

В целях уменьшения наклона силовых отражательных поверхностей вместо прямоугольных были использованы башмачные призмы с двумя отражениями, с наклоном силовой отражательной поверхности на угол  $22^{\circ}30'$ . При этом в башмачных призмах одна и та же наклонная поверхность использовалась дважды - как преломляющая, и как поверхность, работающая с полным внутренним отражением.

Подобные башмачные призмы с силовой отражательной поверхностью явились своего рода прообразом уже рассмотренного узла с небольшим углом наклона силовой поверхности.

Заметим, что в башмачных призмах угол наклона силовой поверхности, равный  $22^{\circ}30'$ , все еще оставался значительным, что, в свою очередь, вызывало ощутимый продольный и наклонный астигматизм. Симметричное расположение объектива и окуляра относительно одной и той же точки в сочетании с центрированной оборачивающей системой приводило к суммированию и продольного, и наклонного астигматизмов. При этом продольный астигматизм можно было устранить с помощью цилиндрических преломляющих линз или посредством придания несилковым поверхностям призм сферической формы большого радиуса кривизны. Для исправления же наклонного астигматизма не были предусмотрены коррекционные элементы.

Схема нецентрированного перископа показана на рис. 47.

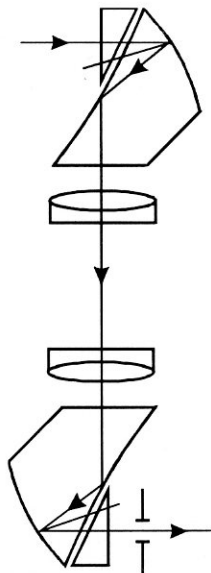


Рис. 47. Нецентрированный перископ

## Глава 7. Лупы

### Монокулярные лупы

Прежде чем рассматривать конкретные нецентрированные оптические системы, уместно сформулировать причины, обуславливающие их использование на практике.

Значимость нецентрированных систем заключается в том, что они позволяют использовать отражательные поверхности вместо преломляющих для создания той или иной оптической силы. Поэтому применение зеркальных поверхностей требует оценки преимуществ, которыми они обладают по сравнению с преломляющими поверхностями.

Преимущества отражательных поверхностей можно разделить на две группы:

1. Оптические системы, содержащие наклонные силовые зеркальные поверхности, могут обладать оптическими характеристиками, неосуществимыми в центрированных оптических системах, построенных только из преломляющих поверхностей.
2. Оптические системы с наклонными силовыми зеркальными поверхностями могут иметь по сравнению с центрированными оптическими системами как габаритные, так и технологические преимущества.

Приступая к разработке нецентрированных систем, целесообразно заранее выявить их преимущества.

Рассматривая лупы, построенные с использованием наклонных силовых отражательных поверхностей, можно для упрощения сопоставлять зеркальные системы с линзовыми, не вводя первоначально децентрировки зеркальных поверхностей.

Лупа того или иного увеличения в самом общем случае должна обладать необходимой оптической силой. Кроме того, следует обеспечить расстояние до предмета и выходного зрачка.

Проанализируем элемент лишь с одной силовой поверхностью в виде плосковыпуклой (преломляющей) или плоскозеркальной линзы (рис. 48).



Рис. 48. Плоскопреломляющая (а) и плоскозеркальная (б) линзы

Для плоскопреломляющей линзы радиус

$$r = (n - 1) f', \quad (525)$$

для плоскозеркальной -

$$r = 2n f'. \quad (526)$$

Из формул (525) и (526) следует, что при показателе преломления  $n = 1,5$  радиус плоскозеркальной линзы в шесть раз больше по сравнению с плоскопреломляющей.

Оценивая хроматические aberrации этих линз, запишем формулу для хроматизма положения плоскопреломляющей линзы

$$\delta s' = \frac{f'}{\nu} \quad (527)$$

и для плоскозеркальной

$$\delta s' = \frac{f'}{\nu} \frac{n - 1}{n^2}. \quad (528)$$

Численно, полагая фокусное расстояние лупы  $f' = 10$  мм и выбирая марку стекла К8 с показателем преломления  $n = 1,5163$  и числом Аббе  $\nu = 64$ , находим значение хроматизма для плоскопреломляющей линзы:

$$\delta s' = -0,156 \text{ мм (или 1,56 дптр)};$$

для плоскозеркальной линзы это значение составит

$$\delta s' = 0,035 \text{ мм (или 0,35 дптр)}.$$

Радиусы кривизны в соответствии с формулами (525) и (526) будут равны: для плоскопреломляющей линзы  $r = 5,163$ , а для плоскозеркальной  $r = 30,326$ .

Кривизна поля для плоскопреломляющей линзы получается отрицательной, а для плоскозеркальной, наоборот, - положительной; продольная сферическая aberrация при относительном отверстии 1:2 для первой линзы равна -3,08 мм, а для второй -0,19 мм.

Сопоставляя все значения, видим, что центрированные aberrации плоскозеркальной линзы в несколько раз меньше по сравнению с плоскопреломляющей. Аналогичная картина сохранится, если лупы будут состоять из двух компонентов.

Рассматривая конструкцию лупы с использованием наклонных отражательных поверхностей, наблюдаем возникновение нецентрированных aberrаций - продольного и наклонного астигматизмов и комы.

Продольный астигматизм можно исправить посредством введения на сильно наклоненных отражающих плоскостях больших радиусов кривизны, превращающих их в поверхности коррекционные, как это уже было рассмотрено ранее.

Устранение наклонного астигматизма ничем не обеспечивается, однако для лупы с увеличением, не превосходящим  $4-8^X$ , он еще не выходит из допустимых пределов, учитывая, что величина используемой апертуры, определяемая диаметром зрачка глаза, - незначительна. По той же причине нецентрированная кома также малоощутима, хотя для ее исправления можно было бы ввести тонкий воздушный клин.

В качестве примера на рис. 49 показана схема лупы для слабовидящих, обладающей видимым увеличением  $\Gamma = 4^X$ . Эта лупа обеспечивает предметное поле зрения в направлении линии базиса  $2y = 60$  мм, что соответствует ширине газетного столбца.

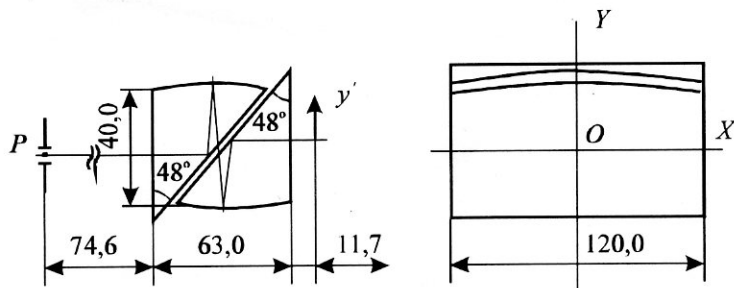


Рис. 49. Лупа для слабовидящих (в обратном ходе лучей) в двух проекциях

Следует обратить внимание еще на одну особенность лупы с децентрированными отражательными поверхностями: радиусы ее обеих силовых поверхностей велики и приблизительно равны  $r = 400$  мм, благодаря чему возможно обеспечить свободное отверстие порядка  $120 \times 40$  мм, т.е. значительно превосходящее фокусное расстояние лупы. Это обстоятельство приводит к большей свободе расположения глаз наблюдателя и, как будет рассмотрено в дальнейшем, позволяет даже бинокулярное наблюдение.

Одним из недостатков подобной лупы является сравнительно небольшое предметное расстояние, составляющее около 20-25% от фокусного расстояния лупы, что требует при наблюдении непрозрачных объектов соответственного освещения.

Другим примером является зеркальная лупа, построенная на использовании полупентапризмы. Условия ее работы усложняются, так как угол наклона силовой поверхности составляет  $22^{\circ}30'$ , что вызывает значительный наклонный астигматизм. Ее конструктивная особенность заключается в отклонении оси визирования от первоначального направления на угол  $45^{\circ}$ . Такая лупа обладает несколько большим предметным расстоянием, достигающим до 40% от фокусного расстояния, вследствие чего можно расположить перед нею линзу с конфокальной поверхностью и тем самым повысить увеличение пропорционально показателю преломления конфокальной линзы. Заметим, что ввод и вывод конфокальной линзы не вызовет расфокусировки системы.

Схема лупы на основе полупентапризмы показана на рис. 50.

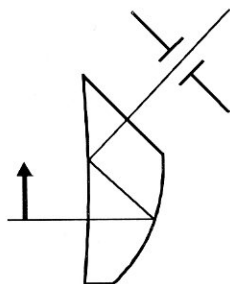


Рис. 50. Лупа на основе полупентапризмы

## Биноклярные лупы

В предыдущем параграфе было отмечено, что лупы, построенные на основе использования наклонных зеркальных поверхностей, позволяют получить выходные зрачки значительных размеров.

Так, для лупы с видимым увеличением  $\Gamma = 4^{\times}$  выходное отверстие является прямоугольником со сторонами  $120 \times 40$  мм, что позволяет совмещать с выходным зрачком этой лупы оба зрачка глаз наблюдателя, расстояние между которыми не превышает 72 мм. Таким образом, можно использовать рассматриваемую лупу для биноклярного стереоскопического наблюдения.

Следует заметить, что диаметр выходного зрачка обычных линзовых луп 4-кратного увеличения может быть равен фокусному расстоянию, определяемому как  $f' = 250 / \Gamma = 62,5$  мм. Это исключает возможность их применения для биноклярного наблюдения.

Процесс бинокулярного стереоскопического наблюдения через лупы с большим выходным зрачком можно представить как пропускание поля зрения обоих глаз через отверстие с заданной шириной  $a$ , отстоящее на расстояние  $c$  от линии глазного базиса, равного  $b$ , как это показано на рис. 51, *а*. При этом визирные линии обоих глаз параллельны друг другу.

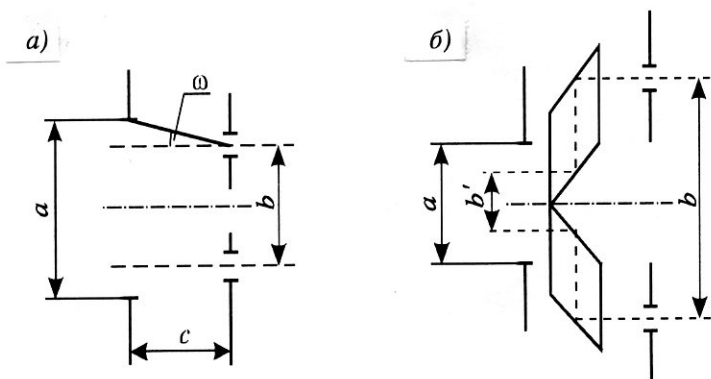


Рис. 51. Расположение зрачков лупы и глаз при бинокулярном наблюдении: отверстие лупы больше (*а*) и меньше (*б*) глазного базиса

Тангенс полевого угла  $\omega$  определяется как отношение полуразности ширины отверстия лупы и значения глазного базиса к расстоянию между выходным зрачком лупы и линией глазного базиса. Таким образом,

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{a - b}{2c}. \quad (529)$$

Как видно из данных рис. 51, *а*, полевой угол, образуемый лучом, направленным внутрь отверстия, может быть значительно больше, чем определяемый по формуле (529). Однако при таком увеличении полевого угла утрачивается возможность стереоскопического наблюдения. Эта картина особенно характерна, когда ширина отверстия  $a$  становится равной главному базису  $b$ . В подобном случае правый глаз будет наблюдать левую часть предмета, а левый, наоборот, - правую. Одновременное наблюдение какой-либо точки предмета обоими глазами становится невозможным.

Численно для лупы 4-кратного увеличения с шириной отверстия  $a = 120$  мм при глазном базисе  $b = 64$  мм и расстоянии до глаз наблюдателя  $c = 200$  мм тангенс полевого угла

$$\operatorname{tg} \omega = (120 - 64) / 2 \cdot 200 = 0,14 \quad \text{и} \quad \omega = 8^\circ.$$

Заметим, что при уменьшении расстояния  $c$  до 100 мм поле зрения должно будет возрасти:  $\operatorname{tg} \omega = 0,28$  и  $\omega = 15^\circ 39'$ .

Уменьшение отверстия  $a$  до 100 мм приведет к резкому уменьшению полевого угла. В этом случае при расстоянии  $c = 100$  мм получаем  $\operatorname{tg} \omega = 0,18$  и угол  $\omega = 10^\circ 12'$ .

При повышении видимого увеличения вдвое, т.е. до  $\Gamma = 8^x$ , ширина отверстия  $a$  будет равна 60 мм, что меньше значения глазного базиса, следовательно, как было показано, стереоскопическое наблюдение становится невозможным.

Заметим, что при бинокулярном наблюдении возможно отступление от параллельности визирных осей обоих глаз на так называемый угол конвергенции  $\alpha$ , определяемый отношением глазного базиса к удвоенному расстоянию наилучшего зрения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{2 \cdot 250} = 0,128; \quad \alpha = 7^\circ 18'.$$

Однако для лупы с увеличением  $\Gamma = 8^x$ , когда глазной базис превосходит ширину отверстия, полевой угол получается меньше самого угла конвергенции.

Тем не менее возможность стереоскопического наблюдения для луп с большим видимым увеличением можно обеспечить, изменяя базис, что достигается размещением после собственно лупы пары ромбических призм.

Рассмотрим работу двух ромбических призм, входные грани которых равны половине отверстия лупы  $a$ , как показано на рис. 51, б. Расстояние между центрами входных граней ромбических призм будет играть роль уменьшенного базиса  $b' = a / 2$ .

Согласно данным рис. 51, б, нетрудно определить длину хода луча в каждой из ромбических призм:

$$d = \frac{b - b'}{a} + \frac{a}{2} \quad (530)$$

или, учитывая равенство  $b' = a / 2$ ,

$$d = \frac{1}{2} \left( b + \frac{a}{2} \right) \quad (531)$$

и, редуцируя толщину  $d$  к воздуху,

$$\frac{d}{n} = \frac{b + a/2}{2n}. \quad (532)$$

Добавляя к редуцированной толщине ромбической призмы удаление выходного зрачка  $s'$ , получаем расстояние  $c'$  от выходного отверстия линзы до уменьшенного базиса  $b'$ .

Имея в распоряжении эти величины, можно перейти к определению тангенса полевого угла:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{b'}{2c'} = \frac{a}{4 \left( \frac{b + a/2}{2n} + s' \right)}. \quad (533)$$

Полагая, что ширина отверстия линзы может быть равна ее удвоенному фокусному расстоянию  $2f'$ , формула (533) примет вид

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{f'}{\frac{b + f'}{n} + 2s'}. \quad (534)$$

Численно, задавая увеличение  $\Gamma = 25^{\times}$ , получаем требуемое фокусное расстояние  $f' = 10$  мм. При удалении зрачка  $s' = 10$  мм находим тангенс и полевой угол:  $\operatorname{tg} \omega = 0,144$  и  $\omega = 8^{\circ}11'$ .

С учетом угла конвергенции полевой угол можно увеличить до  $15^{\circ}$ , что соответствует окулярному полю зрения в микроскопах.

## Верант-линзы

Верант-линза с увеличенным предметным расстоянием, превышающим ее фокусное расстояние, строится на основе использования двух силовых компонентов, разделенных значительным воздушным промежутком. Поэтому, рассматривая компоновку верант-линзы, в первую очередь следует установить зависимость между предметным расстоянием и фокусным расстоянием линзы.

Обозначая силы обоих компонентов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и расстояние между их главными плоскостями  $d$  (рис. 52), можно, используя закономерности для нулевых лучей (области параксиальной оптики), записать, что предметный отрезок

$$s' = h_2 / \alpha_3, \quad (535)$$

где  $h_2$  - высота апертурного луча на втором компоненте;  $\alpha_3$  - угол апертурного луча после второго компонента.



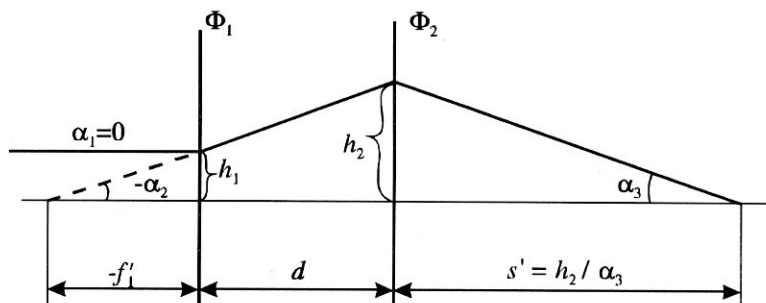


Рис.52. Нулевой апертурный луч (в обратном ходе) через компоненты верант-лупы

Высота  $h_2$  связывается с высотой  $h_1$  на первом компоненте и углом  $\alpha_2$  апертурного луча после второго компонента формулой

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d. \quad (536)$$

Апертурный угол  $\alpha_2$  определяется отношением высоты  $h_1$  на первом компоненте к его фокусному расстоянию:

$$\alpha_2 = h_1 / f'_1 = h_1 \Phi_1. \quad (537)$$

Апертурные углы  $\alpha_3$  и  $\alpha_2$  связаны формулой

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \Phi_2. \quad (538)$$

Используя формулы (536) - (538), для предметного отрезка  $s'$  получаем выражение

$$s' = \frac{h_1 - h_1 \Phi_1 d}{h_1 \Phi_1 + (h_1 - h_1 \Phi_1 d) \Phi_2} = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d}. \quad (539)$$

Знаменатель в правой части формулы (539) выражает оптическую силу  $\Phi$  всей системы в совокупности, вследствие чего эта формула значительно упрощается:

$$s' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi} = \left(1 - \frac{d}{f'_1}\right) f'. \quad (540)$$

Используя формулу (540), можно найти отношение  $k$  предметного расстояния  $s'$  к фокусному расстоянию  $f'$  всей системы:

$$k = \frac{s'}{f'} = 1 - \frac{d}{f_1'}, \quad (541)$$

откуда можно получить отношение расстояния  $d$  между компонентами к фокусному расстоянию  $f_1'$  первого компонента:

$$\frac{d}{f_1'} = 1 - k. \quad (542)$$

В формулу (542) не вошли значения оптической силы  $\Phi_2$  второго компонента и оптической силы  $\Phi$  всей системы, вследствие чего они остаются произвольными (однако  $\Phi_2$  и  $\Phi$  связаны друг с другом).

Численно, задавая значение коэффициента  $k = 2$  и равенством оптических сил первого и второго компонентов по абсолютному значению при различном их знаке, находим, что оптическая сила всей системы равна оптической силе второго компонента:

$$\Phi = -\Phi_1 = \Phi_2. \quad (543)$$

В качестве обоих силовых компонентов можно использовать зеркала. При этом зрачок входа всей системы может быть совмещен с первым зеркалом.

Имея в виду, что в последующем зеркала придется наклонять по отношению к исходной оптической оси для обеспечения разделения падающих и отраженных лучей в результате использования явления полного внутреннего отражения и преломления на одних и тех же поверхностях, можно заполнить пространство до и после обоих зеркал массой стекла. Тогда фокусное расстояние такой системы зеркал в стеклянной среде должно быть увеличено по отношению к фокусному расстоянию в воздухе в  $n$  раз, если воздушную среду и стекло будут разделять плоские поверхности.

Таким образом,

$$f'_{сТ} = n f'. \quad (544)$$

Учитывая формулу (544) и исходя из фокусного расстояния верант-лупы в воздухе  $f' = 50$  мм, что определяет ее увеличение  $\Gamma = 5^X$ , получаем исходный вариант системы со следующими конструктивными данными:

$$\begin{array}{lll}
 r_1 = \infty & d_1 = 30 & n_1 = 1 \\
 r_2 = 150 & d_2 = -75 & n_2 = 1,5163 \\
 r_3 = 150 & d_3 = 40 & n_3 = -1,5163 \\
 r_4 = \infty & & n_4 = 1,5163 \\
 & & n_5 = 1
 \end{array}$$

Фокусное расстояние этой системы и задний фокальный отрезок  $f' = 49,463$ ;  $s'_F = 72,545$ . Зрачок входа определяется положением апертурной диафрагмы на второй поверхности.

Задаваясь полевым углом  $\omega = 15^\circ$  и высотой на первой поверхности  $h_1 = 4,95$ , что соответствует относительному отверстию 1:5, были определены aberrации при сохранении центрированности системы.

Результаты расчета сферической aberrации (продольной  $\Delta s'$  и поперечной  $\delta g'$ ), а также астигматизма ( $z_r$ ,  $z_s$ ) и дисторсии  $\Delta$ :

$h$	$\Delta s'$	$\delta g'$
4,95	- 0,179	- 0,018
3,50	- 0,084	- 0,006

$\omega$	$z_r$	$z_s$	$\Delta, \%$	$y'_{ГЛ}$
- 15°	0,005	0,000	- 3,407	12,80
- 10°	0,001	0,000	- 1,519	8,59

Полученные aberrации рассматриваемой системы настолько малы, что полностью удовлетворяют требованиям работы верант-лупы с видимым увеличением  $\Gamma = 5^X$ . Однако для практического осуществления подобной лупы, как отмечалось ранее, необходимо наклонить оба силовых зеркала, в результате чего возникают нецентрированные aberrации - продольный и наклонный астигматизмы и кома.

Вывод формул для определения продольного и наклонного астигматизмов для системы верант-лупы усложняется из-за значительного расстояния между обоими наклонными зеркалами. Поэтому более целесообразно перейти к численному определению астигматизма, когда обоим зеркалам придаются одинаковые наклоны или одинаково смещаются их центры кривизны.

В предлагаемом исходном варианте верант-лупы оба радиуса силовых поверхностей равны; предполагается также, что и наклоны обоих зеркал к ходу центрального луча между ними - одинаковы.

Учитывая, что первая и последняя преломляющие поверхности плоские, для лучшего представления о работе силовых зеркальных поверхностей можно рассматривать их в виде центрированной системы из двух сферических поверхностей. В таком случае ход центрального главного луча

между обеими поверхностями параллелен оси системы, и углы главного луча с осью перед первой и после второй поверхностями будут одинаковы и равны удвоенному углу наклона обоих зеркал.

В соответствии с этими соображениями конструктивные данные двухзеркальной системы могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{array}{lll} r_1 = 150 & d = -75 & n_1 = 1 \\ r_2 = 150 & & n_2 = -1 \\ & & n_3 = 1. \end{array}$$

Полагая углы наклона зеркал  $\vartheta = 8^\circ$ , можно определить положение входного зрачка, т.е. точки пересечения центрального главного луча с осью системы:  $s_p = 75$ .

Схема подобной двухзеркальной системы показана на рис. 53.

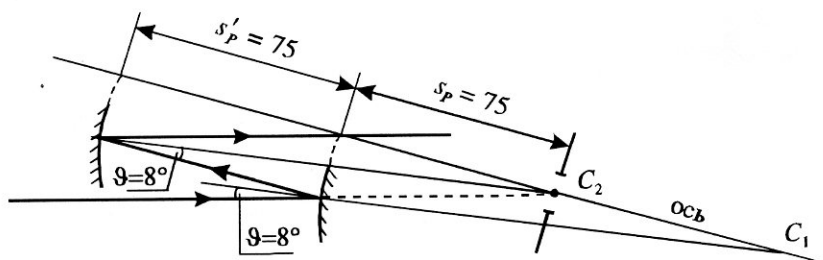


Рис. 53. Двухзеркальная система из равнонаклоненных зеркал с одинаковыми радиусами кривизны

Два других главных луча (на рисунке не показаны), определяющих поле зрения относительно центрального главного луча, должны пересекаться с ним в точке, где центральный луч встречается с первой поверхностью, образуя углы с осью системы  $24^\circ$  и  $8^\circ$ .

Точки пересечения двух других лучей с осью не должны совпадать с точкой, в которой ось пересекал центральный главный луч. Таким образом, для двух главных лучей получаем другие значения отрезков  $s_p$ : для угла  $\omega = 24^\circ$   $s_p = 48,833$ ; для  $\omega = 8^\circ$  —  $s_p = 151,474$ .

Исходя из этих данных, были определены астигматизм ( $z_t$ ,  $z_s$ ) и дисторсия  $\Delta$  для всех трех главных лучей. Результаты вычислений:

$\omega$	$s_p$	$s'_p$	$z_t$	$z_s$	$\Delta, \%$	$y'_{г л}$
$-24^\circ$	48,833	37,459	-10,523	-3,677	-3,719	32,150
$-16^\circ$	75,000	74,978	-6,491	-2,234	1,073	21,737
$-8^\circ$	151,474	112,449	-2,164	-0,745	3,068	10,864

Значения  $z_t$  и  $z_s$  для центрального главного луча определяют продольный астигматизм. Исключая их из значений астигматизма для других углов, получаем значения наклонного астигматизма:

$$\text{для } \omega = 24^\circ \quad z_t = -4,032; \quad z_s = -1,438;$$

$$\text{для } \omega = 8^\circ \quad z_t = 4,327; \quad z_s = 1,489.$$

В дальнейшем продольный астигматизм может быть устранен при помощи введения в систему коррекционной зеркальной поверхности большого радиуса кривизны при достаточном ее наклоне к ходу центрального главного луча. Неисправленный наклонный астигматизм при переходе через выходную плоскую поверхность будет уменьшаться в  $n$  раз, не превосходя численно  $\pm 2$  мм.

Имея в виду, что при фокусном расстоянии  $f' = 50$  мм одной диоптрии соответствует дефокусировка, равная 2,5 мм, получаем значение остаточного наклонного астигматизма не более  $\pm 0,8$  дптр, что вполне допустимо.

Входную и выходную плоскости верант-лупы удобно сделать перпендикулярными ходу центрального главного луча; они будут параллельны, и передняя плоскость не внесет никаких aberrаций, кроме дисторсии и хроматизма увеличения. При этом выходные полевые углы по отношению к ходу центрального главного луча составят в стекле  $\pm 8^\circ$ , в воздушной среде - соответственно  $\pm 12^\circ 11'$ . Выходная плоская поверхность для центрального главного луча также не внесет астигматизма.

Для определения габаритных размеров верант-лупы следует найти высоту лучей на силовых зеркальных поверхностях. Наибольшее расхождение высот главных лучей на втором зеркале в первом приближении будет равно удвоенному произведению тангенса полевого угла  $\omega = 8^\circ$  и расстояния между зеркалами  $d = 75$  мм. Таким образом, разность высот главных лучей на втором зеркале равна 21 мм. Поэтому, увеличивая на этом зеркале высоту отверстия до 30-35 мм, можно обеспечить прохождение наклонных пучков.

Исходя из выбранного угла наклона обоих зеркал  $\omega = 8^\circ$ , можно собрать конструктивную схему верант-лупы, показанную на рис. 54, а. Из этой схемы видно, что верант-лупа будет обладать перископичностью,

определяемой расстоянием между силовыми зеркалами, т.е. равной 75 мм. Подобная перископичность нежелательна, однако ее можно устранить при введении двух дополнительных параллельных плоских зеркальных поверхностей, как показано на рис. 54, б.

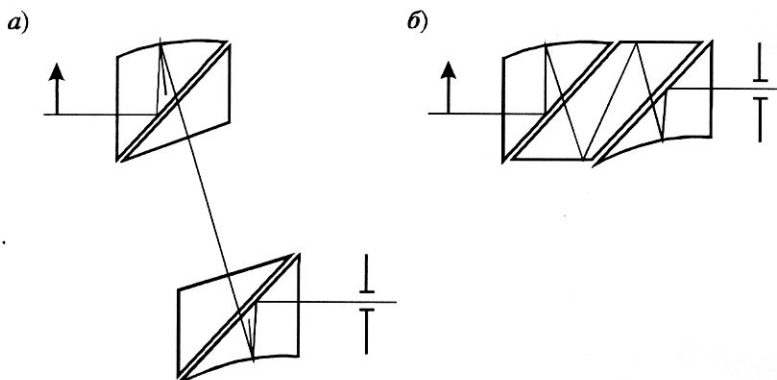


Рис. 54. Схема верант-лупы с перископичностью (а) и без нее (б)

Заметим, что для развития поля зрения верант-лупы в горизонтальном направлении до  $2\omega = 40...45^\circ$  требуется увеличить ширину отверстия на втором силовом зеркале до 60 мм. Это позволяет разместить параллельно две верант-лупы и получить возможность бинокулярного наблюдения. Однако при этом необходимо визирные оси обеих верант-луп сделать с некоторым углом конвергенции, определяемым отношением половины глазного базиса к предметному расстоянию, т.е. не параллельными.

В приведенном примере предметное расстояние вдвое меньше расстояния наилучшего зрения, поэтому угол конвергенции получится вдвое больше угла конвергенции глаз наблюдателя при рассматривании близко расположенных предметов. Такое увеличение угла конвергенции нежелательно, но его можно избежать, вводя соответственные углы наклона входных плоских поверхностей в направлении глазного базиса. Таким образом, создание бинокулярной верант-лупы является реальным.

За основу рассмотренной верант-лупы была принята система из двух одинаковых и под одним углом наклоненных зеркал с равными радиусами, которые предопределяли устранение кривизны поля и небольшую центрированную сферическую аберрацию. Эта система не является единственной, возможны и другие исходные схемы.

Особый интерес представляет пара концентричных силовых зеркал, так как при соответственном соотношении радиусов кривизны она свободна от астигматизма, комы и сферической аберрации при весьма значительных относительных отверстиях, доходящих до 1:1 и более.

Для подтверждения сказанного приведем следующие конструктивные данные системы из пары концентричных зеркал:

$$\begin{array}{lll} r_1 = 97,6 & d = -152,66 & n_1 = 1 \\ r_2 = 250,26 & & n_2 = -1 \\ & & n_3 = 1 \end{array}$$

Фокусное расстояние этой системы  $f' = 80$  мм, а задний фокальный отрезок - расстояние от второго зеркала до изображения -  $s'_F = 330,26$ . Однако этот отрезок нельзя рассматривать как рабочее предметное расстояние верант-лупы, так как физически первое зеркало размещается между вторым зеркалом и изображением. Поэтому в качестве предметного расстояния следует принимать сумму первого радиуса и фокусного расстояния лупы, которая будет равна 177,6 мм. Заметим, что и это предметное расстояние превосходит фокусное расстояние верант-лупы в 2,22 раза.

При относительном отверстии 1:1 система из пары концентричных зеркал обладает незначительной сферической аберрацией, численные значения которой следующие:

$h$	$\Delta s'$	$\delta g'$
40,00	0,014	0,008
28,28	-0,029	-0,011
20,00	-0,023	-0,006

В этой системе входной зрачок имеет вид кольца шириной 20 мм. Кома, астигматизм и дисторсия для положения зрачка, совмещенного с центром обеих поверхностей, строго отсутствуют. Однако на практике такое положение зрачка неосуществимо.

Действительно, для обеспечения необходимого расположения глаз наблюдателя зрачок входа системы зеркал следует вынести за пределы расположения второго зеркала. Так, при расположении зрачка входа на расстоянии  $s_p = -170$  мм (что больше расстояния между зеркалами), получаем значение астигматизма, которое не равно нулю.

Численно, задавая полевой угол  $\omega = 10^\circ$ , получаем при  $s_p = -170$  мм следующие значения астигматизма:  $z_l = -0,502$  и  $z_s = -1,120$  или в диоптрийной мере  $L_l = 0,078$  и  $L_s = 0,175$ . Эти значения астигматизма практически неощутимы наблюдателем.

Как уже отмечалось, кривизна поля системы из концентрических зеркал неустранима, и радиус кривизны поверхности изображения равен фокусному расстоянию системы.

Следует обратить внимание, что диаметр зрачка рассматриваемой системы зеркал равен 80 мм. Это превосходит расстояние между зрачками глаз наблюдателя и тем самым дает возможность бинокулярного стереоскопического наблюдения.

Высокое качество изображения такой системы концентричных зеркал позволяет переходить к меньшим фокусным расстояниям, а следовательно, к большим видимым увеличениям. Однако, уменьшая фокусное расстояние вдвое, т.е. задавая  $f' = 40$  мм и повышая таким образом видимое увеличение до  $\Gamma = 6,25^X$ , уменьшаем диаметр зрачка до 40 мм; он становится меньше расстояния между глазами наблюдателя. Очевидно, что в этом случае бинокулярное наблюдение невозможно. Кроме того, соответственно вдвое уменьшится и рабочее расстояние.

Таким образом, непосредственное повышение увеличения в двухзеркальной концентричной системе нельзя признать перспективным. Можно предложить другое направление повышения видимого увеличения, заключающееся в сочетании двухзеркальной концентричной системы с расположенной после нее телескопической.

Общее видимое увеличение подобной составной системы будет определяться произведением видимых увеличений  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  обеих составляющих систем. Таким образом,

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2. \quad (545)$$

Численно, задавая  $\Gamma_1 = 3,125^X$  и  $\Gamma_2 = 8^X$ , получаем общее увеличение  $\Gamma = 25^X$ , и тогда фокусное расстояние всей системы в совокупности  $f' = 10$  мм.

Полагая диаметр выходного зрачка всей системы 2 мм, находим, что диаметр зрачка входа для второй системы составит 16 мм. Сопоставляя зрачок второй телескопической системы с кольцевым зрачком первой двухзеркальной концентричной системы, видим, что в кольцевом зрачке может быть свободно размещено несколько входных зрачков второй системы - например, восемь или даже 10 зрачков (рис. 55).



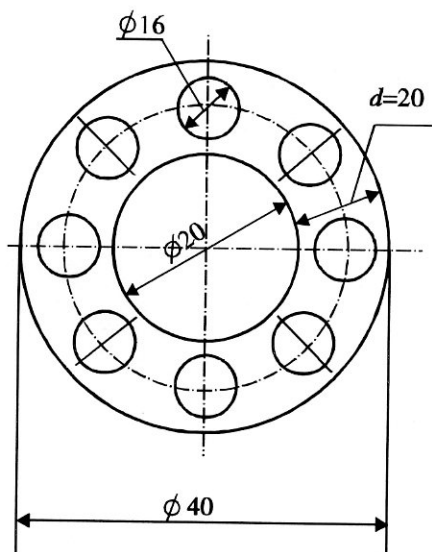


Рис. 55. Размещение зрачков телескопических систем в кольцевом зрачке двухзеркальной концентричной системы

Группируя попарно телескопические системы и обеспечивая при этом наблюдение двумя глазами, создаем возможность для одновременной работы четырех или пяти наблюдателей.

Заметим, что в эти телескопические системы можно вводить конструктивные узлы смены увеличений. Следует также отметить, что в рассматриваемой конструктивной схеме сохраняется неизменным большое предметное расстояние передней системы зеркал. Это обстоятельство позволяет рекомендовать приведенную систему как операционный микроскоп для нескольких наблюдателей.

Принципиальная схема операционного микроскопа показана на рис. 56.

Пара концентричных зеркал и последующие телескопические системы являются системами центрированными. Однако общий центр зеркальной системы не располагается на оси последующей телескопической системы, и поэтому система в совокупности является нецентрированной.

Существование параллельного хода лучей между передней зеркальной и последующей телескопической системой допускает покачивание телескопической системы без нарушения общей фокусировки, поэтому в известных пределах можно расширить поле обзора без увеличения поля зрения телескопической системы.

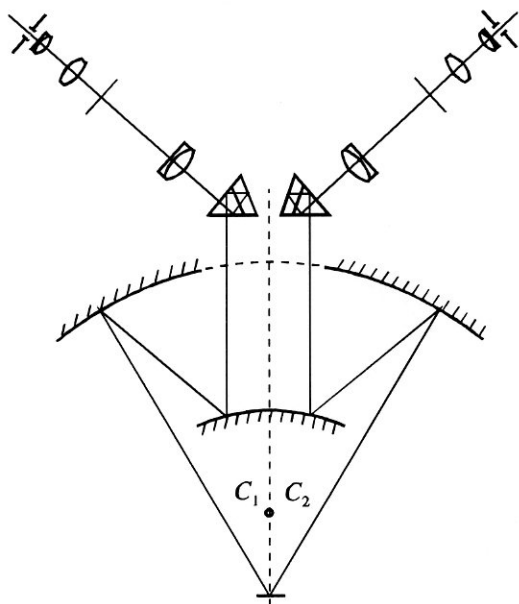


Рис. 56. Принципиальная схема операционного микроскопа

Для использования на практике удобны телескопические системы кеплеровского типа, состоящие из объектива и положительного окуляра; однако при этом возникает оборачивание изображения. Для устранения оборачивания перед телескопической системой в ее входном зрачке можно разместить оборачивающую призму с крышей и нечетным числом отражений. Покачивая такие призмы при неподвижном расположении самих телескопических систем, можно увеличивать поле обзора.

Заметим, что общую фокусировку для всех наблюдателей можно выполнять за счет подвижки пары концентричных зеркал при сохранении положения всех телескопических систем.

## Экранная лупа

Как уже рассматривалось, при использовании луп со средними увеличениями для бинокулярного стереоскопического наблюдения прибегали к размещению после лупы пары ромбических призм, позволявших разделить и разнести части выходного зрачка лупы на расстояние, равное главному базису.

Однако такие ромбические призмы размещаются в пространстве перед выходным зрачком, в результате чего глаза наблюдателя будут расположены близко к этим призмам.

Вместе с тем разделение выходного зрачка можно выполнить иначе. Так, получая изображение после лупы на конечном расстоянии (аналогично работе проекционного объектива), можно рассматривать его невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения при условии, что выходной зрачок (выходные зрачки) системы будет совмещен со зрачком глаза; это выполнимо с помощью линзы-коллектива, расположенной вблизи наблюдаемого изображения.

Отметим, что изготовление такой преломляющей линзы-коллектива связано с большими трудностями, обусловленными значениями радиусов кривизны, которые получаются одного и того же порядка по отношению к размеру изображения. Однако, их можно избежать, применяя в качестве коллективной линзы отражательную поверхность - зеркальный коллектив из сферопризм.

Разделение выходного зрачка можно осуществить еще до коллективной системы - непосредственно после основной лупы, тогда положение наблюдателя становится более свободным, ограничиваемым в поперечном направлении размерами выходных зрачков, а в продольном направлении - потерей части поля зрения по краям изображения.

Принципиальная схема экранной лупы показана на рис. 57. Она состоит из лупы-объектива, разделительных ромбических призм и коллективной системы, совмещенной с изображением.

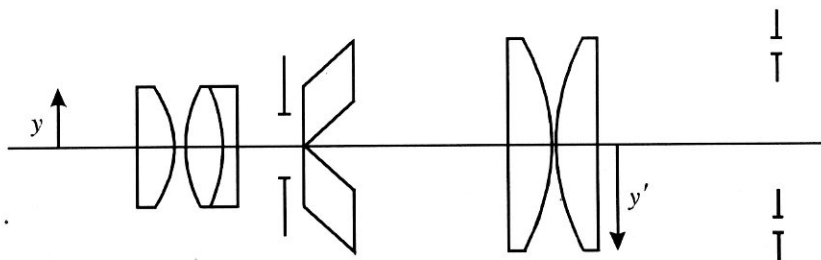


Рис. 57. Экранная лупа

Однако в такой схеме после объектива происходит оборачивание изображения, а после коллектива - переброска визирных линий справа налево. Во избежание этого ромбические призмы следует заменить соответствующей оборачивающей системой призм, которая одновременно

с оборачиванием изображения осуществляет и переброс визирных линий справа налево, благодаря чему после всей системы получается прямое изображение и восстанавливается правильное расположение осей.

Таким образом, после лупы-объектива вместо ромбических призм может быть расположен специальный призмный блок, схема которого показана на рис. 58.

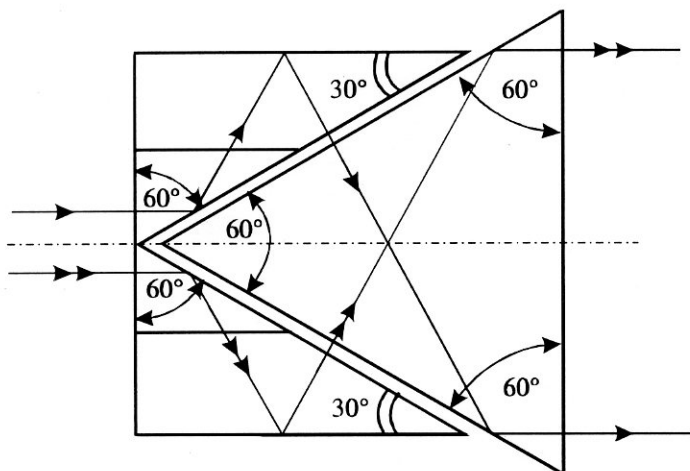


Рис. 58. Оборачивающий призмный блок

## Глава 8. Телескопические системы

### Окуляры

Общей особенностью окуляров как в телескопических системах, так и в микроскопах является необходимость совмещения выходного зрачка окуляра со входным зрачком глаза. В силу этого необходимо, чтобы выходной зрачок был достаточно удален от последней поверхности оптической системы. При этом его положение должно быть соизмеримо с фокусным расстоянием окуляра.

При использовании в окуляре в качестве силовой поверхности сферической отражающей поверхности совмещение с ней зрачка исключается.

Полагая, что при работе окуляра в обратном ходе лучей главные из них имеют телецентрический ход, зрачок окуляра будет совмещен с его передним фокусом. Совершенно очевидно, что это обстоятельство должно учитываться при анализе работы силовой отражательной поверхности окуляра.

Обратимся к инварианту наклонов меридионального изображения, выраженному формулой

$$\begin{aligned} & - \left[ 2\text{tg}\varepsilon + r \frac{(p-t)\text{tg}\psi_t + p\text{tg}\varepsilon \cos\varepsilon}{r \cos\varepsilon - p} \frac{\cos\varepsilon}{t} + \frac{\text{tg}\varepsilon}{r} = \right. \\ & = - \left[ 2\text{tg}\varepsilon' + r \frac{(p'-t')\text{tg}\psi'_t + p'\text{tg}\varepsilon' \cos\varepsilon'}{r \cos\varepsilon' - p'} \frac{\cos\varepsilon'}{t'} + \frac{\text{tg}\varepsilon'}{r} \right]. \end{aligned} \quad (545)$$

Предполагая, что предмет удален в бесконечность, т.е.  $t = \infty$ , получаем  $t' = t'_F$ . Считая, что зрачок выхода также удален в бесконечность, т.е.  $p' = \infty$ , формулу (545) для наклонов меридионального изображения можно преобразовать:

$$- \left[ 2\text{tg}\varepsilon' - r(\text{tg}\psi'_t + \text{tg}\varepsilon') \frac{\cos\varepsilon'}{t'_F} \right] \frac{\cos\varepsilon'}{t'_F} + \frac{\text{tg}\varepsilon'}{r} = \frac{\text{tg}\varepsilon}{r}. \quad (546)$$

Для отражательной поверхности согласно инварианту Гульстранда - Юнга

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_F} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r} \quad (547)$$

и, учитывая, что  $n' = -n$  и  $\varepsilon' = -\varepsilon$ , находим

$$\frac{\cos \varepsilon'}{t'_F} = \frac{2}{r}, \quad (548)$$

в результате чего формула (546) еще более упрощается:

$$- \left[ 2\text{tg}\varepsilon' - r(\text{tg}\psi'_t + \text{tg}\varepsilon') \frac{2}{r} \right] \frac{2}{r} + \frac{\text{tg}\varepsilon'}{r} = \frac{\text{tg}\varepsilon}{r}. \quad (549)$$

Далее

$$4\text{tg}\psi'_t = -2\text{tg}\varepsilon' \quad (550)$$

и окончательно

$$\operatorname{tg}\psi'_i = -\frac{\operatorname{tg}\varepsilon'}{2}. \quad (551)$$

На рис. 59 показан телецентрический ход главного луча, отраженного от наклоненной на угол  $\vartheta$  поверхности. Согласно данным рисунка, нетрудно установить равенство угла  $\vartheta$  с углом  $\varepsilon$ , составленным главным лучом с нормалью к поверхности. Отсюда следует, что тангенс угла наклона  $\psi'_i$  меридионального изображения равен половине тангенса угла наклона самой поверхности.

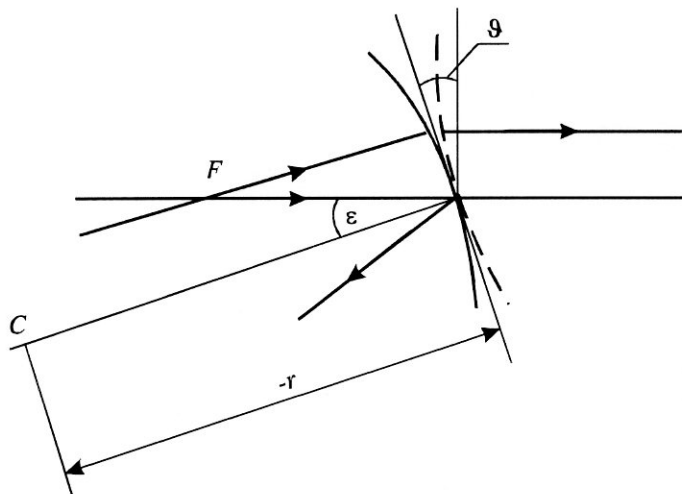


Рис. 59. Телецентрический ход главного луча

Напомним, что при совмещении зрачка с вершиной отрагательной поверхности было  $\psi'_i = \vartheta$ .

Обратимся к выражению инварианта наклонов сагиттального изображения:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{s'^2 \cos \varepsilon'} \frac{(p' - s') \operatorname{tg}\psi'_s + p' \operatorname{tg}\varepsilon'}{1 - \frac{p'}{r \cos \varepsilon'}} + \frac{\operatorname{tg}\varepsilon'}{r} = \\ & = -\frac{1}{s^2 \cos \varepsilon} \frac{(p - s) \operatorname{tg}\psi_s + p \operatorname{tg}\varepsilon}{1 - \frac{p}{r \cos \varepsilon}} + \frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{r}. \end{aligned} \quad (552)$$

При расположении предмета в бесконечности и для телецентрического хода главных лучей в пространстве изображений  $s = \infty$ ;  $p' = \infty$ ;  $s' = s'_F$ . Поэтому вместо формулы (552) получаем

$$\frac{4 \cos^2 \varepsilon'}{r} (\operatorname{tg} \psi'_s + \operatorname{tg} \varepsilon') + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{r} = \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{r}. \quad (553)$$

Согласно сагиттальному инварианту Гульстранда - Юнга

$$\frac{n'}{s'_F} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r}, \quad (554)$$

при отражении

$$\frac{1}{s'_F} = \frac{2 \cos \varepsilon'}{r}. \quad (555)$$

Используя эти формулы, выражение (553) можно преобразовать:

$$\operatorname{tg} \psi'_s = - \left( 1 + \frac{1}{2 \cos \varepsilon'} \right) \operatorname{tg} \varepsilon'. \quad (556)$$

Сопоставляя формулы (551) и (556) видим, что наклон сагиттального изображения примерно втрое превосходит наклон меридионального изображения и что оба наклона (в отличие от наклонов при совмещении зрачка с вершиной поверхности) имеют одинаковые знаки.

Таким образом, при телецентрическом ходе главных лучей возникает общий усредненный наклон изображения. Одновременно разность наклонов в меридиональной и в сагиттальной плоскостях - собственно наклонный астигматизм - приблизительно вдвое меньше по сравнению с астигматизмом при совмещении зрачка с вершиной поверхности.

Наличие общего усредненного наклона изображения по отношению к телецентрическому ходу главных лучей может быть учтено в результате соответственного изменения угла между центральными лучами стыкуемых оптических систем. Вместе с тем можно устранить усредненный угол наклона изображения посредством размещения вблизи изображения преломляющего клина определенной величины.

Рассмотрим работу преломляющего клина. На рис. 60 показан преломляющий клин с углом  $\alpha$  в вершине, совмещенный одной стороной с плоскостью изображения, наклоненной к телецентрическому ходу главных лучей на угол  $\beta$ .

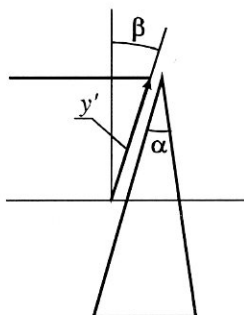


Рис. 60. Преломляющий клин

Учитывая, что углы  $\alpha$  и  $\beta$ , как правило, невелики, ограничимся выводом приближенной формулы для определения преломляющего угла клина  $\alpha$ .

При малом значении преломляющего угла  $\alpha$  угол отклонения луча

$$\beta = (n - 1)\alpha. \quad (557)$$

Полагая сторону клина равной  $a$ , можно определить основание клина:

$$d = a\alpha. \quad (558)$$

Толщина  $d$  вызовет смещение точки изображения на расстояние  $b$  - удлинение, определяемое формулой

$$b = d - d/n = (1 - 1/n)d. \quad (559)$$

Отношение отрезка  $b$  к стороне  $a$  выражает дополнительный угол наклона изображения

$$\Delta\beta = b/a = (1 - 1/n)\alpha. \quad (560)$$

Суммируя углы  $\beta$  и  $\Delta\beta$ , находим угол наклона изображения  $\psi'_k$ , вносимого преломляющим клином:

$$\psi'_k = (n - 1/n)\alpha. \quad (561)$$

## Перископы

Одной из первых разработанных нами нецентрированных оптических систем был перископ (см. рис. 47) с видимым увеличением, равным единице,



в качестве объектива и окуляра у которого использовались системы с силовыми сферическими зеркалами, наклоненными к оси перископа.

Одно из требований, предъявлявшихся к нему, - обеспечение возможно более близкого расположения входного и выходного зрачков к вертикальной оси перископа, что не могло быть реализовано при использовании обычных окуляров. Действительно, оси таких окуляров должны быть горизонтальными, и тогда расстояние между вертикальной осью и выходным зрачком получается больше их длины.

Отклонение осей объектива и окуляра при использовании обычных систем приходилось осуществлять с помощью прямоугольных призм или зеркал, наклоненных к вертикальной оси на угол  $45^\circ$ .

В зеркально-линзовом перископе и объектив, и окуляр строились на основе так называемых башмачных призм с двумя отражениями. При этом для одной из отражательных поверхностей угол нормали с направлением хода центрального луча составлял  $22^\circ 30'$ , а для другой -  $67^\circ 30'$ . Различные значения углов наклона позволяли для силовой поверхности выбирать меньший наклон, а для коррекционной - больший.

Сочетание силовой и коррекционной поверхностей позволяло устранять продольный астигматизм, однако исправления наклонного астигматизма не обеспечивалось. Применение в перископе линзовой оборачивающей системы препятствовало взаимной компенсации наклонного астигматизма объектива и окуляра, вследствие чего происходило суммирование наклонного астигматизма, который и оставался в системе перископа неисправленным.

Одна из особенностей такого перископа - наличие и в объективе, и в окуляре преломляющих клиньев, расположенных перед призмами с отражательными поверхностями. Эти клинья (при работе объектива или окуляра в отдельности) использовались для устранения хроматизма увеличения при преломлении центрального луча на наклонных поверхностях.

Однако в перископе с видимым увеличением, равным единице, хроматизм увеличения (в силу симметрии) взаимно компенсируется. Поэтому клинья могут быть исключены. Ход центрального луча до объектива и после окуляра будет одинаково отклонен (на одно и то же значение) относительно горизонтального направления. Эти углы отклонения можно устранить посредством соответственного изменения углов между отражательными поверхностями.

Таким образом, объектив и окуляр перископа могут быть выполнены в виде одной оптической детали. Существенно, что при этом угол наклона силовых отражательных поверхностей можно несколько уменьшить.

**Многопольный перископ.** Для сбора полезных морских водорослей, расположенных на небольшой глубине - порядка 1,5 - 2 м от уровня моря, возникла необходимость их близкого рассмотрения.

Учитывая, что дальность наблюдения в морской воде невелика, для лучшего обзора следует иметь достаточно большое поле зрения, составляющее примерно  $90^\circ$ . Для более быстрого распознавания сорта водорослей требуется увеличение не меньше единицы. Наблюдатель, расположенный на понтоне, должен рассматривать изображение через окуляр, следовательно, перископичность составляет 2-3 м.

Исходя из перечисленных условий работы, можно определить габаритные размеры перископа.

Угол обзора  $90^\circ$  и увеличение, близкое к единице, можно было обеспечить, используя в перископе широкоугольные окуляры и объективы, что, однако, привело бы к созданию оптической системы повышенной сложности. Поэтому более целесообразно разделить поле обзора на три сектора, в каждом из которых поле зрения составляет около  $30^\circ$ .

Такая схема перископа более конструктивна, но необходимо быстрое переключение от одного сектора обзора к другому. При использовании механического устройства переключения работа наблюдателя усложняется.

Вместе с тем переход от одного сектора обзора к другому возможен при переводе глаз наблюдателя от одного выходного зрачка к другому, принадлежащему уже к сектору наблюдения, близко расположенному к первому. Эту задачу можно было решить путем создания оптической системы с выходным зрачком большой протяженности, который мог быть разделен на три или большее число участков, имеющих свой сектор обзора.

Разделение выходного зрачка можно выполнить, размещая во входном зрачке перископа пару призм с двумя отражениями, отклоняющих боковые линии визирования от средней визирной линии. Нетрудно представить, что у такого устройства общий зрачок входа и выхода удобнее сделать в виде прямоугольника с отношением сторон три к одному. Кроме того, во избежание наложения изображения от двух соседних секторов, следует соседние части выходного зрачка разделять промежутком, близким по ширине диаметру зрачка глаза наблюдателя, т.е. равным 3-4 мм. Таким

образом, общий выходной зрачок в виде прямоугольника имеет стороны  $30 \times 10$  мм.

Осуществление выходного зрачка подобных размеров в линзовых окулярах практически нереально. Однако, применяя в качестве окуляра и объектива сферопризматические блоки, при сохранении относительного отверстия по длинной стороне зрачка около 1:3 - 1:4 получаем фокусные расстояния объектива и окуляра примерно 90 - 120 мм, что не представляет особых затруднений при расчете сферопризменных оптических систем.

В рассматриваемом трехпольном перископе должна использоваться оборачивающая система, свободное отверстие которой будет определяться формой выходного зрачка. При этом размеры свободного отверстия оборачивающей системы по сравнению с выходным зрачком должны быть увеличены пропорционально отношению расстояния от оборачивающей системы до плоскости изображения перед окуляром к его фокусному расстоянию.

Таким образом, свободное отверстие оборачивающей системы будет иметь прямоугольную форму, а размер длинной стороны отверстия 150 мм и более. Применение линзовой оборачивающей системы весьма затруднительно и неоправданно, так как большая часть отверстия не будет использоваться. Это обстоятельство и предопределяет выполнение оборачивающей системы в виде блока из пары сферопризм.

Заметим, что оборачивающая система из сферопризм будет обладать как продольным, так и наклонным астигматизмом, вследствие чего при правильной ориентировке оборачивающей системы появляется возможность компенсации наклонного астигматизма объектива и окуляра. Это не могло быть достигнуто при использовании линзовой оборачивающей системы, как в ранее рассмотренном перископе однократного увеличения.

Следует также отметить, что при ограничении сферопризм оборачивающей системы плоскими поверхностями возникает хроматизм положения, который легко устранить, если входная и выходная грани сферопризм будут выполнены в виде сферических конфокальных поверхностей.

Принципиальная оптическая схема трехпольного перископа показана на рис. 61, а его графики aberrаций - на рис. 62.

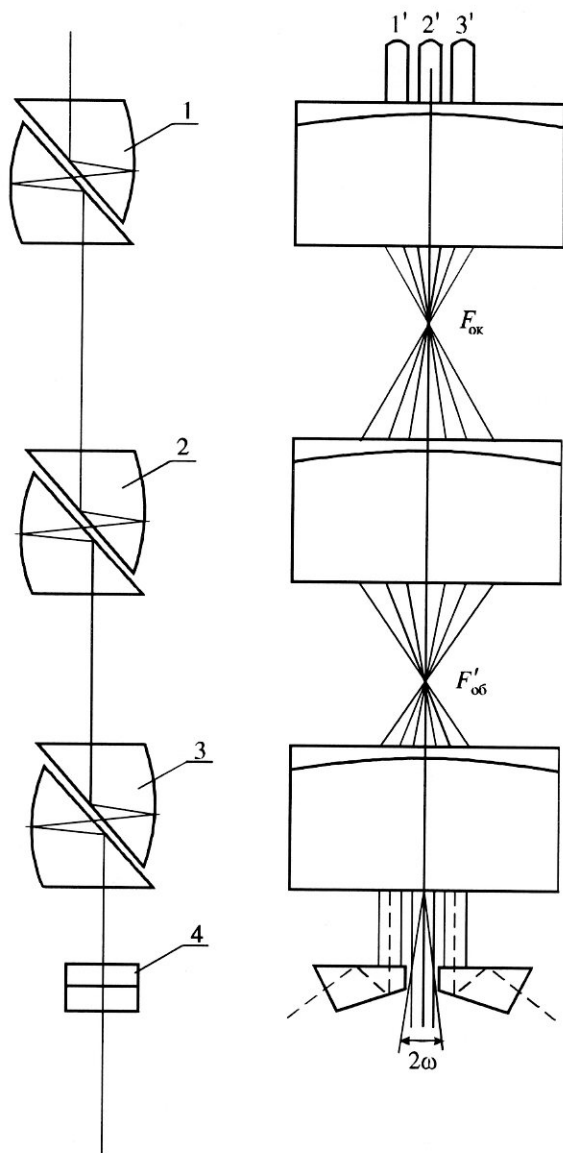


Рис. 61. Трехпольный нецентрированный перископ:  
 1 - окуляр; 2 - оборачивающая система; 3 - объектив;  
 4 - отклоняющие призмы; 1', 2', 3' - участки выходного зрачка

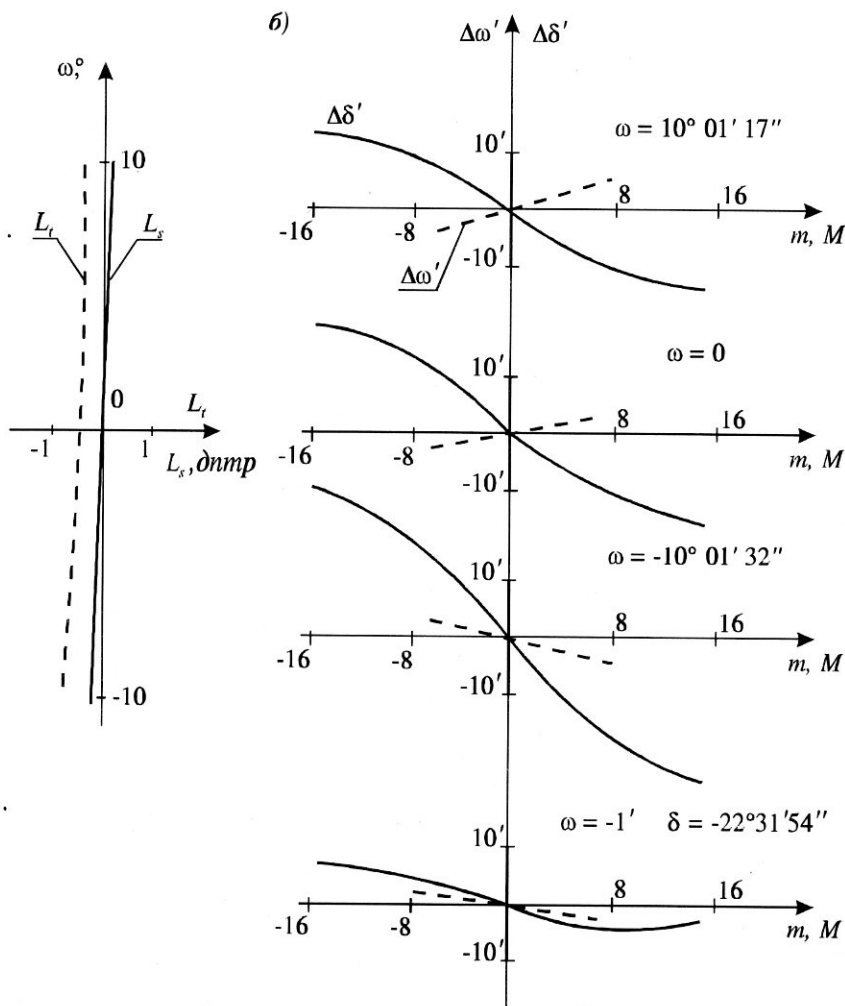


Рис. 62. Графики aberrаций трехпольного перископа:  
а - астигматизм; б - aberrации наклонных пучков

## Бинокли

Основными требованиями, предъявляемыми к биноклям, являются:

- получение заданного увеличения;
- достижение необходимого предметного поля зрения;
- обеспечение требуемой площади выходного зрачка.

При этом в отличие от обычных линзовых биноклей поле зрения нецентрированных биноклей в вертикальном направлении можно уменьшить по отношению к полю зрения в горизонтальном направлении.

Еще одним требованием, предъявляемым к биноклям, является необходимость получения минимальных габаритных размеров и массы. Кроме того, должны обеспечиваться изменение расстояния между выходными зрачками и перефокусировка системы. Общей особенностью биноклей, построенных на основе сферопризматических элементов, является придание прямоугольной формы его полю зрения, а также выходному и входному зрачкам.

Оборачивание изображения целесообразно выполнять при помощи системы оборачивающих призм. Следует отметить, что использование призмённых оборачивающих систем (в отличие от линзовых) позволяет взаимно компенсировать наклонный астигматизм объектива и окуляра.

Длина оптической системы кеплеровского типа при отсутствии линзовой оборачивающей системы определяется суммой фокусных расстояний объектива и окуляра. Поэтому в целях уменьшения габаритных размеров выгодно применять объективы и окуляры с большими относительными отверстиями.

В отличие от линзовых систем кеплеровского типа, в которых относительные отверстия объективов и окуляров не превосходят 1:5 - 1:6, при использовании в качестве объективов и окуляров сферопризмённых блоков их относительные отверстия можно увеличить до 1:3 - 1:4.

Рассмотрим конкретные оптические схемы нецентрированных биноклей кеплеровского типа. При этом простейшей будет схема, в которой для оборачивания изображения используется система призм Порро.

Рассматривая систему призм Порро второго рода с двумя прямоугольными призмами с одним отражением, замечаем, что эти две призмы создают отклонение визирной оси на угол  $90^\circ$ . Имея в виду, что сферопризмённые блоки объектива и окуляра также могут создавать углы отклонения  $90^\circ$ , их можно использовать вместо прямоугольных призм в системе Порро второго рода, что существенно упрощает всю оптическую схему бинокля. При этом значительно уменьшается длина оптической системы, обусловленная шириной зрачка входа в вертикальном направлении.

Однако объективный и окулярный блоки будут располагаться рядом, что затрудняет перефокусировку системы с помощью подвижки окуляра. Перефокусировку бинокля целесообразно осуществлять посредством перемещения прямоугольной призмы с двумя отражениями в вертикальном направлении.

Схема нецентрированного бинокля на основе призм Порро второго рода показана на рис. 63 в двух проекциях. Нетрудно заметить, что расстояние между объективом и окуляром будет определяться длиной хода луча в прямоугольной призме с двумя отражениями и удвоенным расстоянием между ее гипотенузной гранью и выходной гранью объективного узла (или входной гранью узла окуляра). От этого расстояния зависит габаритный размер системы в вертикальном направлении.

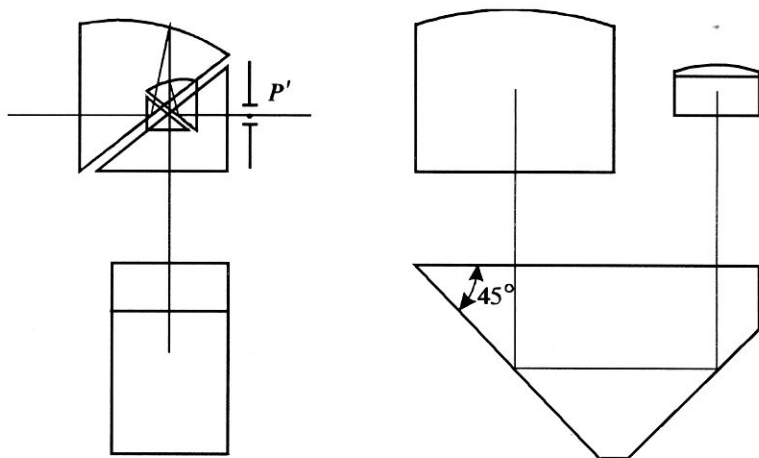


Рис. 63. Нецентрированный бинокль на основе системы призм Порро второго рода

Кроме того, большой воздушный промежуток между прямоугольной призмой с двумя отражениями и объективным и окулярным блоками привносит отрицательную сферическую aberrацию, которая, суммируясь с отрицательной сферической aberrацией силовой поверхности обектива, может оказаться неприемлемой. Поэтому целесообразно искусственно увеличивать длину хода луча в стекле между объективом и окуляром путем дополнительного конструктивного элемента, например, ромбической призмы с двумя отражениями.

Другим возможным средством увеличения длины хода луча является замена прямоугольной призмы с двумя отражениями прямоугольной призмой с четырьмя отражениями, углы которой между гипотенузой и кате-

тами равны  $30^\circ$  и  $60^\circ$ . Схема нецентрированного бинокля с такими призмами показана на рис. 64.

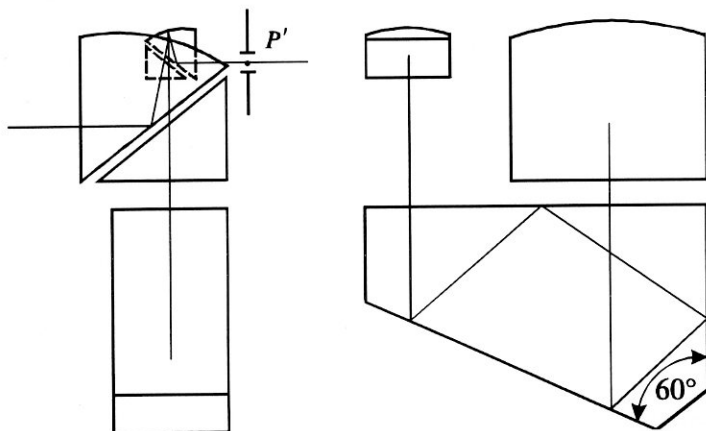


Рис. 64. Нецентрированный бинокль с прямоугольной призмой с четырьмя отражениями

Третьим средством увеличения длины хода луча является замена прямоугольной призмы с двумя отражениями пятигранной призмой с четырьмя отражениями, но со звездообразным ходом луча. Схема биноклей с подобной призмой в двух вариантах показана на рис. 65.

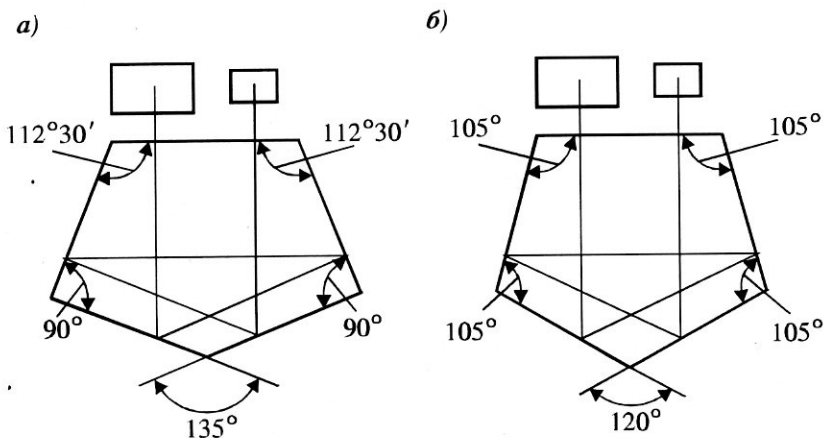


Рис. 65. Нецентрированный бинокль на основе пятигранных призм с четырьмя отражениями: а - углы призмы  $112^\circ30'$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$ ; б -  $105^\circ$ ,  $105^\circ$  и  $120^\circ$



В первом варианте (рис. 65, а) призма строится с углами между гранями, равными  $112^\circ 30'$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$ . Полагая размер входной грани равным  $2a$ , находим длину хода луча

$$d = (6 + 4\sqrt{2})a = 11,657a.$$

Высота призмы (расстояние от входной грани до вершины угла в  $135^\circ$ )

$$b = (1 + \sqrt{2})a = 2,414a.$$

Во втором варианте (рис. 65, б) углы призмы составляют  $105^\circ$ ,  $105^\circ$  и  $120^\circ$ . В этом случае длина хода луча

$$d = 2(2\sqrt{3} + 1)a = 8,928a,$$

и высота второй призмы

$$b = a\sqrt{3} = 1,732a.$$

Таким образом, во второй призме длина хода луча и ее высота получаются несколько меньше по сравнению с первой.

Использование пятигранных призм позволяет значительно понизить относительное отверстие объективной части бинокля - до 1:6 - 1:8. При небольших относительных отверстиях существенно облегчаются условия работы всей системы бинокля и уменьшается сферическая абберация, вносимая объективным и окулярным блоками. При этом также отпадает необходимость введения в объективный блок коррекционной наклонной поверхности, которую можно заменить небольшим воздушным клином.

В обеих пятигранных призмах ширина пучка лучей на входной грани была одинаковой и при входе, и при выходе. Тем самым обуславливалось равенство ширины отверстия объектива и изображения перед окуляром. Подобное соотношение характерно для оптической системы бинокля с видимым увеличением  $\Gamma = 5^X$ . Для больших увеличений оно нарушается, и тогда изображение перед окуляром уже не занимает всю половину входной грани. Однако, нарушая симметрию призмы, можно обеспечить ширину входной грани, которая будет равна сумме ширины отверстия объектива и ширины изображения перед окуляром.

Кроме рассмотренных схем биноклей с объективами и окулярами, выполненными в виде сферопризматических блоков, можно использовать такие, у которых наклонные сферические зеркала сочетаются с толстой

плоскопараллельной пластинкой. Это позволяет устранить сферическую aberrацию при больших относительных отверстиях - до 1:1 и выше.

Если объективный и окулярный блоки подобны и между ними создан телецентрический ход лучей, в телескопических системах полностью устраняется кома. Существенно, что при этом вследствие совмещения входного и выходного зрачков с передним фокусом объектива и с задним фокусом окуляра исправляется и астигматизм. Таким образом, можно получить центрированную телескопическую систему из двух сферических зеркал и плоскопараллельной пластинки между ними, обладающую большим диаметром входного и выходного зрачков, которая имеет хорошее качество изображения.

Однако в такой оптической системе сферические зеркала препятствуют разделению входящих и выходящих лучей. Тем не менее, ограничиваясь использованием лишь части входного зрачка, можно устранить части сферических зеркал, препятствующие ходу лучей, и тем самым сделать телескопическую систему реально осуществимой. Таким образом, в центрированной оптической системе будет нецентрированное расположение зрачков, что позволяет рассматривать ее как нецентрированную.

Обратимся к численному примеру. Создавая телескопическую систему с видимым увеличением  $\Gamma = 10^X$  и фокусным расстоянием объектива  $f' = 150$  мм, добавляем к сферическому зеркалу плоскопараллельную пластинку для исправления сферической aberrации.

Конструктивные данные объективной части системы:

$r_1 = -300$	$d_1 = -85$	$n_1 = 1$
$r_2 = \infty$	$d_2 = -97,5$	$n_2 = -1$
$r_3 = \infty$		$n_3 = -1,5163$
		$n_4 = -1$

Фокусное расстояние объективной части  $f' = -150$  и задний отрезок до плоскости изображения  $s'_F = -0,699$ . Сферическая aberrация при относительном отверстии 1:1 на краю отверстия  $\Delta s' = -0,011$  и на зоне (при  $h = 0,707h_{кр}$ ) -  $\Delta s' = 0,034$ . Астигматизм для полевого угла  $\omega = 2^\circ$  составляет  $z_t = -0,023$  и  $z_s = -0,069$ .

Далее можно образовать телескопическую систему со следующими конструктивными данными:

$$\begin{array}{lll}
 r_1 = -300 & d_1 = -90 & n_1 = 1 \\
 r_2 = \infty & d_2 = -107,25 & n_2 = -1 \\
 r_3 = \infty & d_3 = -4,27 & n_3 = -1,5163 \\
 r_4 = 30 & & n_4 = -1 \\
 & & n_5 = 1
 \end{array}$$

Такая система будет иметь зрачок входа диаметром 150 мм; при этом сферическая aberrация в угловой мере соответственно для края и средней части отверстия составляет  $1'22''$  и  $-3'04''$ . Астигматизм для полевого угла  $\omega = 2^\circ$  составляет  $L_t = -1,159$  дптр и  $L_s = -3,284$  дптр.

Задавая смещение центра входного зрачка на 50 мм (что позволяет свободно разместить на площади входного зрачка диаметром 150 мм прямоугольный зрачок размером  $40 \times 20$  мм), можно проследить изменение астигматической разности  $L_t - L_s$  при изменении угла  $\omega$  от  $2^\circ$  до  $-2^\circ$ .

Результаты расчета астигматизма следующие:

$\omega$	$\omega'$	$L_t$	$L_s$	$L_t - L_s$
$2^\circ$	$20^\circ 21' 42''$	-0,998	-3,265	2,267
$1^\circ$	$10^\circ 02' 37''$	-0,040	-0,686	0,646
$-1^\circ$	$-9^\circ 58' 48''$	-0,154	-0,674	0,520
$-2^\circ$	$-19^\circ 42' 55''$	-1,057	-3,079	2,022

Схема такой телескопической системы показана на рис. 66. Входящие и выходящие лучи в ней разделены, однако ее применение практически невозможно вследствие недопустимости совмещения зрачка глаза наблюдателя с выходным зрачком системы. Это препятствие можно легко устранить, если часть толщины плоскопараллельной пластинки использовать для образования разделительных призм. Примечательно, что элементы разделительных призм могут быть сделаны в виде прямоугольных призм. Остальную часть плоскопараллельной пластинки можно выполнить в виде крышеобразной призмы, обеспечивающей необходимое оборачивание изображения.

Ранее было показано, что монохроматические aberrации рассматриваемой системы достаточно малы. Однако хроматизм положения, создаваемый ходом луча в плоскопараллельной пластинке, достигает примерно 0,3 мм, что при фокусном расстоянии окуляра 15 мм превосходит значение одной диоптрии и будет весьма ощутимо.

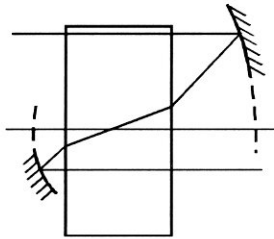


Рис. 66. Телескопическая система

В угловой мере возникающий хроматизм составит около  $30'$ . Поскольку в прямоугольном участке зрачка он может рассматриваться как хроматизм увеличения для центрального луча, его можно устранить за счет хроматизма дополнительного преломляющего клина, не воздействующего на монохроматические аберрации (за исключением дисторсии).

Конструктивно подобный коррекционный клин может быть осуществлен за счет изменения угла входной грани первой призмы, расположенной перед сферическим зеркалом.

## Проекционные и фотографические объективы

Условия работы проекционных и фотографических объективов и визуальных оптических систем существенно отличаются. Во-первых, в визуальных системах, как правило, допускается кривизна поля зрения, компенсируемая в известных пределах аккомодацией глаза наблюдателя, и, во-вторых, детальное рассмотрение изображения осуществляется в ограниченной центральной части поля зрения.

В отличие от визуальных оптических систем основными требованиями, предъявляемыми к проекционным и фотографическим объективам, являются исправление кривизны поля и обеспечение более или менее хорошего исправления аберраций по всему полю зрения.

Исправление кривизны поля зрения, связанное с выполнением условия Петцваля, при использовании линзовых конструктивных элементов, обладающих положительной оптической силой и создающих значительную отрицательную кривизну поля, является одной из главнейших трудностей при разработке проекционных и фотографических объективов.

Напомним, что в начальной стадии при разработке фотографических объективов исправление отрицательной кривизны поля в ряде случаев (портретный объектив Петцваля, апланаты) не обеспечивалось.

Использование в качестве силовых конструктивных узлов в фотографических объективах сферических отражательных поверхностей сразу

предопределяет возникновение положительной кривизны поля, которая в сочетании с отрицательным астигматизмом, присущим тонким силовым элементам, позволяет исправлять усредненную кривизну поля. Кроме того, применение силовых отражательных поверхностей легко позволяет получить незначительную продольную сферическую aberrацию.

Учитывая указанные свойства отражательных силовых поверхностей, можно при соответственном ограничении поля зрения и относительного отверстия использовать в качестве проекционного объектива оптическую схему из двух сферопризменных блоков, аналогичную лупе для слабовидящих, рассмотренную ранее.

Одной из особенностей проекционного объектива из сферопризменных блоков является расположение входного и выходного зрачков, вынесенных за пределы объектива. Такое удаление, помимо улучшения коррекции полевых aberrаций, интересно еще и тем, что для соблюдения расположения источника света по Келлеру - в плоскости зрачка - можно обойтись без применения конденсора-осветителя, так как зрачок вынесен за предметную плоскость.

Схема проекционного объектива из сферопризменных блоков (в обратном ходе лучей) показана на рис. 67. В изготовленном варианте объектива фокусное расстояние было равно 80 мм. При увеличении объектива  $V = -10^X$  расстояние до предметной плоскости составило  $s = 32,3$  мм, а зрачок входа был удален на расстояние  $s_p = 105$  мм.

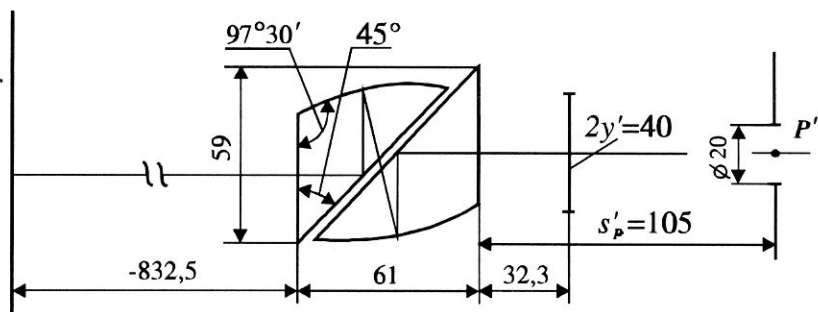


Рис. 67. Проекционный объектив из сферопризменных блоков (в обратном ходе лучей)

**Объектив “Руссар-моно” (колобашка).** Рассмотренный проекционный объектив был получен на основе лупы для слабовидящих без каких-либо дополнительных элементов, обеспечивающих необходимое

качество изображения. Поэтому возникает вопрос о композиции объектива, предусматривающей средства для исправления тех или иных aberrаций.

Начиная с композиции простейшей оптической системы с использованием в качестве силовых элементов сферических зеркальных поверхностей, можно сразу остановиться на паре зеркал с равными по абсолютному значению оптическими силами, но отличающимися по знаку. Такие значения оптических сил согласно условию Петцваля гарантируют устранение кривизны поля при отсутствии астигматизма. Расстояние между зеркалами обуславливает оптическую силу системы. Расположение входного зрачка, влияя на изменение астигматизма, позволяет его исправить.

Наличие только двух сферических поверхностей равнозначно центрированности системы, что дает возможность определять ее aberrации по обычным формулам для центрированных оптических систем.

Задаваясь расстоянием между обоими зеркалами, равным фокусным расстояниям, находим, что при совмещении зрачка входа с передней поверхностью системы, обладающей отрицательной оптической силой, астигматизм устраняется. Кроме того, в этом случае после второго зеркала, передний фокус которого совмещается с вершиной первого зеркала и центром зрачка входа, образуется телецентрический ход главных лучей.

Обращаясь к схематическому расположению обоих зеркал (рис. 68), видим, что доступ осевого пучка лучей к первому зеркалу может быть закрыт вторым. Однако, срезая часть второго зеркала, можно открыть доступ к первому лучей наклонного пучка, которые после отражения от второго зеркала беспрепятственно доходят до плоскости изображения. Очевидно, в этом случае будет нарушена центрированность хода лучей.

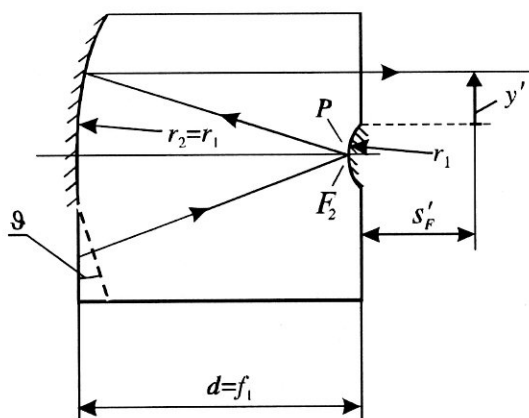


Рис. 68. Двухзеркальная система с телецентрическим ходом главных лучей в пространстве изображений