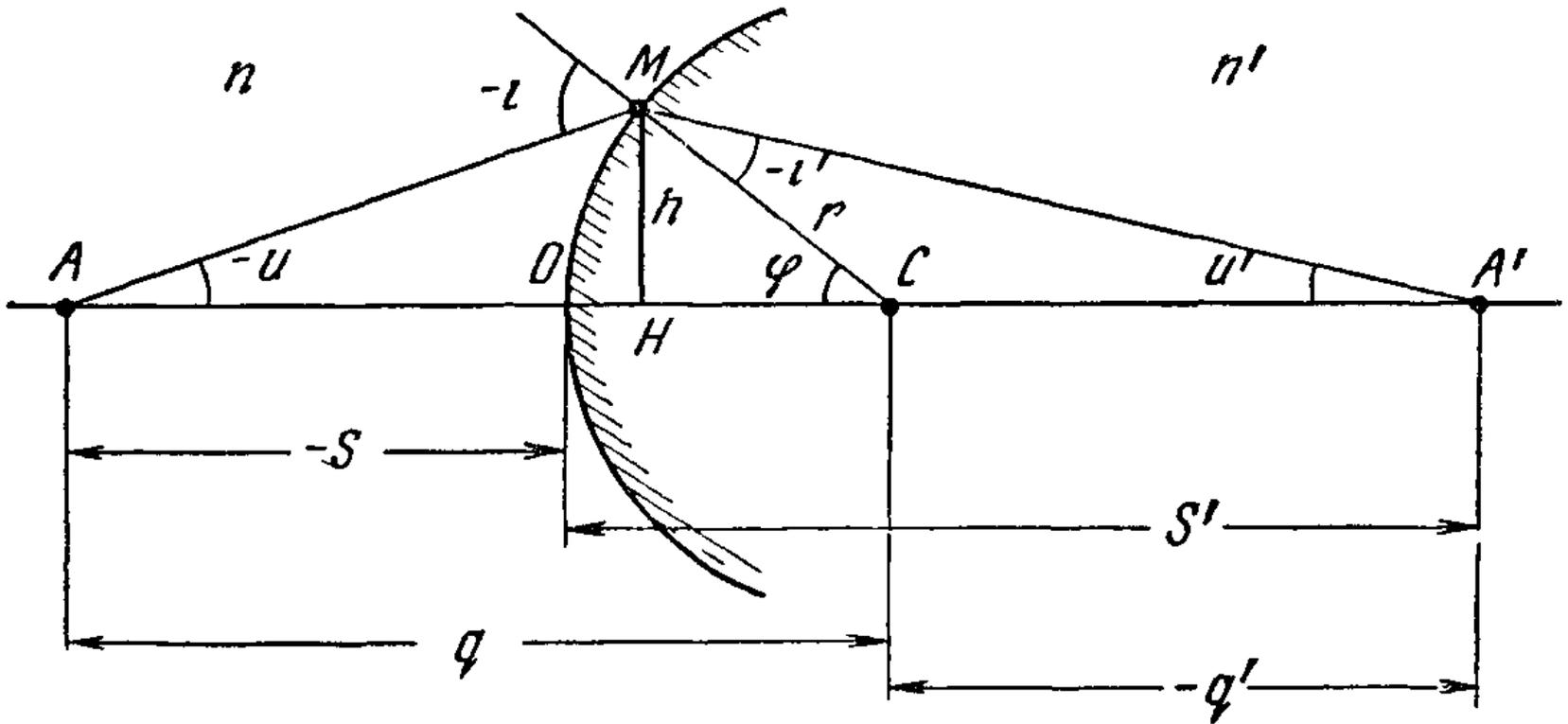
$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (6)$$

$$-\frac{n}{r} = n' \left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{r} \right), \quad (7)$$

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (8)$$

$$f = -\frac{nr}{n' - n}. \quad (9)$$

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (10)$$



Сферическая преломляющая поверхность

$$ni = n'i'. \quad (1)$$

$$n(\alpha - \varphi) = n'(\alpha' - \varphi). \quad (2)$$

$$n\alpha - \frac{nh}{r} = n'\alpha' - \frac{n'h}{r} \quad (3)$$

$$\alpha' = \frac{n}{n'}\alpha + \frac{h(n' - n)}{rn'}. \quad (4)$$

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}}\alpha_k + \frac{h_k(n_{k+1} - n_k)}{r_k n_{k+1}}. \quad (5)$$

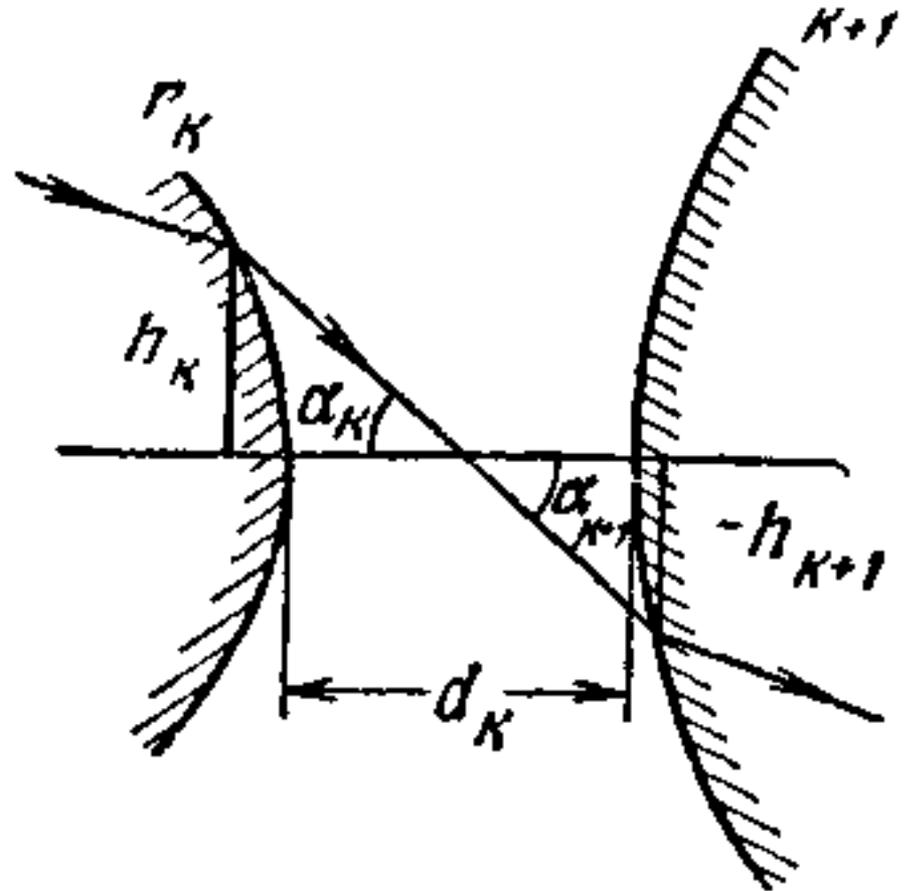
$$r_k = \frac{h_k (n_{k+1} - n_k)}{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}. \quad (6)$$

$$\alpha_k n_k = \gamma_k, \quad (7)$$

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{r_k}. \quad (8)$$

$$\frac{h_k - h_{k+1}}{d_k} = \alpha_{k+1}. \quad (9)$$

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k. \quad (10)$$



## Задача 1

Определить местоположение щели спектрального прибора, освещаемого источником света с помощью конденсорной линзы, если расстояние от источника света до линзы равно 80 мм, а линза имеет конструктивные элементы  $r_1 = 40$  мм,  $r_2 = -40$  мм,  $d = 5$  мм и  $n = 1,5163$ .

**Решение.** Из формулы (21.6) следует

$$s' = \frac{n'rs}{s(n' - n) + rn'}$$

тогда, подставив формулу (21.1) получим

$$s'_1 = \frac{n_2 r_1 s_1}{s_1 (n_2 - n_1) + r_1 n_1}$$

Для 1-й поверхности имеем:  $r_1 = 40$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 1,5163$ ;  $s_1 = -80$ ;  
после подстановки получим

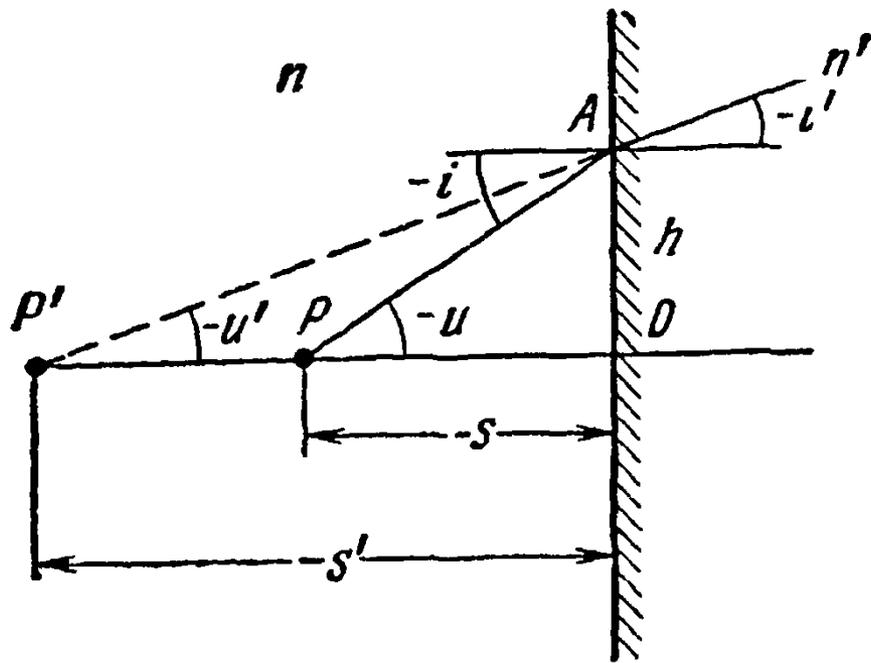
$$s'_1 = 3720,98.$$

Для 2-й поверхности предметом является изображение, полученное после 1-й поверхности:

$$s_2 = s'_1 - d = 3715,98,$$

и аналогично при  $r_2 = -40$ ;  $n_2 = 1,5163$ ;  $n_3 = 1$

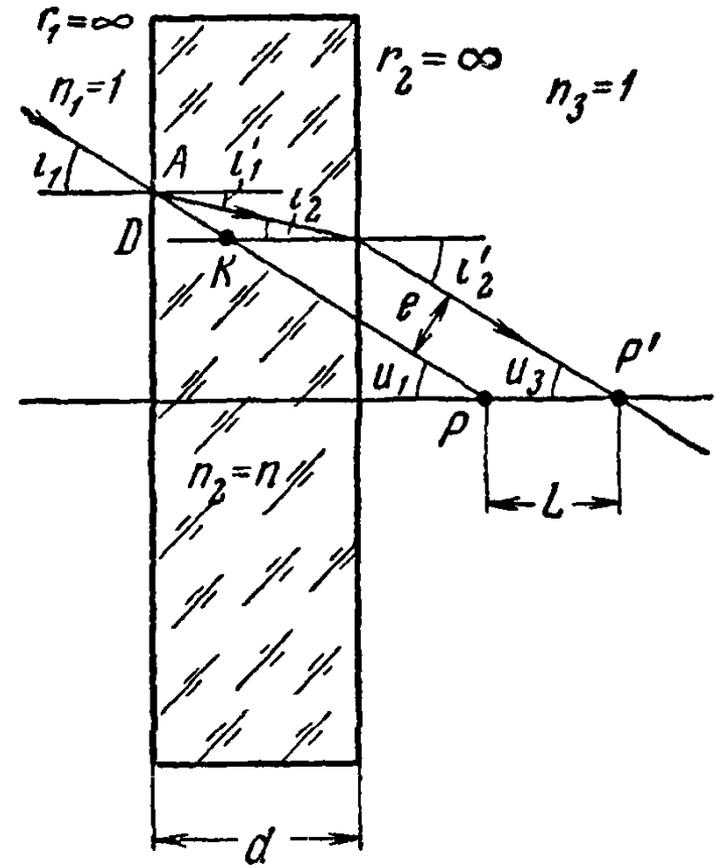
$$s'_2 = \frac{n_3 r_2 s_2}{s_2 (n_3 - n_2) + r_2 n_2} = 75,1 \text{ мм.}$$



Плоская преломляющая  
поверхность

$$n \sin i = n' \sin i'. \quad (1)$$

$$s' = \frac{s \operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'}. \quad (2)$$



Преломление луча через  
плоскопараллельную пластину

$$L = DB - DK = d - AD \operatorname{ctg} i_1. \quad (1)$$

$$AD = d \operatorname{tg} i_1. \quad (2)$$

$$L = d \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} i'_1}{\operatorname{tg} i_1} \right). \quad (3)$$

$$\lim_{i'_1 \rightarrow 0} \left( \frac{\operatorname{tg} i'_1}{\operatorname{tg} i_1} \right) = \frac{1}{n}. \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{n-1}{n} d. \quad (5)$$

$$e = AB \sin (i_1 - i'_1) \quad (6)$$

$$AB = \frac{d}{\cos i'_1}, \quad (7)$$

$$e = \frac{d \sin (i_1 - i'_1)}{\cos i'_1}. \quad (8)$$

$$e = f(d, n, i_1)$$

$$e = d \sin i_1 \left( 1 - \frac{\cos i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \right). \quad (9)$$

## Задача 1

В зрительной трубе расстояние между объективом и окуляром составляет 185 мм. В это пространство понадобилось установить сетку (плоскопараллельную пластинку) толщиной 5 мм из стекла с показателем преломления  $n = 1,51163$ . Определить необходимое новое расстояние между объективом и окуляром, сохраняющее то же состояние юстировки оптической системы, что и до введения сетки.

## Задача 2

Качающаяся плоскопараллельная пластина установлена в ходе лучей микроскопа перед сеткой, в пространстве между объективом и окуляром. Пластина толщиной 6 мм из стекла с  $n = 1,5688$  наклонена к оптической оси под углом  $30^\circ$ . Определить величину поперечного смещения луча.

## Преломление луча через линзу

$$f' = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'} \quad (15.1) \quad \alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + \frac{h_k (n_{k+1} - n_k)}{r_k n_{k+1}}. \quad (22.5)$$

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k. \quad (23.10)$$

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_3}, \quad \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + \frac{h_2 (n_3 - n_2)}{r_2 n_3} \quad \text{и} \quad h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1.$$

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2}. \quad (29.1)$$

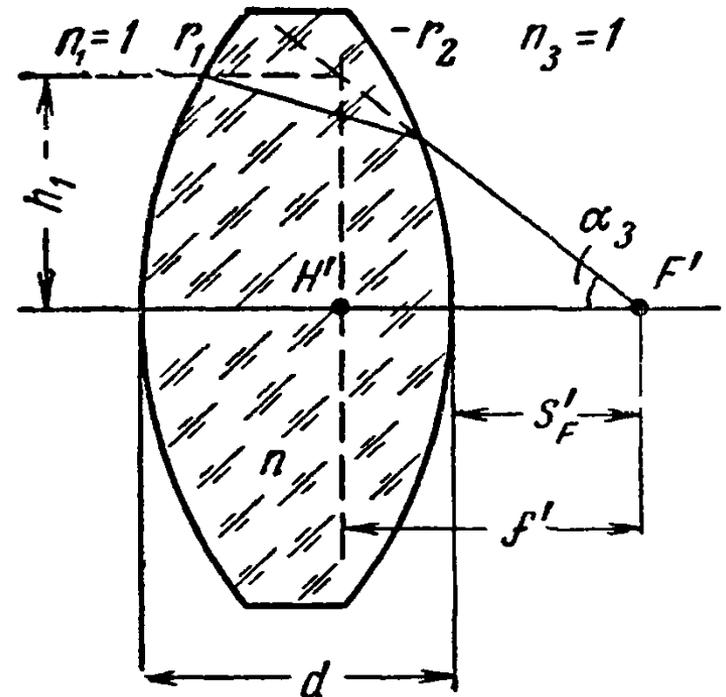
$$\alpha_3 = \frac{h_2}{S'_F}, \quad S'_F = f' \left[ 1 - \frac{(n-1)d}{nr_1} \right], \quad (29.2)$$

$$S_F = f' \left[ 1 + \frac{(n-1)d}{nr_2} \right]. \quad (29.3)$$

$$S_H = S_F - f' \quad S'_H = S'_F - f'$$

$$S_H = - \frac{f' (n-1) d}{nr_2} \quad (29.4)$$

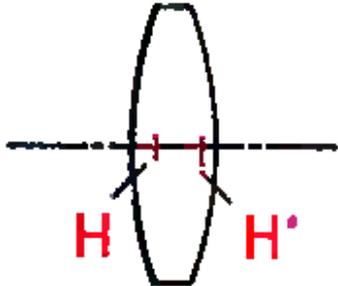
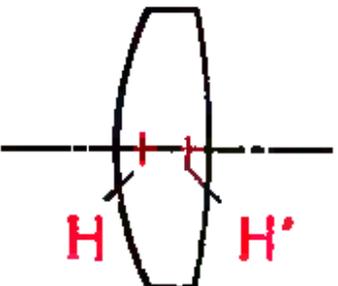
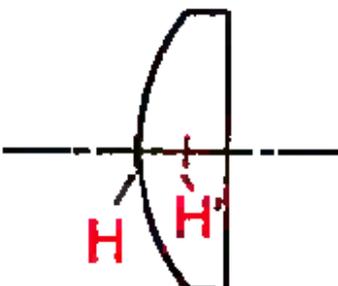
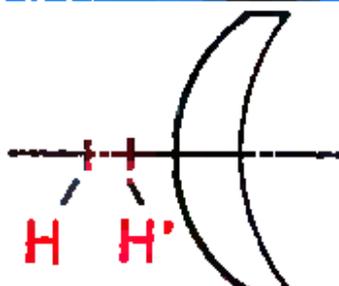
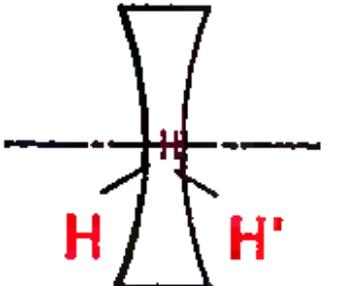
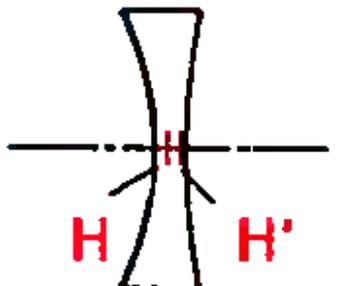
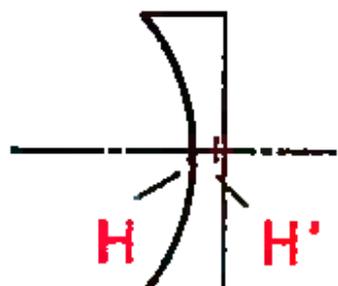
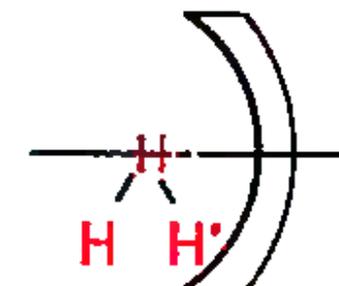
$$S'_H = - \frac{f' (n-1) d}{nr_1}. \quad (29.5)$$



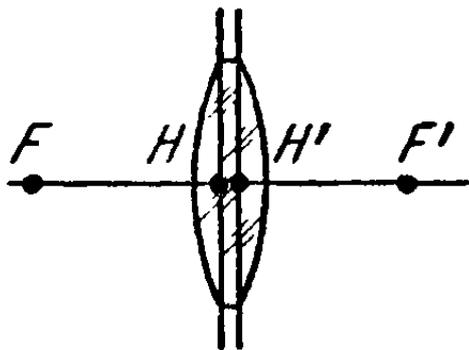
### Задача 30.1

Найти фокусное расстояние, вершинные фокусные расстояния и положения главных плоскостей линзы, имеющей конструктивные элементы:  $r_1 = 17,58$  мм,  $r_2 = -21,03$  мм,  $d = 5$  мм,  $n = 1,5467$ .

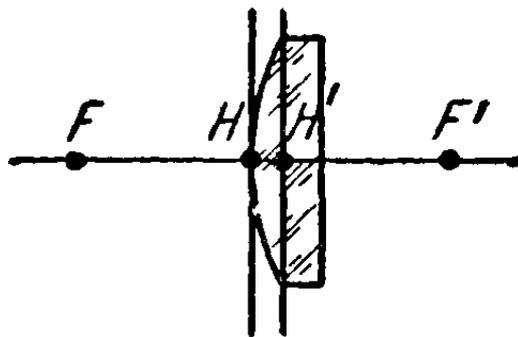
# Типы линз

Билинзы		Линзы с плоскими поверхностями	Мениски
Симметричные	Несимметричные		
			
			

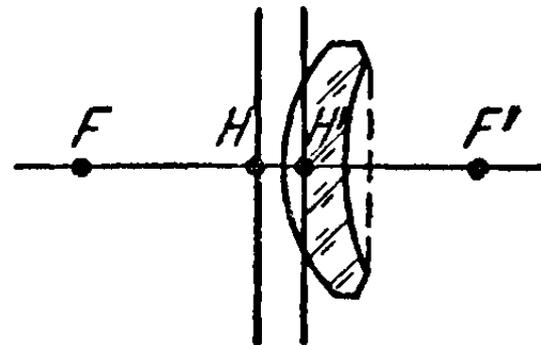
# Типы линз



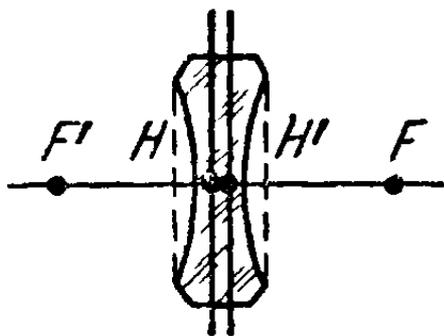
$a$



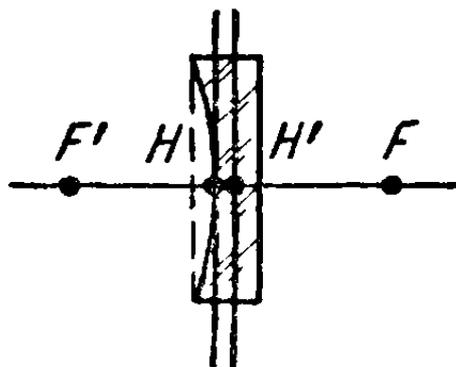
$b$



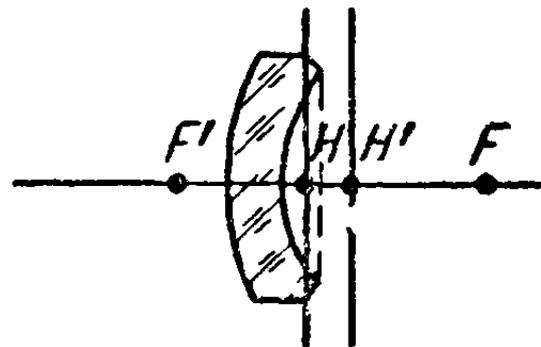
$b$



$b$



$b$



$b$

Линза с острым краем:

$$D_{\text{ок}} = 2 \sqrt{2r_1 h_1 - h_1^2}, \quad (33.1)$$

$$h_1 = \frac{d^2 + 2r_2 d}{2(d - r_1 + r_2)}. \quad (33.2)$$

Линза с равными радиусами разных знаков:

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{r} - \frac{(n-1)^2 d}{nr^2} \quad \frac{1}{f'} = \frac{n-1}{nr^2} (2nr - nd + d). \quad (33.3)$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{r}. \quad (33.4) \quad \text{- линза с одной плоской поверхностью}$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{nr}. \quad (33.5) \quad \text{- линза-шар}$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)^2 d}{nr^2}. \quad (33.6) \quad \text{- линза с равными радиусами одинаковых знаков}$$

Концентрическая линза:

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} + \frac{(n-1)^2 (r_1 - r_2)}{nr_1 r_2}, \quad \frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{nr_1 r_2}$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (33.7)$$

Телескопическая линза:

$$(n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = - \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}. \quad r_2 = r_1 - \frac{(n-1)d}{n}. \quad (34.1)$$

$$d = \frac{(r_1 - r_2)n}{n-1}. \quad (34.2)$$

Гиперболическая линза:

$$y^2 = x^2(n^2 - 1) - 2x(n-1)f'. \quad (34.3)$$

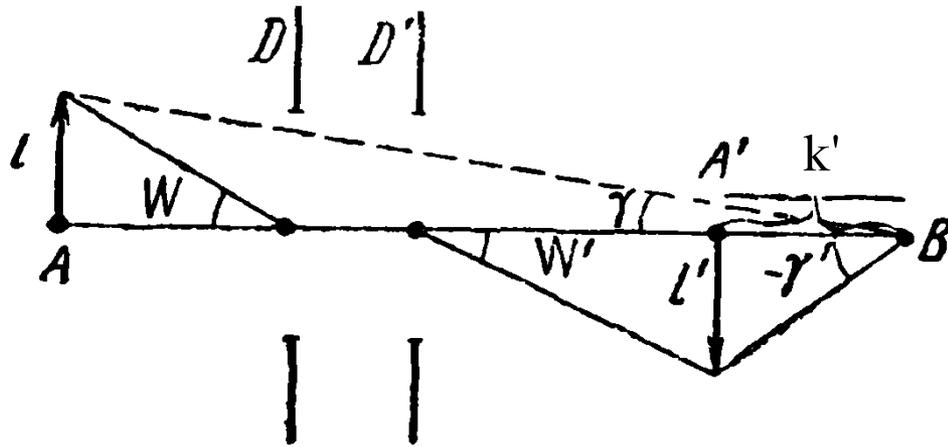
Сферо-эллиптическая линза:

$$y^2 = 2(s'_F + d)x \frac{n-1}{n} - x^2 \left( \frac{n^2-1}{n^2} \right) \quad (34.4) \quad r_2 = s'_F. \quad (34.5)$$

**Пример 10.** Определить диаметр линзы до острого края, если радиус кривизны первой поверхности  $r_1 = 40$  мм, второй —  $r_2 = -60$  мм, а толщина  $d = 6$  мм.

**Пример 11.** Найти фокусное расстояние концентрической линзы с радиусами кривизны 35 и 30 мм из стекла с показателем преломления  $n = 1,52$ .

## Видимое увеличение



$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \gamma} \quad (36.1)$$

$$l' = f' \operatorname{tg} \omega'$$

$$l' = k' \operatorname{tg} \gamma'$$

$$\omega \cong \omega'$$

$$f' \operatorname{tg} \gamma = k' \operatorname{tg} \gamma'$$

$$\Gamma = \frac{f'}{k'} \quad (36.2)$$

## Угловое увеличение

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (35.1)$$

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{nl}{n'l'}. \quad (35.2)$$

$l$  – предмет  
 $l'$  – изображение

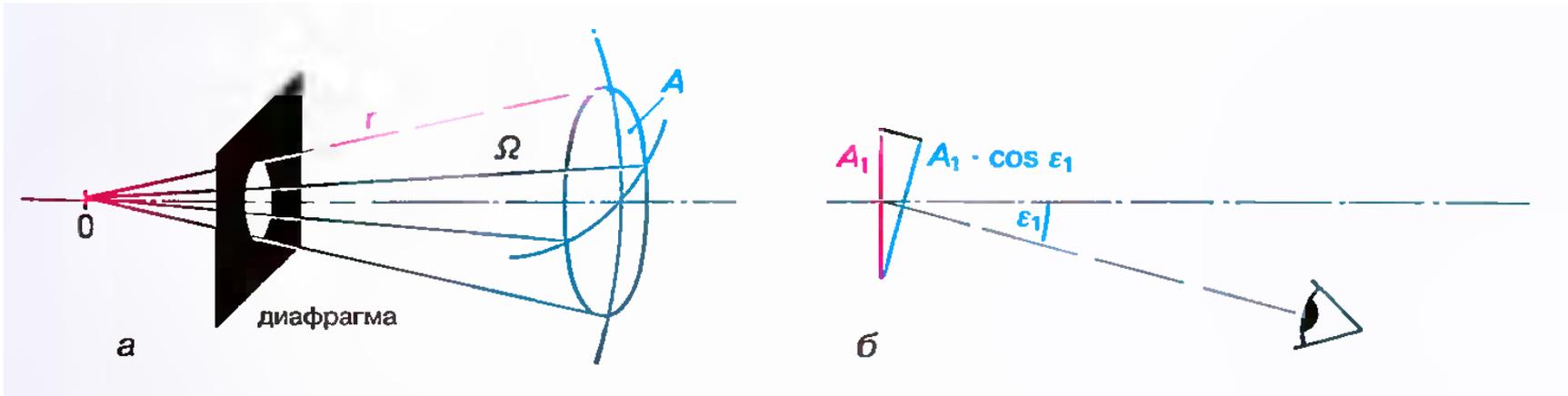
$$\gamma = \frac{n}{n'\beta}. \quad (35.3)$$

$$\gamma = \frac{n_1}{n_{k+1}} \cdot \frac{1}{\beta} \quad (35.4)$$

$$\beta = \frac{n_{k+1}}{n_1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{k+1}} \quad (35.5)$$

$$n_{k+1} = n_1 \quad (\alpha_{k+1} = 1) \quad \beta = \alpha_1$$

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}. \quad (37.1)$$



## Распространение излучения в пространстве

а – в телесном угле; б – площадь проекции излучающей площадки в направлении наблюдения

$$L_e = \frac{I_e}{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1},$$

(37.2)

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A_2}$$

(37.3)

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$

(37.4)

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda.$$

(37.5)

# Энергетические величины

Величина	Обозначение	Определение		Единица измерения
		упрощенное	точное	
Поток излучения	$\Phi_e$	Мощность излучения		Вт
Сила излучения	$I_e$	$\frac{\Phi_e}{\Omega}$	$\frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт·ср <sup>-1</sup>
Энергетическая яркость	$L_e$	$\frac{I_e}{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	$\frac{dI_e}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	Вт·ср <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup>
Энергетическая освещенность	$E_e$	$\frac{\Phi_e}{A_2}$	$\frac{d\Phi_e}{dA_2}$	Вт·м <sup>-2</sup>
Спектральный поток излучения	$\Phi_{e\lambda}$	—	$\frac{d\Phi_e}{d\lambda}$	Вт·нм <sup>-1</sup>

$$s(\lambda) = \frac{dJ}{d\Phi_e} \text{ или } s(\lambda) = \frac{J_\lambda}{\Phi_{e\lambda}}, \quad (38.1)$$

$$dX_e = X_{e\lambda} \cdot d\lambda, \quad dY = Y_\lambda \cdot d\lambda. \quad (38.2)$$

$$s(\lambda) = \frac{dY}{dX_e} \text{ или } s(\lambda) = \frac{Y_\lambda}{X_{e\lambda}}. \quad (38.3)$$

$$s(\lambda)_{\text{rel}} = \frac{s(\lambda)}{s(\lambda_0)}. \quad (38.4)$$

$$X_e = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} X_{e\lambda} \cdot d\lambda, \quad Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e\lambda} \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (38.5)$$

$$Y = s(\lambda_0) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{\text{rel}} \cdot d\lambda. \quad (38.6)$$

$$s = \frac{Y}{X}. \quad (38.7)$$

$$s_d = \frac{dY}{dX}. \quad (38.8)$$

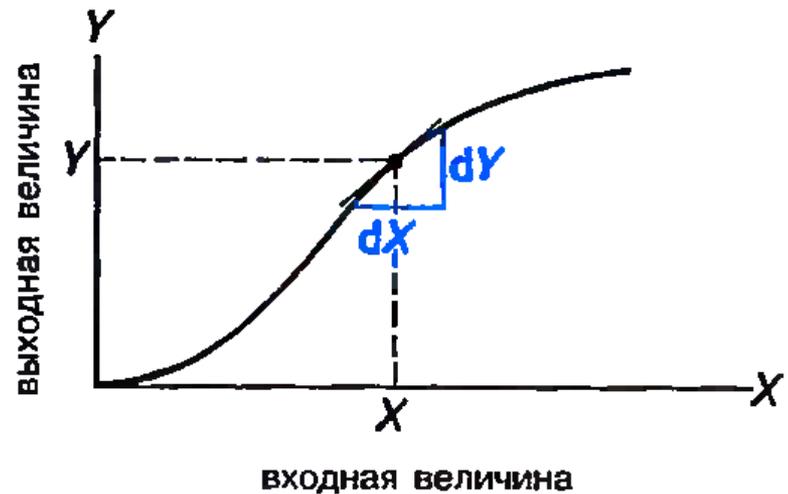


Рис. 38. Определение чувствительности

# Оптические величины

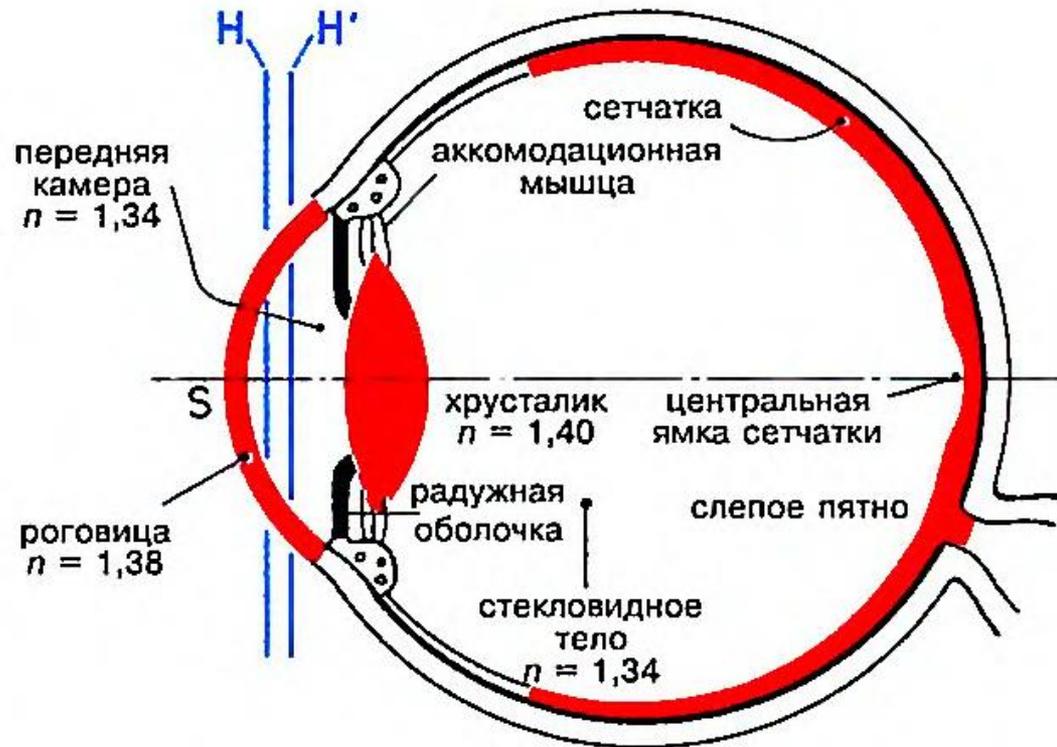
$$X_{e\lambda} \rightarrow \Phi_{e\lambda}$$

$$s(\lambda)_{\text{rel}} \rightarrow V(\lambda)$$

$$s(\lambda_0) \rightarrow K_m$$

$$\Phi = K_m \cdot \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \Phi_e \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (40.1)$$

Величина	Обозначение	Определение		Единица измерения
		упрощенное	точное	
Световой поток	$\Phi$	(40.1)		люмен (лм) 1 лм = 1 кд · 1 ср
Сила света	$I$	$\frac{\Phi}{\Omega}$	$\frac{d\Phi}{d\Omega}$	кандела (кд) (базовая единица)
Яркость	$L$	$\frac{I}{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	$\frac{dI}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	кд · м <sup>-2</sup>
Освещенность	$E$	$\frac{\Phi}{A_2}$	$\frac{d\Phi}{dA_2}$	люкс (лк) 1 лк = 1 лм · 1 м <sup>-2</sup>



**Рис. 4.19.** Поперечный разрез глаза (правый глаз, вид сверху).

**Таблица 4.7.** Уменьшение объема аккомодации с возрастом.

Возраст в годах	10	20	30	40	50	60	70	80
$a_p$ в см	-8	-9	-12	-19	-50	-90	-100	-100
$a_R$	$\infty$							
$\frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_p}$ , дптр	12,5	11,1	8,3	5,3	2,0	1,1	1,0	1,0

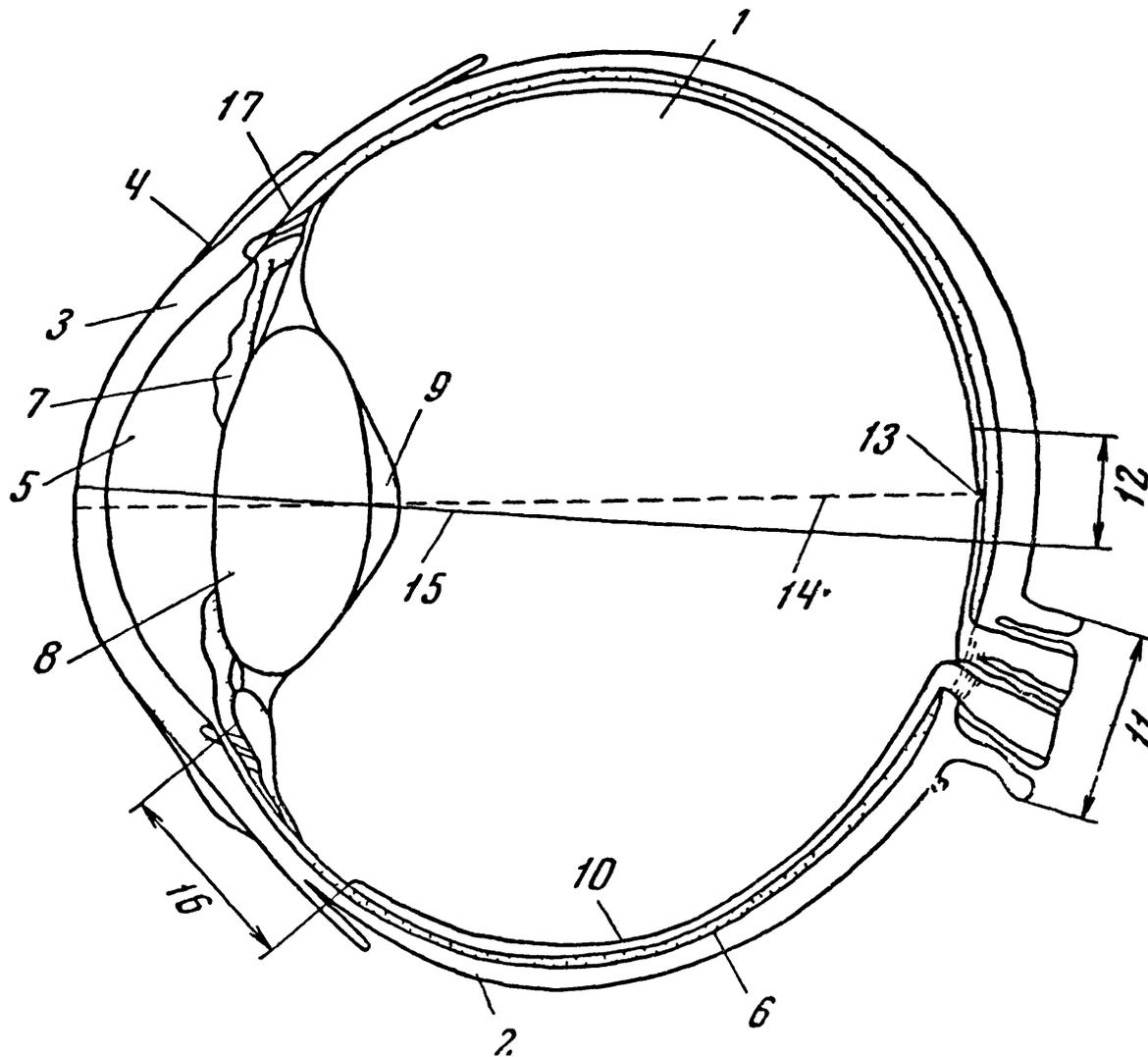
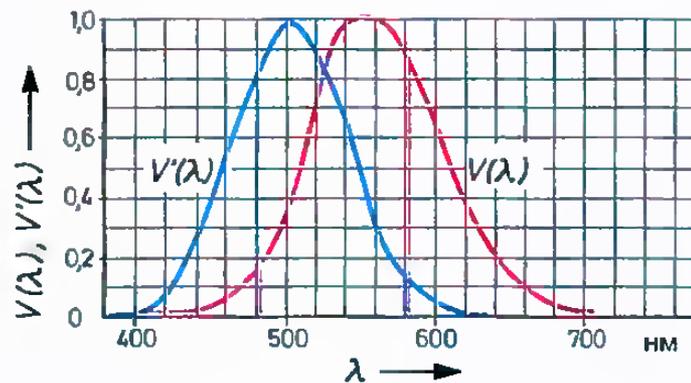


Рис. 67. Разрез глаза человека. 1 — стекловидное тело; 2 — склера; 3 — роговица; 4 — конъюнктура; 5 — передняя камера; 6 — сосудистая оболочка; 7 — радужная оболочка; 8 — хрусталик; 9 — захрусталиковое пространство; 10 — ретина; 11 — зрительный нерв; 12 — желтое пятно; 13 — центральная ямка; 14 — зрительная ось; 15 — оптическая ось; 16 — ресничное тело; 17 — ресничная мышца

**Таблица 4.8.** Основные характеристики палочек и колбочек.

Колбочки	Палочки
Расположены главным образом в центральной ямке сетчатки	С наибольшей плотностью расположены вне центральной ямки сетчатки
Малое поле зрения с большим разрешением	Большое поле зрения с малым разрешением
Колбочки действуют при дневном зрении	Палочки действуют при ночном зрении
Возможно цветное зрение	Не различаются цвета
Малая светочувствительность: $K_m = 683$ лм/Вт	Высокая светочувствительность: $K'_m = 1699$ лм/Вт
Относительная спектральная световая эффективность для дневного зрения $V(\lambda)$ с $\lambda_{\max} = 555$ нм	Относительная спектральная световая эффективность для ночного зрения $V'(\lambda)$ с $\lambda_{\max} = 507$ нм

**Рис. 4.21.** Относительная спектральная световая эффективность  $V(\lambda)$  для дневного зрения и относительная спектральная световая эффективность  $V'(\lambda)$  для ночного зрения (DIN 5031). При переходе от дневного зрения к ночному происходит инверсия зрительной оценки яркости голубого и желтого (красного) излучений.



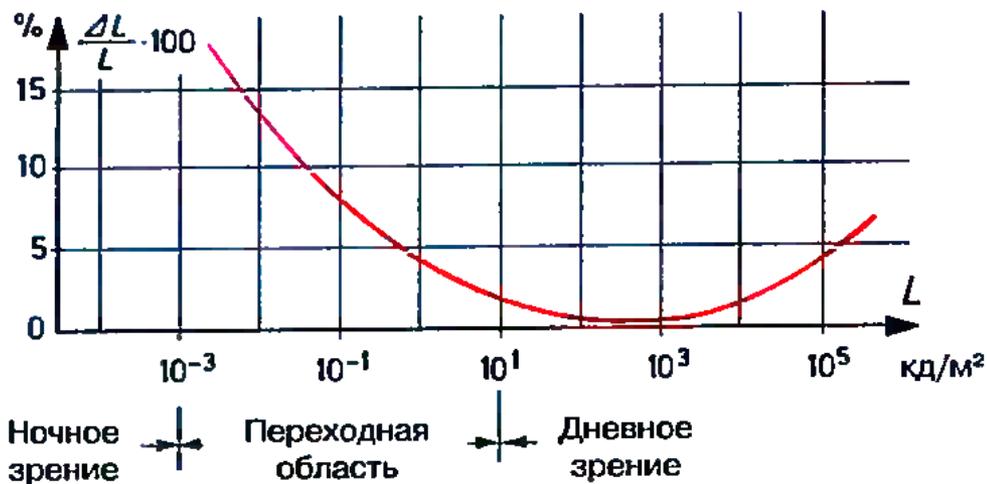


Рис. 4.22. Уровень распознавания различий в яркости при различной яркости фона.

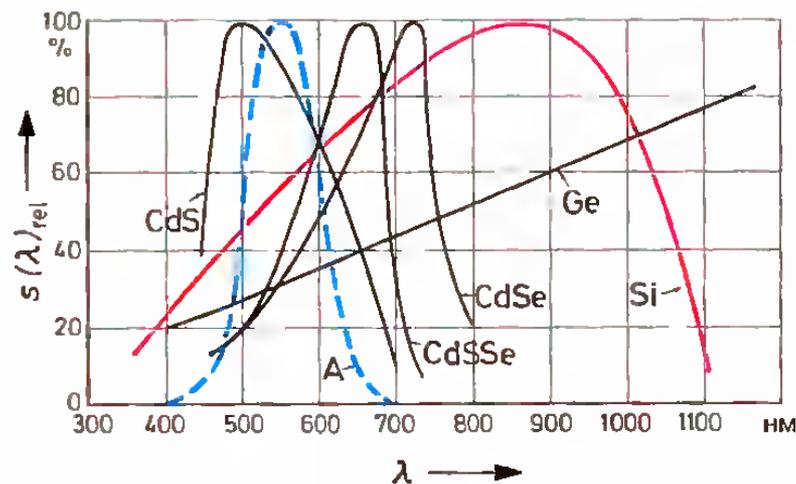


Рис. 4.24. Спектральная чувствительность полупроводниковых фотоприемников:  
 А — спектральная чувствительность глаза (для сравнения).

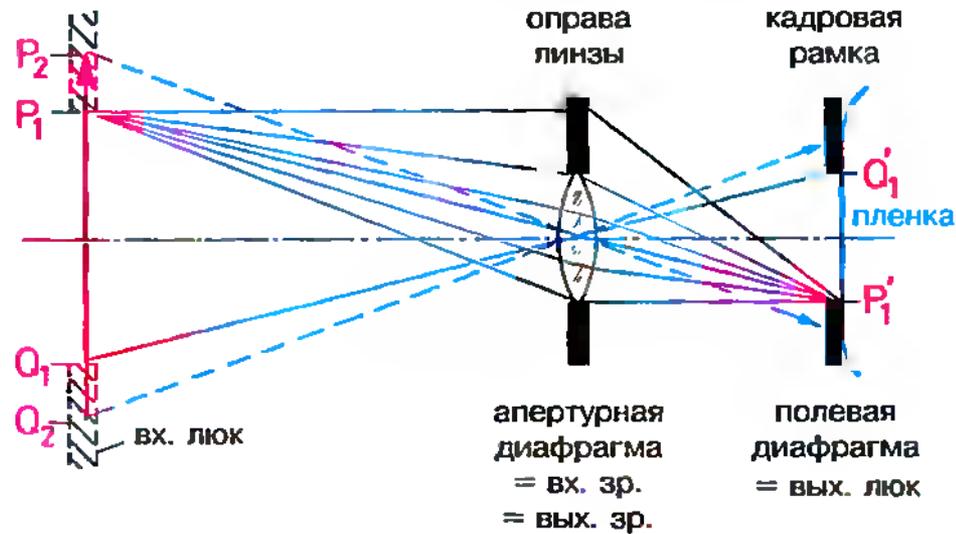


Рис. 3.1. Апертурная и полевая диафрагмы.

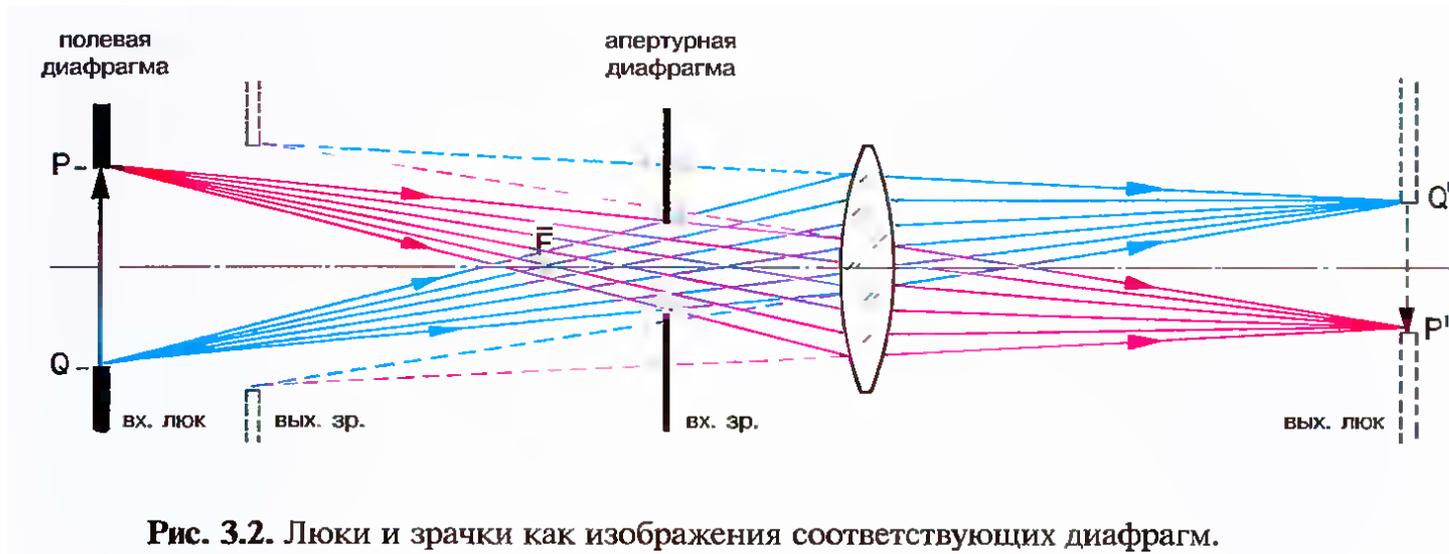
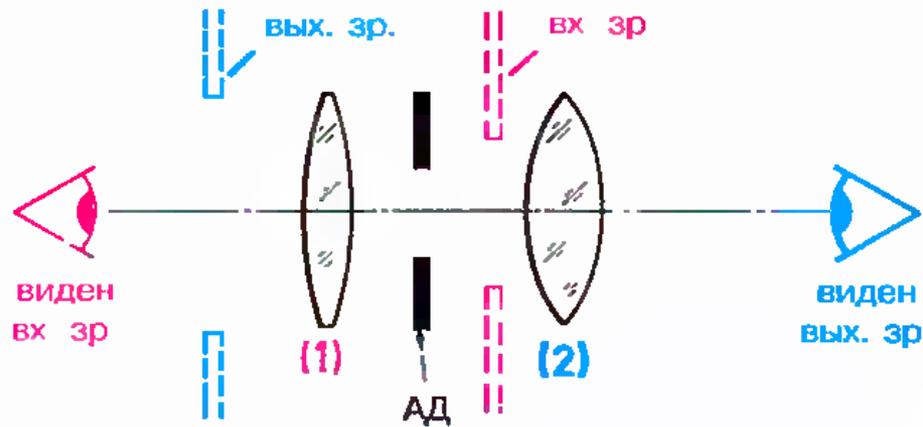
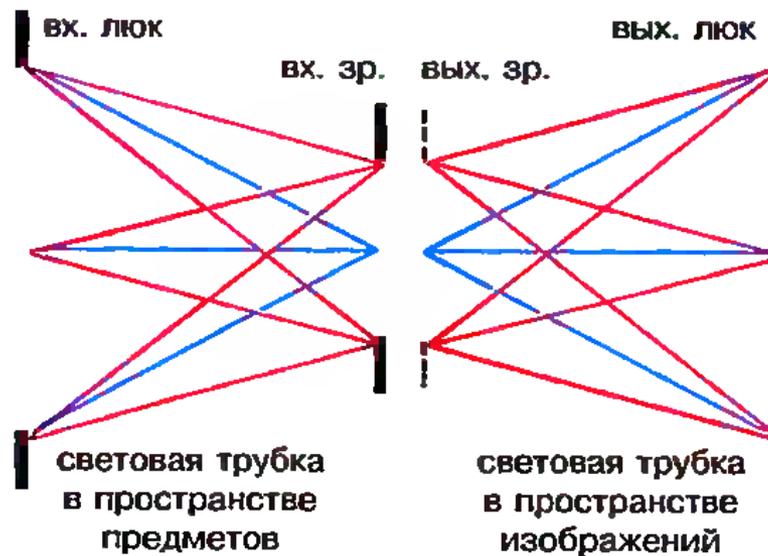


Рис. 3.2. Люки и зрачки как изображения соответствующих диафрагм.



**Рис. 3.3.** Апертурная диафрагма между двумя частями оптической системы.



**Рис. 3.4.** Гомоцентрические пучки при зрачках и люках.

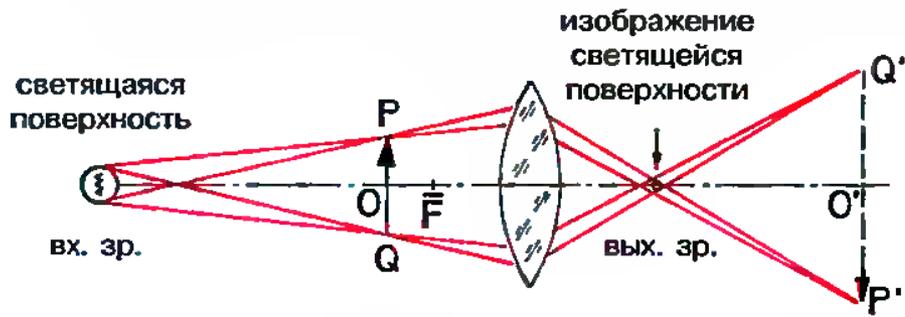


Рис. 3.5. Светящаяся поверхность, которая действует как зрачок.

$$k = \frac{f'}{D_{\text{вх. зр.}}}, \quad (47.1)$$

$$A = n \cdot \sin u, \quad (47.2)$$

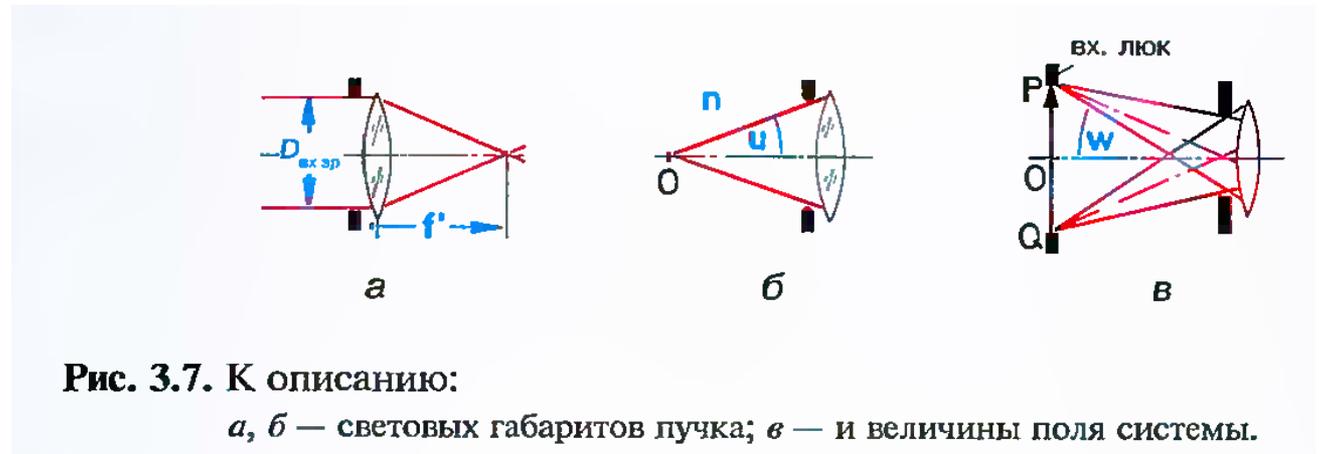


Рис. 3.7. К описанию:

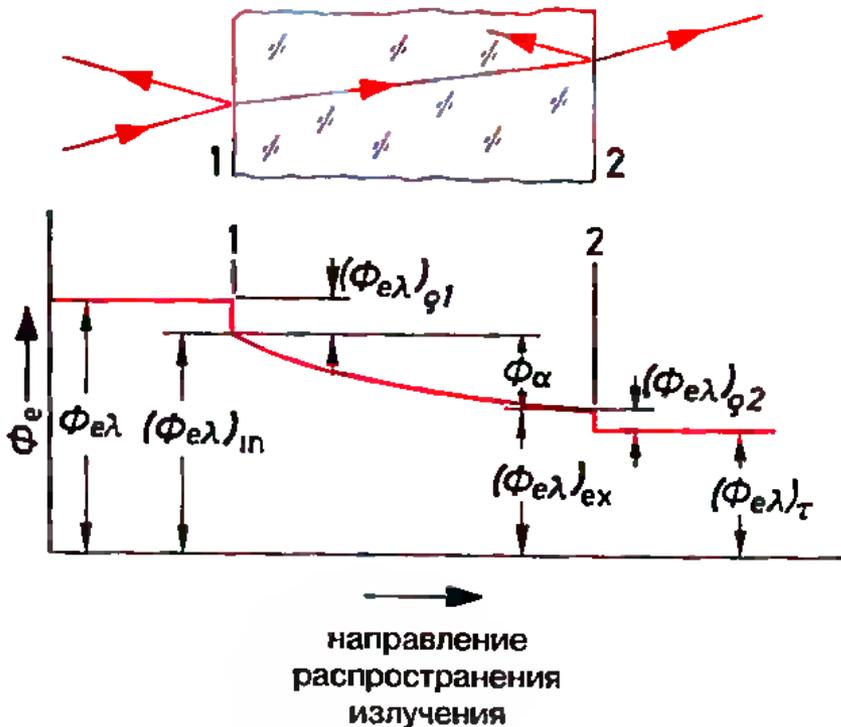
$a, б$  — световых габаритов пучка;  $в$  — и величины поля системы.

$$\tau(\lambda) = \frac{(\Phi_{e\lambda})_{\tau}}{\Phi_{e\lambda}}. \quad (48.1)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{(\Phi_{e\lambda})_{\alpha}}{\Phi_{e\lambda}}, \quad (48.2)$$

$$\rho(\lambda) = \frac{(\Phi_{e\lambda})_{\rho}}{\Phi_{e\lambda}}, \quad (48.3)$$

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1. \quad (48.4)$$



$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda. \quad (48.5)$$

$$(\Phi_e)_{\tau} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (48.6)$$

Прохождение излучения через пластину.

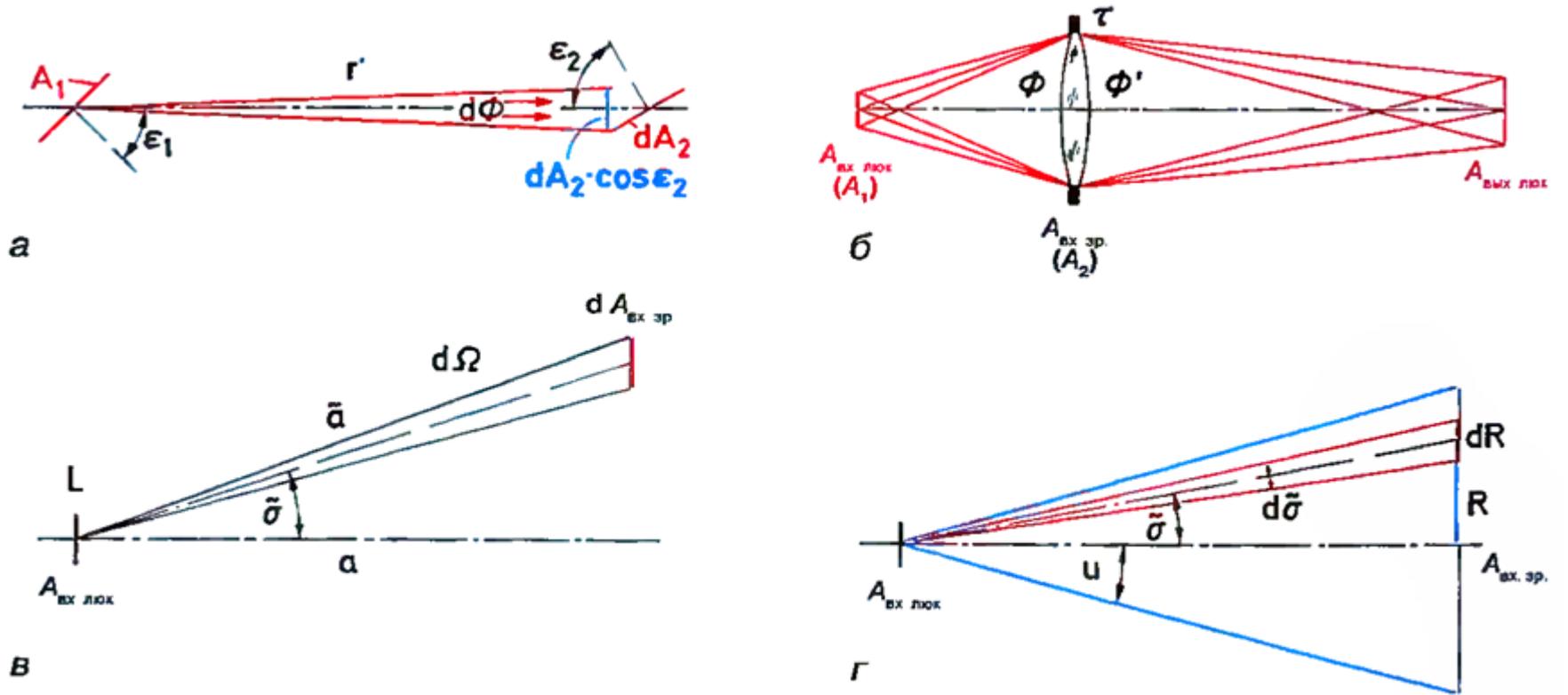


Рис. 4.4. Схемы для расчета освещенности

$$d\Omega = \frac{dA_2 \cos \varepsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_0, \quad (49.1)$$

$$d\Phi = L \cdot \frac{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \varepsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_0. \quad (49.2)$$

# Световой поток и освещенность изображения в оптической системе

$$d\Phi = L \cdot \frac{A_{\text{вх. люк}} \cdot \cos^2 \tilde{\sigma}}{\tilde{a}^2} \cdot \Omega_0 \cdot dA_{\text{вх. зр.}} \quad (50.1)$$

$$dA_{\text{вх. зр.}} = 2\pi R dR$$

$$R = \tilde{a} \cdot \sin \tilde{\sigma}$$

$$dR = \tilde{a} \cdot d\tilde{\sigma} / \cos \tilde{\sigma}$$

$$dA_{\text{вх. зр.}} = 2\pi \tilde{a}^2 \cdot \sin \tilde{\sigma} \cdot d\tilde{\sigma} / \cos \tilde{\sigma}$$

$$d\Phi = 2\pi \cdot L \cdot A_{\text{вх. люк.}} \cdot \cos \tilde{\sigma} \cdot \sin \tilde{\sigma} \cdot d\tilde{\sigma} \cdot \Omega_0$$

$$\Phi = \pi \cdot L \cdot A_{\text{вх. люк.}} \cdot \sin^2 u \cdot \Omega_0 \quad (50.2)$$

$$E = \frac{\tau \cdot \Phi}{A_{\text{вых. люк.}}} \quad (50.3)$$

Из ф. (50.2), (50.3) и  $A_{\text{вх. люк.}} / A_{\text{вых. люк.}} = 1/\beta'^2$  получаем:

$$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \frac{\sin^2 u}{\beta'^2} \cdot \Omega_0$$

$$E = \pi \cdot L \cdot \tau \cdot \sin^2 u' \cdot \Omega_0$$

<http://naeps.kpi.ua/ua/lections/downloads/lections/dkf/>

<http://naeps.kpi.ua> – МЕНЮ “ЗАВАНТАЖЕННЯ” –  
ДИСЦИПЛІНИ – Фізика (додатковий курс) – ДКР

# Источники света

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

# Физика твердого тела

# Квантовая механика

$$E = h\nu \quad (54.1)$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \quad (54.2)$$

$$p = mv \quad (54.3)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (54.4)$$



$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (54.5)$$



$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (54.6)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (54.7)$$

$$E = h\nu \quad (54.8)$$

$$\bar{p} = \frac{h}{2\pi} \bar{k} \quad (54.9)$$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (55.1)$$

$$\Delta x m \Delta v \geq \frac{h}{2\pi} \quad (55.2)$$

$$\Delta x \Delta v \geq \frac{h}{m 2\pi} \quad (55.3)$$

$$\Delta x \Delta p \gg \frac{h}{2\pi} \quad (55.4)$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{h}{2\pi} \quad (55.5)$$

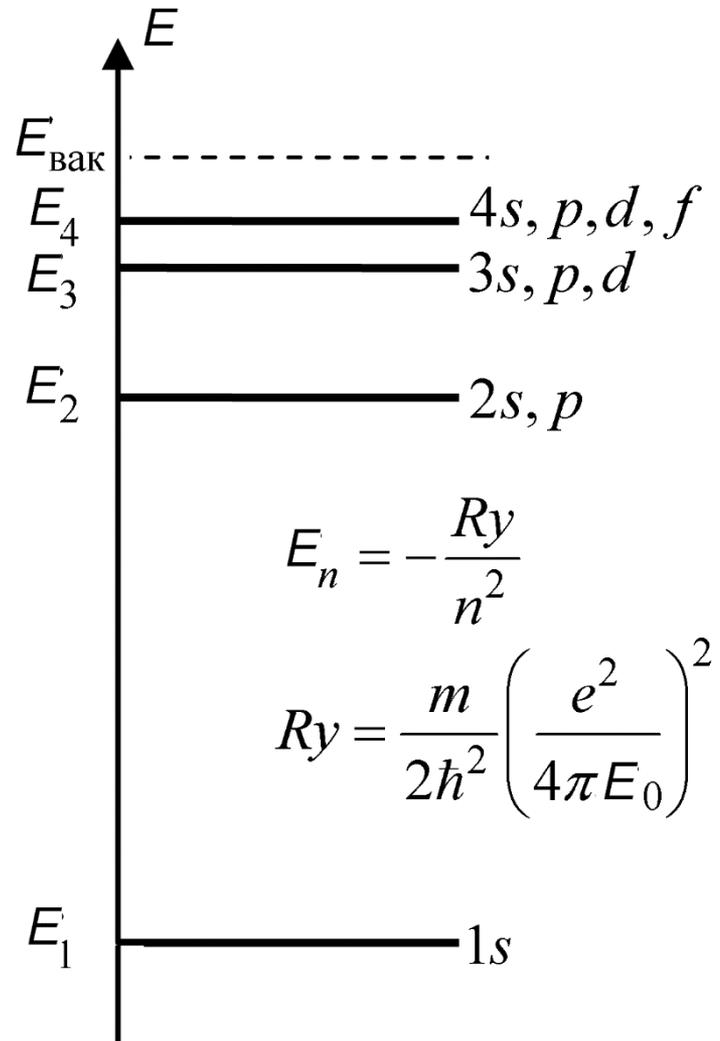
$$\Delta \Psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - U) \Psi = 0 \quad (55.6)$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$D = I_{\text{ПР}} / I_{\text{ПАД}} \quad (55.7)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{4\pi}{h} \int_{x_1}^{x_2} [2mU(x) - E]^{1/2} dx} \quad (55.8)$$

Слой	Оболочка	Квантовые числа				Максимальное число электронов
		$n$	$l$	$m$	$s$	
K	1s	1	0	0	$\pm 1/2$	2
	2s		0	0	$\pm 1/2$	2
L	2p	2	1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	3s		0	0	$\pm 1/2$	2
M	3p		1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	3d	3	2	-2 -1 0 +1 +2	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	10
	4s		0	0	$\pm 1/2$	2
N	4p		1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	4d		2	-2 -1 0 +1 -2	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	10
	4f	4	3	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	14



$$E_n = -\frac{Ry}{n^2}$$

$$Ry = \frac{m}{2\hbar^2} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2$$

Рис. 56.1 – Энергетический спектр атома водорода

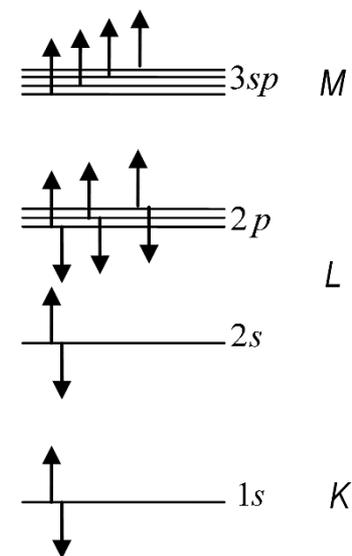
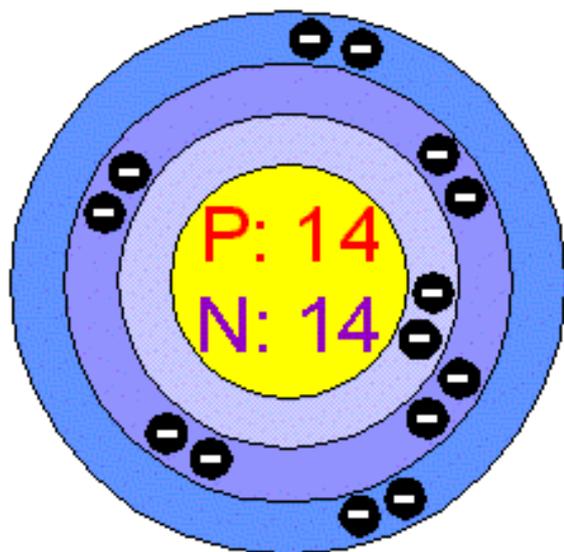


Рис. 57.1 – Атом кремния: *a* – модель Бора, *б* – заполнение энергетических уровней (оболочек)

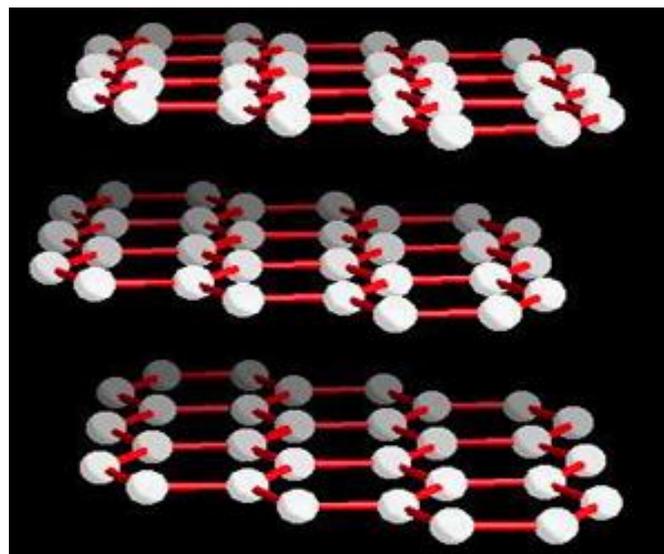
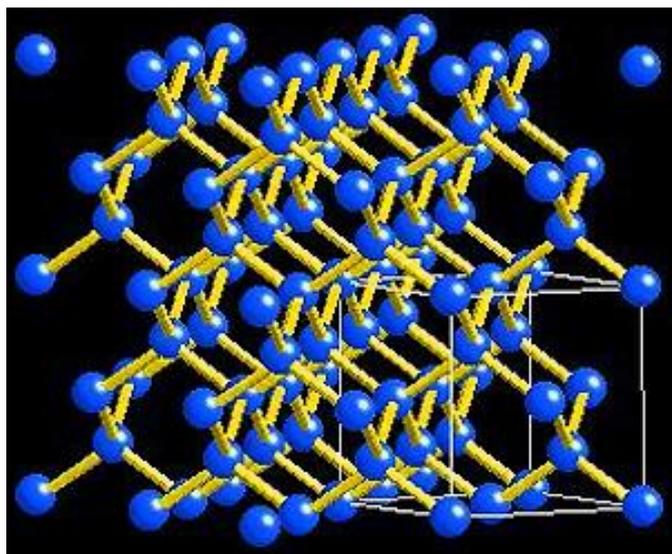


Рис. 57.2 – Трехмерная кристаллическая решётка: *a* – решетка кремния, *б* – решетка графита

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ см (50 нм = 0,05 мкм)}$$

$$N = 10^{22} \dots 10^{23}$$

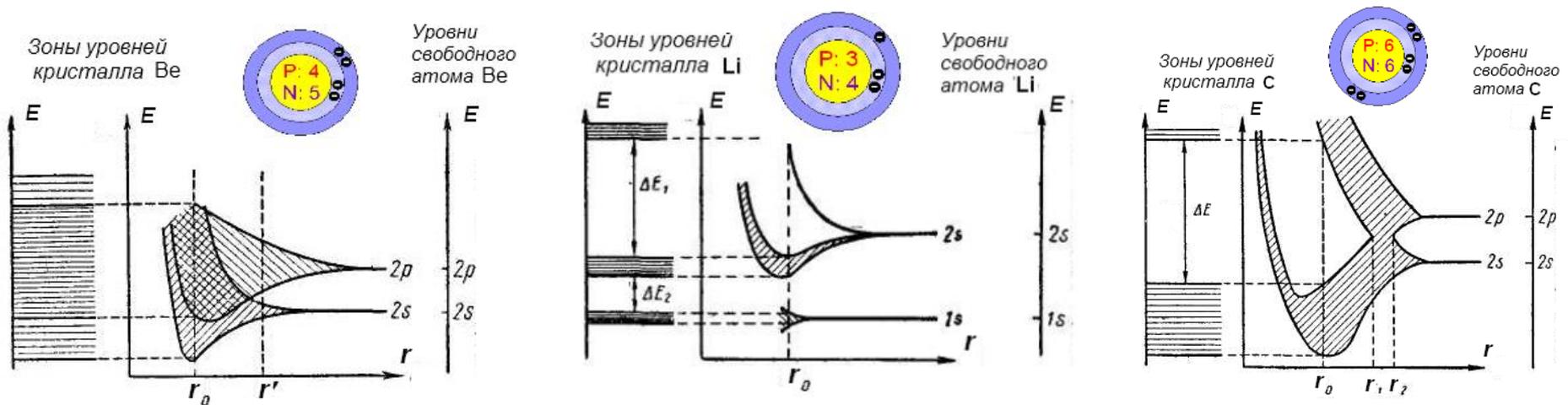


Рис. 58.1 – Изменение энергетического спектра электронов при объединении атомов в твердое тело:

*a* – бериллия, *б* – лития, *в* – углерода (алмаза)

$$(d_1 < d < d_2)$$

$$(\Delta E_{i+1} - \Delta E_i)/2 \longrightarrow E_{gi}$$

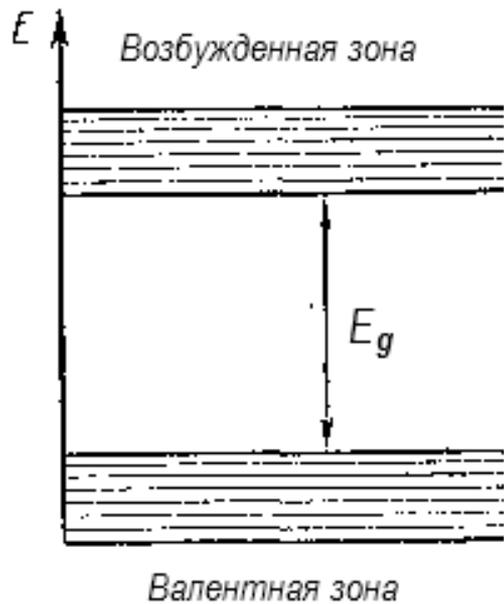


Рис. 59.1 – Упрощенная энергетическая диаграмма

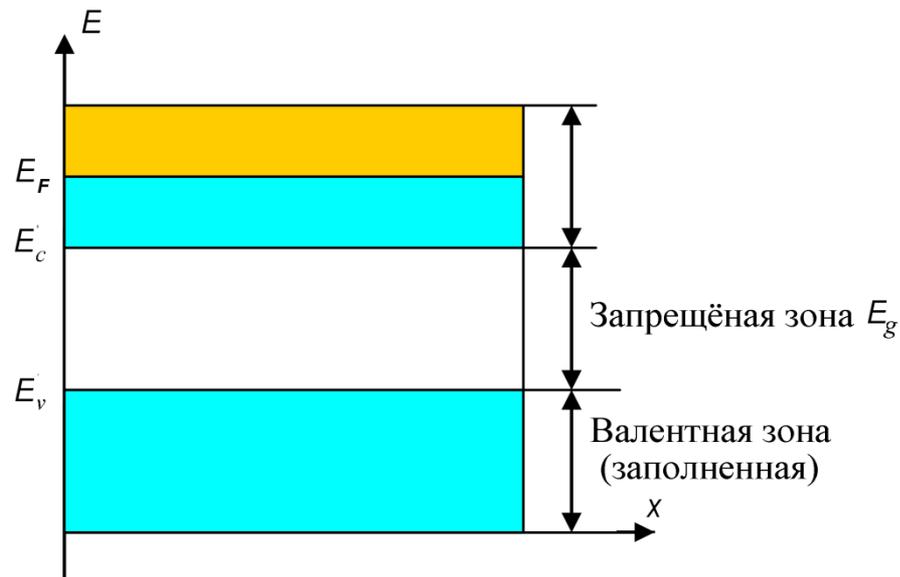
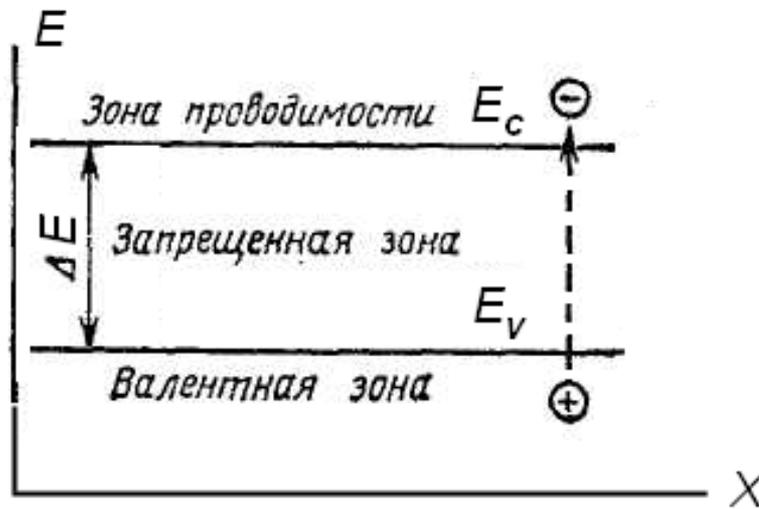


Рис. 59.3 – Энергетическая диаграмма металла



Рис. 59.2 – Энергетическая диаграмма диэлектрика



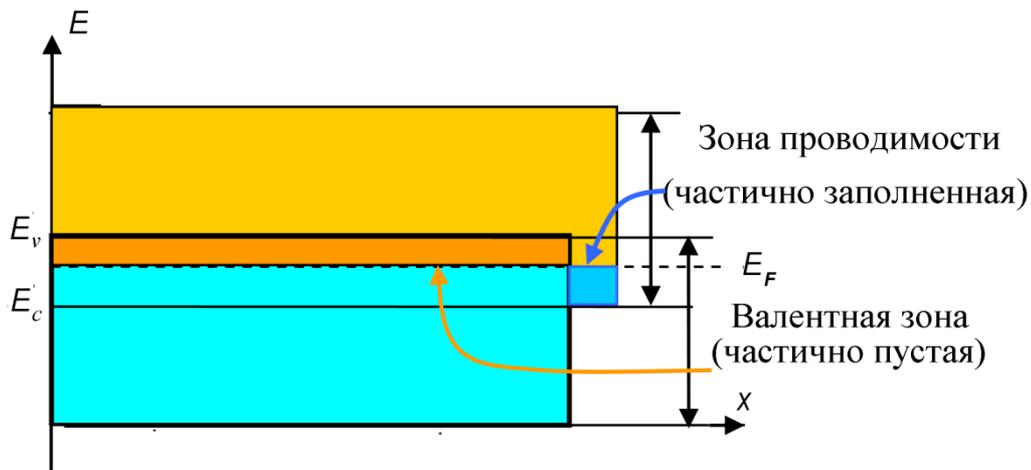


Рис. 60.1 – Энергетическая диаграмма полуметалла

$$n = \frac{N}{V}$$

$$n = \frac{\delta}{A} N$$

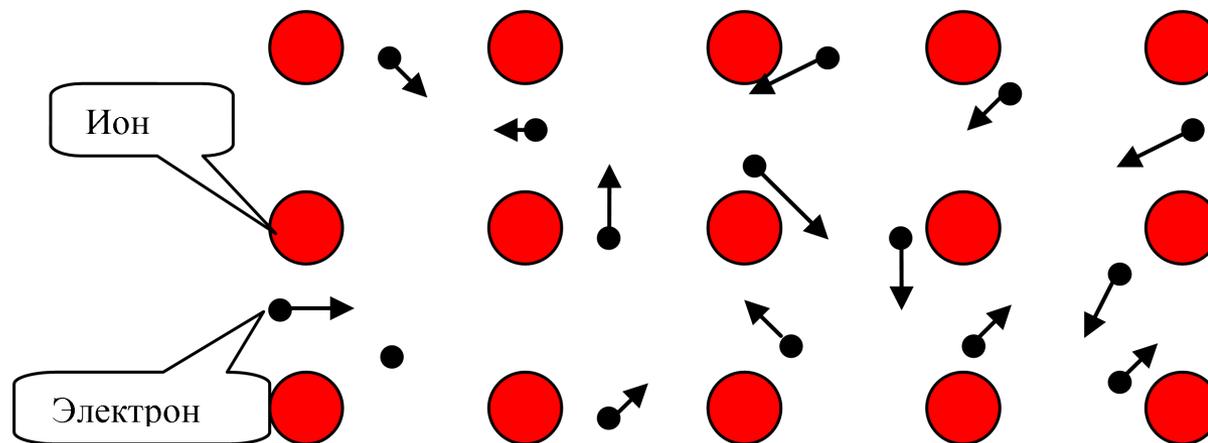
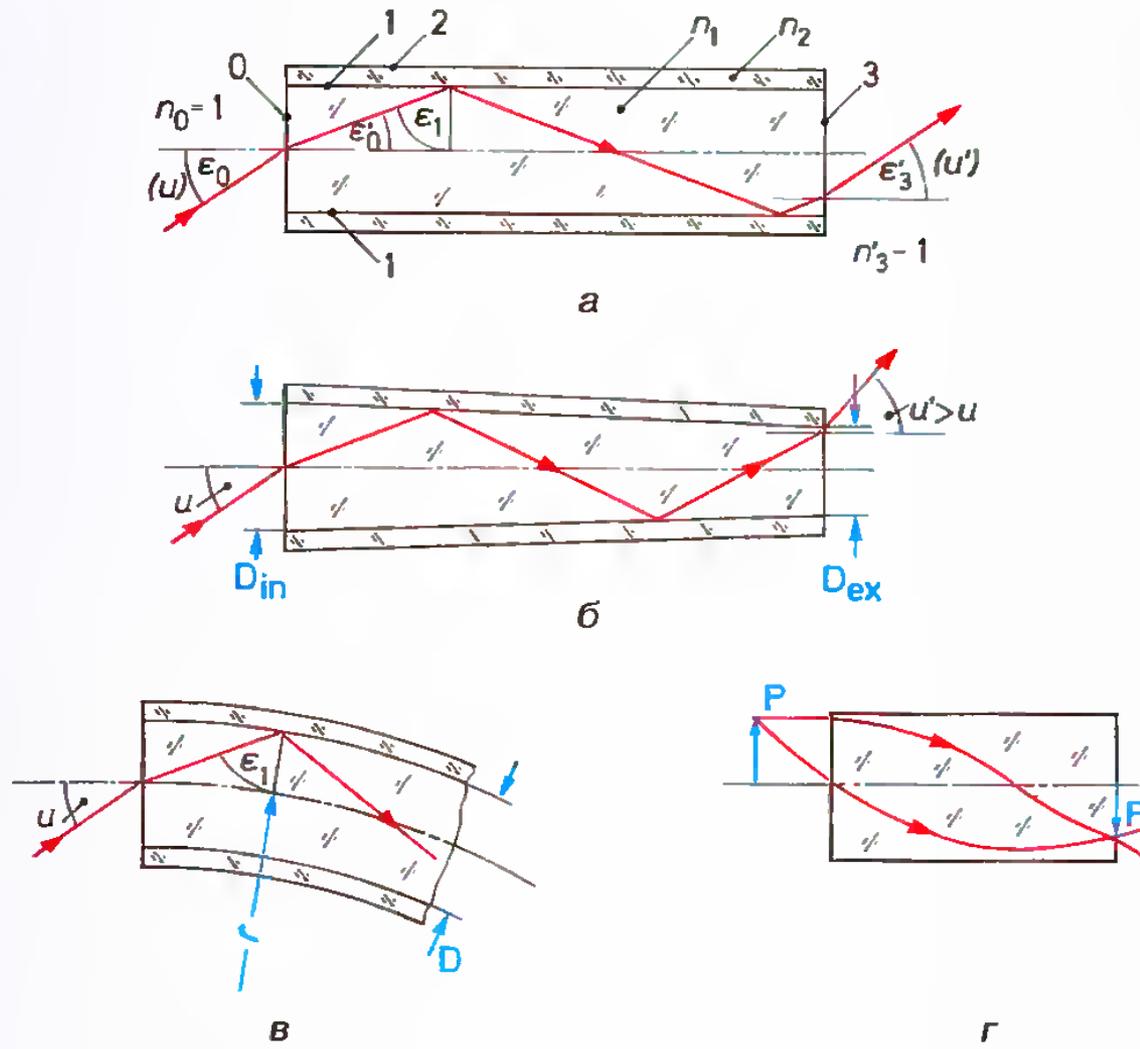


Рис. 60.2 – Модель металла



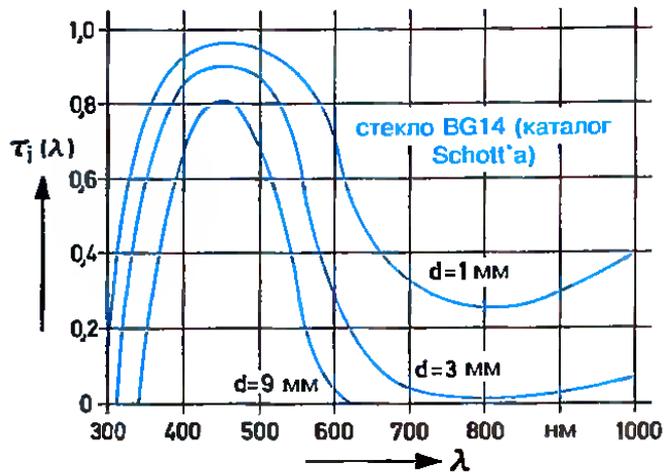
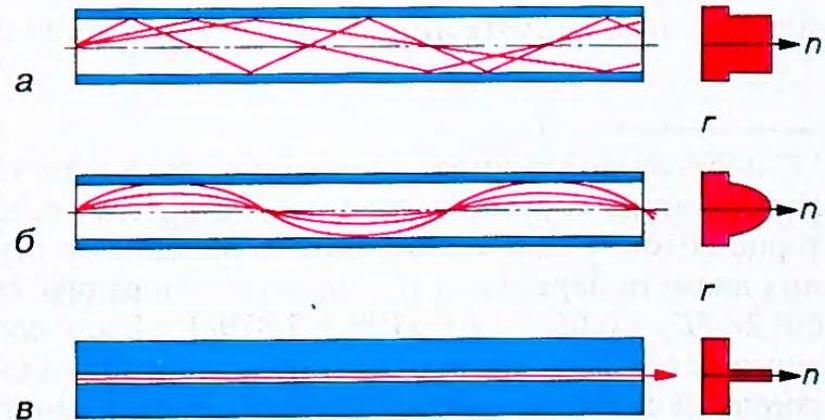
**Рис. 5.1.** Траектория луча в световоде:

*а* — прямое цилиндрическое волокно; *б* — прямое коническое волокно; *в* — искривленное цилиндрическое волокно; *г* — градиентное волокно.

**Рис. 5.2.** Типы оптических волокон для линий связи:

*a* — многомодовое со ступенчатым профилем показателя преломления; *б* — градиентное многомодовое; *в* — одномодовое со ступенчатым профилем показателя преломления.

Голубым цветом обозначена оболочка с более низким показателем преломления. Справа показан соответствующий профиль показателя преломления  $n(r)$ .

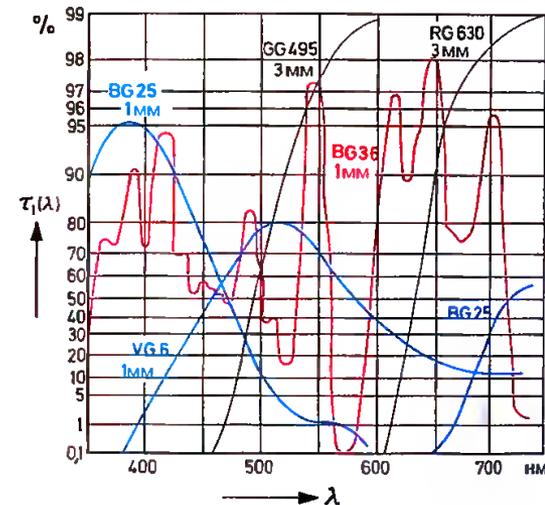


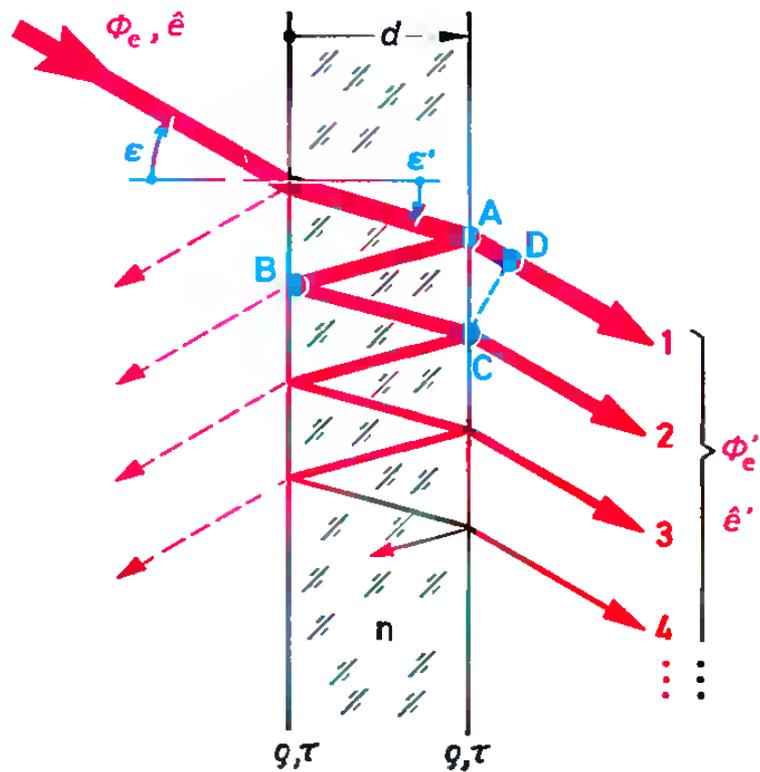
**Рис. 5.12.** Влияние толщины фильтра  $d$  на чистый спектральный коэффициент пропускания.

**Рис. 5.13.** Типичные графики коэффициентов пропускания фильтров из цветного стекла. Стекла BG 25 и VG 6 окрашены молекулярно-растворенными красителями. Стекла GG 495 и RG 630 окрашены коллоидными красителями. Стекло BG 36: коэффициент пропускания имеет многочисленные узкие максимумы и минимумы. Деления на оси ординат нанесены здесь в соответствии с выражением

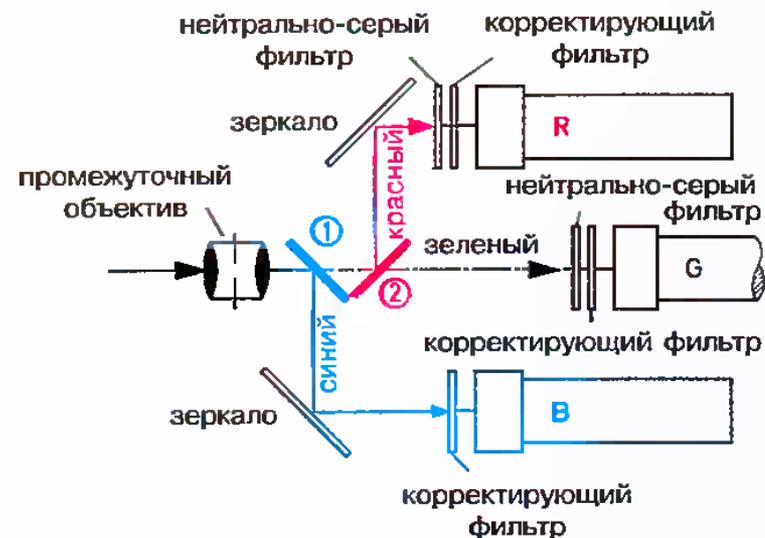
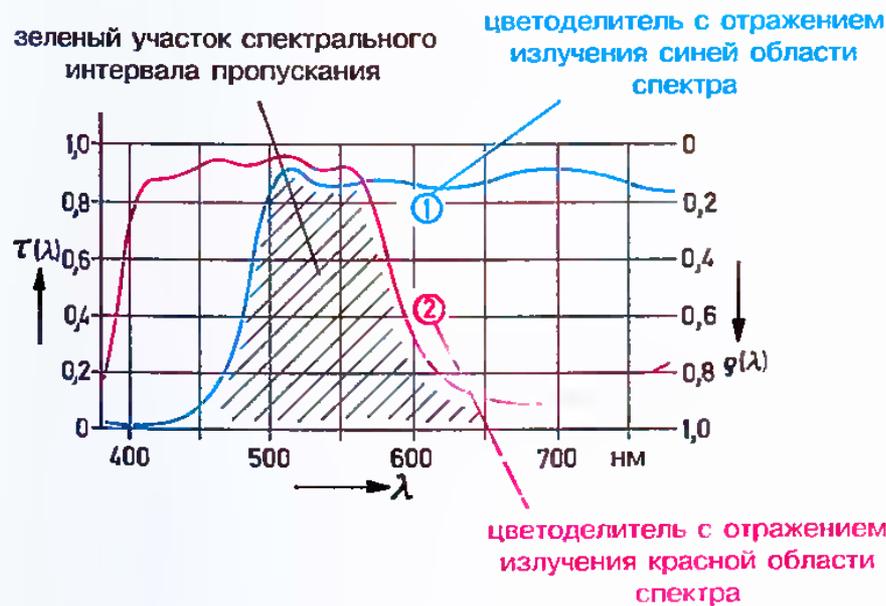
$$1 - \lg \left[ \lg \left( \frac{1}{\tau_i(\lambda)} \right) \right].$$

Благодаря этому форма графика  $\tau_i(\lambda)$  не зависит от толщины фильтра!



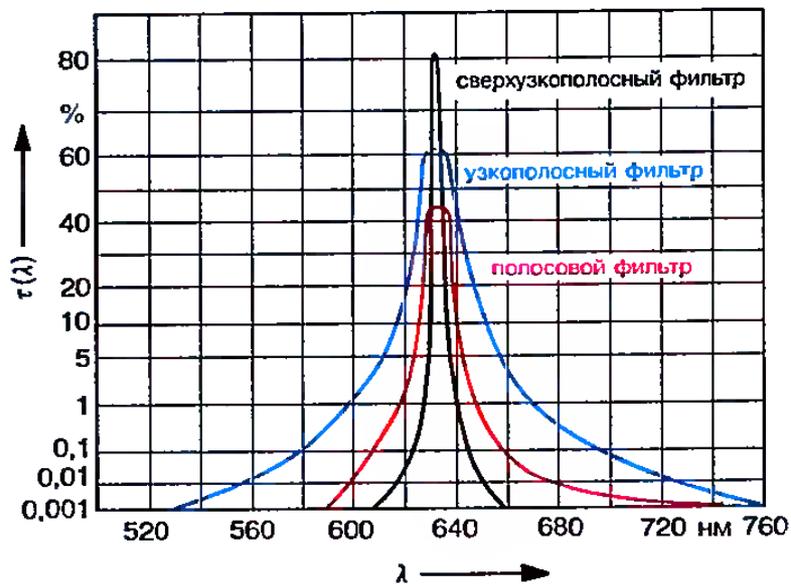


**Рис. 5.14.** Конструктивная схема простого интерференционного фильтра.

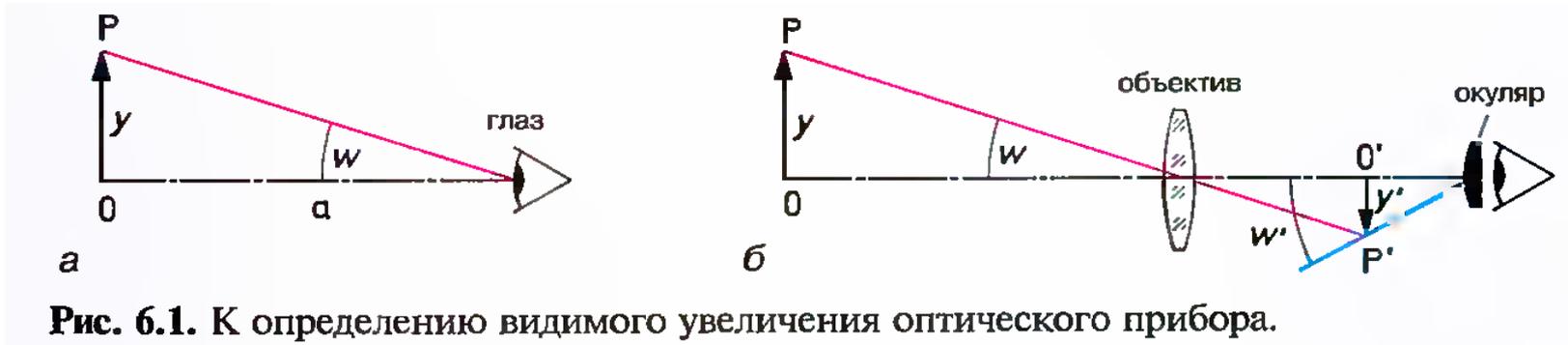


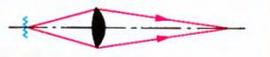
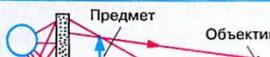
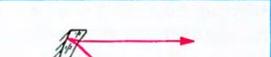
**Рис. 5.15. Цветоделитель:**

*a* — спектральный коэффициент пропускания  $\tau(\lambda)$  и спектральный коэффициент отражения  $\rho(\lambda) = 1 - \tau(\lambda)$ . Угол падения  $45^\circ$ ; неполяризованный свет; *б* — применение двух цветоделителей (см. рис. 5.15, *a*) в передающей камере цветного телевидения. R, G, B — передающие телевизионные трубки.



**Рис. 5.16.** Сравнение графиков коэффициентов пропускания интерференционных фильтров. Для наглядности представления малых величин деления на оси ординат нанесены в соответствии с формулой  $1 - \lg [\lg (1/\tau(\lambda))]$ .



$\beta' = -1$	$ \beta'  > 1$	$\beta' = \infty$
<p><b>а</b></p>  <p>Однoчная линза со сферическими поверхностями, рассчитанная на минимум сферической аберрации</p>	<p><b>б</b></p> 	<p><b>в</b></p> 
<p><b>г</b></p>  <p>Конденсор из двух линз со сферическими поверхностями</p>	<p><b>д</b></p> 	<p><b>е</b></p> 
<p><b>ж</b></p>  <p>Конденсор с асферическими поверхностями</p>	<p><b>з</b></p> 	<p><b>и</b></p> 
<p><b>к</b></p>  <p>Многолинзовый конденсор без асферических поверхностей</p>	<p><b>л</b></p> 	<p><b>м</b></p> 
<p><b>н</b></p>  <p>Прямое освещение</p>	<p><b>о</b></p>  <p>Эллипсоидное зеркало</p>	<p><b>п</b></p>  <p>Параболическое зеркало</p>
<p><b>р</b></p>  <p>Предмет Объектив Лампы Рассеивающая пластина</p>	<p><b>с</b></p>  <p>Конденсор для освещения по методу темного поля (для микроскопа)</p>	<p><b>т</b></p>  <p>Зеркало Манжена</p>
<p><b>у</b></p>  <p>Линза Френеля</p>	<p><b>ф</b></p>  <p>Конденсор с децентрированными линзами</p>	<p><b>х</b></p>  <p>Пластина с линзовым растром</p>