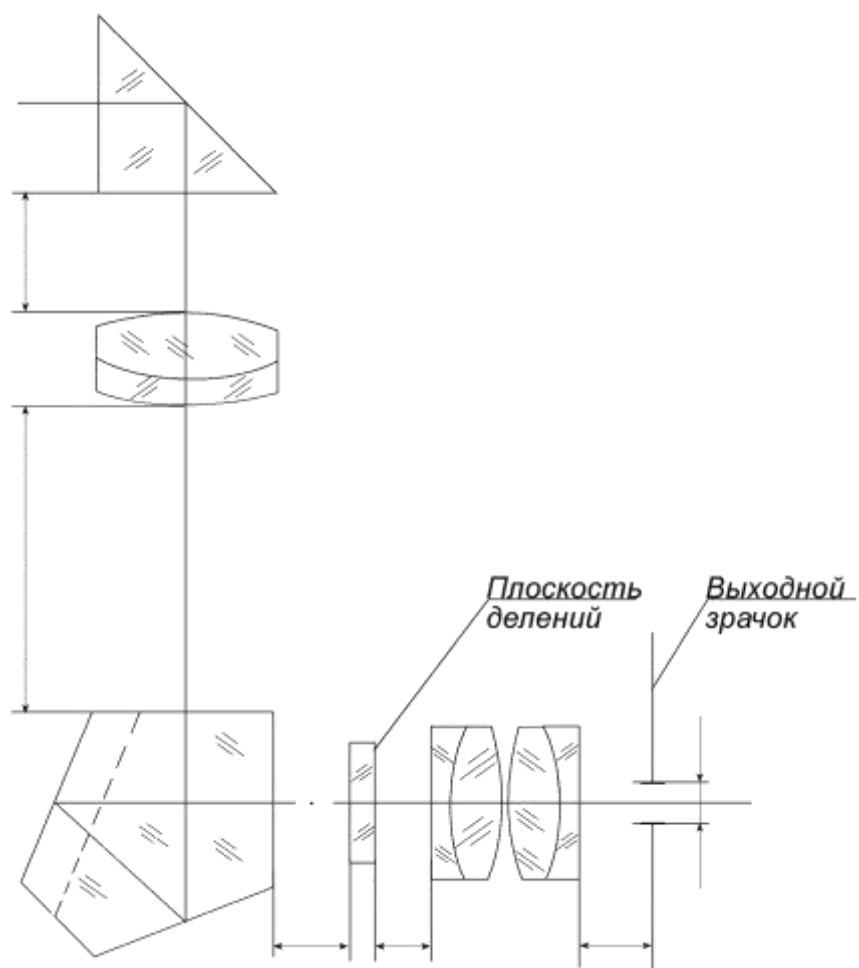


Г.И. Цуканова, Г.В. Карпова, О.В. Багдасарова

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ЧАСТЬ II

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В.

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ЧАСТЬ II

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В.

Прикладная оптика. Часть 2. Учебно-методическое пособие, второе издание, измененное и дополненное. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 83 с.

В учебно-методическом пособии приводятся краткие теоретические сведения, варианты индивидуальных заданий, указания по выполнению 3 лабораторных работ на компьютерах по курсу «Прикладная оптика».

Для студентов направления подготовки 12.03.02 – Опотехника (бакалавры).

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и опотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 12.03.02– «Опотехника».

Рецензент: д.т.н., проф. Коняхин И.А., кафедра Оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики, протокол № 10 от 27 июля 2014 г.

Одобрено на заседании факультета оптико-информационных систем и технологий, протокол № 9 от 9 сентября 2014 г.



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

© Университет ИТМО, 2014

© Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., 2014

Введение

Пособие охватывает следующие разделы курса «Прикладная оптика»: «Оптические системы микроскопа», «Простые телескопические системы», «Сложные зрительные трубы».

В пособии даются краткие теоретические положения, указания по выполнению работ на компьютерах, варианты индивидуальных заданий, требования по оформлению работ, контрольные вопросы. Для всех работ приведены примеры выполнения отчетов.

Работа №1

«Микроскоп (визуальная часть)»

Цель работы: Приобретение практических навыков габаритного и абберационного расчетов наблюдательной части микроскопа.

1. Задание для работы

1.1. Исходя из заданных характеристик визуальной части микроскопа необходимо выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний микроскопа, объектива, окуляра, а также (если потребуются) тубусной линзы, расстояний между главными плоскостями компонентов, числовой апертуры объектива, размеров и положения апертурной диафрагмы и выходного зрачка, определение размера полевой диафрагмы, линейного поля микроскопа, разрешающей способности и глубины резко изображаемого пространства.

1.2. По полученным данным подобрать объектив, окуляр, тубусную линзу из каталогов или из библиотеки оптических систем программы “ОПАЛ”.

1.3. Составить оптическую систему визуальной части микроскопа и определить расстояния между компонентами.

1.4. Выполнить построение хода апертурного, главного и двух наклонных лучей.

1.5. Определить aberrации наблюдательной части микроскопа.

2. Краткая теория

Микроскоп предназначен для наблюдения и измерения мельчайших предметов или их деталей, неразличимых невооруженным глазом.

Микроскопы различных назначений состоят из следующих оптических частей:

- осветительной системы,
- визуальной, фотографической или проекционной.

Все объекты исследования под микроскопом можно разбить на две группы:

- прозрачные,
- непрозрачные.

Микроскопы для проходящего света применяются при работе с прозрачными объектами, а микроскопы для отраженного света – с непрозрачными объектами.

Осветительная система должна создать интенсивное и равномерное освещение всего поля микроскопа. Она состоит из (рисунок 1.1.):

1. источника света;
2. коллектора (осветительной линзы);
3. расположенной около коллектора ирисовой диафрагмы, служащей полевой диафрагмой;
4. конденсора.

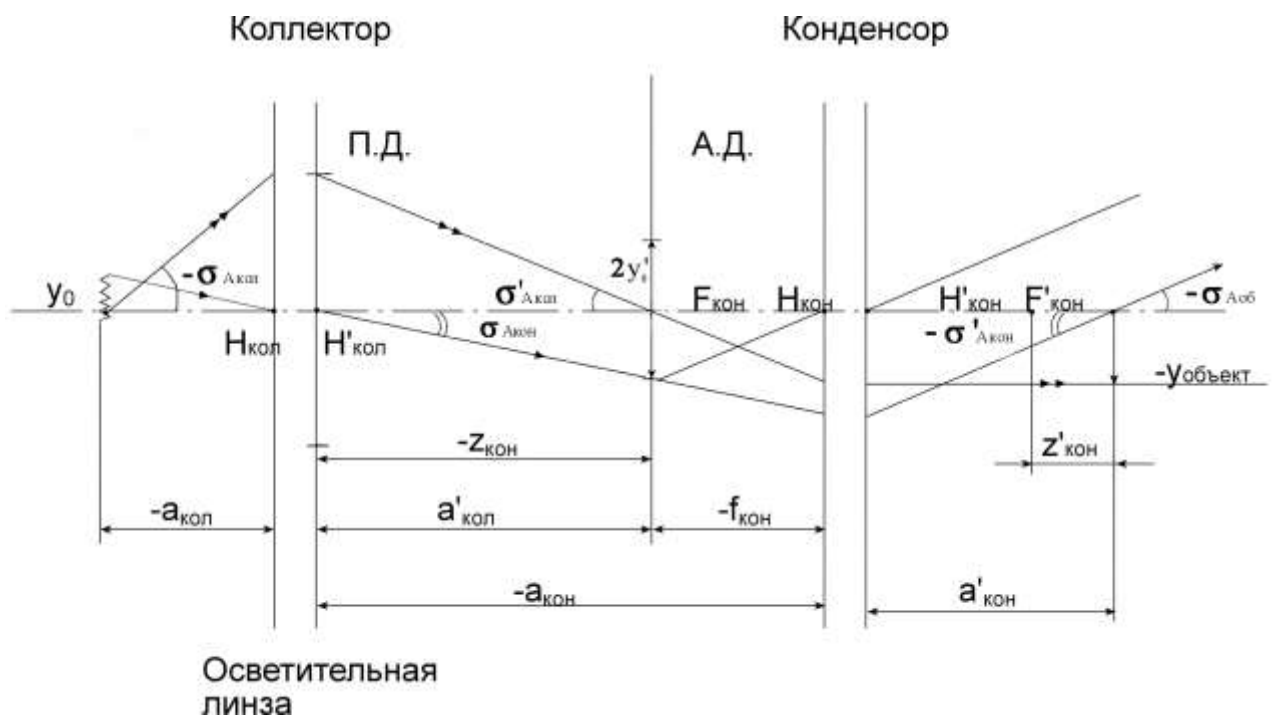


Рисунок 1.1. Ход лучей в осветительной части микроскопа в проходящем свете.

В передней фокальной плоскости конденсора находится вторая ирисовая диафрагма, служащая апертурной. Осветительная система микроскопа рассчитывается обычно по методу Келера. Коллектор изображает источник света в апертурную диафрагму. Конденсор проецирует полевую диафрагму в плоскость предмета. Выходящие из конденсора параллельные пучки лучей равномерно освещают предмет. Структура источника не воспроизводится на плоскости освещаемого предмета. Эта система позволяет, также, при помощи ирисовых диафрагм отдельно регулировать величину освещаемого

поля и величину апертуры. Осветительная система по Келеру создает у освещаемого предмета телецентрический ход главного луча, что очень важно для измерительных микроскопов. Телецентрический ход лучей у предмета устраняет ошибку измерений, возникающую благодаря неточности наводки на резкость.

Числовые апертуры, а также размеры источника света и линейного поля объектива должны согласоваться друг с другом и удовлетворять условию:

$$y_0 \cdot A_{кол} = y_{об} \cdot A_{об} = y_{об} \cdot A'_{кон}, \quad (1.1)$$

где $2y_0$ – размер светящегося тела нити, мм;

$2y_{об}$ – размер освещаемого объекта, мм;

$A_{кол} = n \cdot \sin \sigma_{A_{кол}}$ – числовая апертура коллектора в пространстве предметов;

$A_{об} = n \cdot \sin \sigma_{A_{об}}$ – числовая апертура объектива в пространстве предметов;

$A'_{кон} = n' \cdot \sin \sigma'_{A_{кон}}$ – числовая апертура конденсора в пространстве изображений.

Исходными данными для расчета осветительной части являются: $A_{об}$, $2y_{об}$. Конденсор выбирается из каталога. Числовая апертура конденсора в пространстве изображений $A'_{кон}$ должна быть меньше апертуры объектива в пространстве предметов $A_{об}$.

Формулы для определения увеличения конденсора:

$$\beta_{кон} = -\frac{2y_{об}}{D_{ИД}} = -\frac{f_{кон}}{z_{кон}} = -\frac{z'_{кон}}{f'_{кон}} = -\frac{A_{кон}}{A'_{кон}} = -\frac{A_{кон}}{A_{об}}. \quad (1.2)$$

Расстояние от главной задней плоскости коллектора до апертурной диафрагмы выбирается в пределах $a'_{кол} = -z_{кон} = 200 \div 300 \text{ мм}$.

Определение диаметра апертурной диафрагмы:

$$D_{АД} = -2z_{кон} A_{кон} = -2f_{кон} A_{об} = 2y'_0. \quad (1.3)$$

Фокусное расстояние конденсора, в среднем, составляет $f'_{кон} = 10 \text{ мм}$ и изменяется от 7 до 20 мм.

Вычисление числовой апертуры коллектора:

$$A_{кол} = \frac{y_{об} A_{об}}{y_0}. \quad (1.4)$$

Определение линейного увеличения коллектора:

$$\beta_{кол} = -\frac{D_{АД}}{2y_0}. \quad (1.5)$$

Определение фокусного расстояния коллектора:

$$f'_{кол} = \frac{a'_{кол}}{1 - \beta_{кол}}. \quad (1.6)$$

Определение расстояния от переднего фокуса коллектора до светящегося тела лампы накала:

$$z_{кол} = \frac{f'_{кол}}{\beta_{кол}}. \quad (1.7)$$

Вычисление диаметра полевой диафрагмы коллектора:

$$D_{ПД} = -\frac{2y_{об}}{\beta_{кон}}. \quad (1.8)$$

Определение положения объекта относительно заднего фокуса конденсора:

$$z'_{кон} = -\beta_{кон} f'_{кон}. \quad (1.9)$$

Рассмотрим формирование изображения визуальной системой микроскопа, состоящей из объектива и окуляра (рисунок 1.2).

Предмет расположен перед передним фокусом объектива (вблизи него), в передней фокальной плоскости микроскопа. Увеличенное, действительное, перевернутое изображение предмета строится объективом в передней фокальной плоскости окуляра (глаз работает без аккомодации). Там же устанавливается полевая диафрагма (в отсчетном микроскопе – это измерительная шкала). Вследствие телецентрического хода главного луча в пространстве предметов, входной зрачок микроскопа находится в бесконечности. Объектив микроскопа создает изображение входного зрачка в своей задней фокальной плоскости. Здесь и помещается апертурная диафрагма микроскопа. В этом же месте возникает изображение апертурной диафрагмы осветительной системы и источника света.

Расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра Δ_0 называется оптической длиной тубуса микроскопа.

Из рисунка 1.2 видно, что фокусное расстояние микроскопа f'_i – величина отрицательная. Следовательно, визуальная часть

микроскопа в отличие от лупы представляет собой отрицательную оптическую систему.

Основными характеристиками микроскопа являются: видимое увеличение \bar{G} , линейное поле $2y_{об}$, числовая апертура $A_{об}$. К остальным характеристикам относятся: линейный предел разрешения δ , диаметр выходного зрачка D' , глубина резко изображаемого пространства T .

Под видимым увеличением микроскопа понимают отношение тангенса угла, под которым видно изображение предмета через микроскоп, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения:

$$\bar{G} = \frac{tg\omega'}{tg\omega}. \quad (1.10)$$

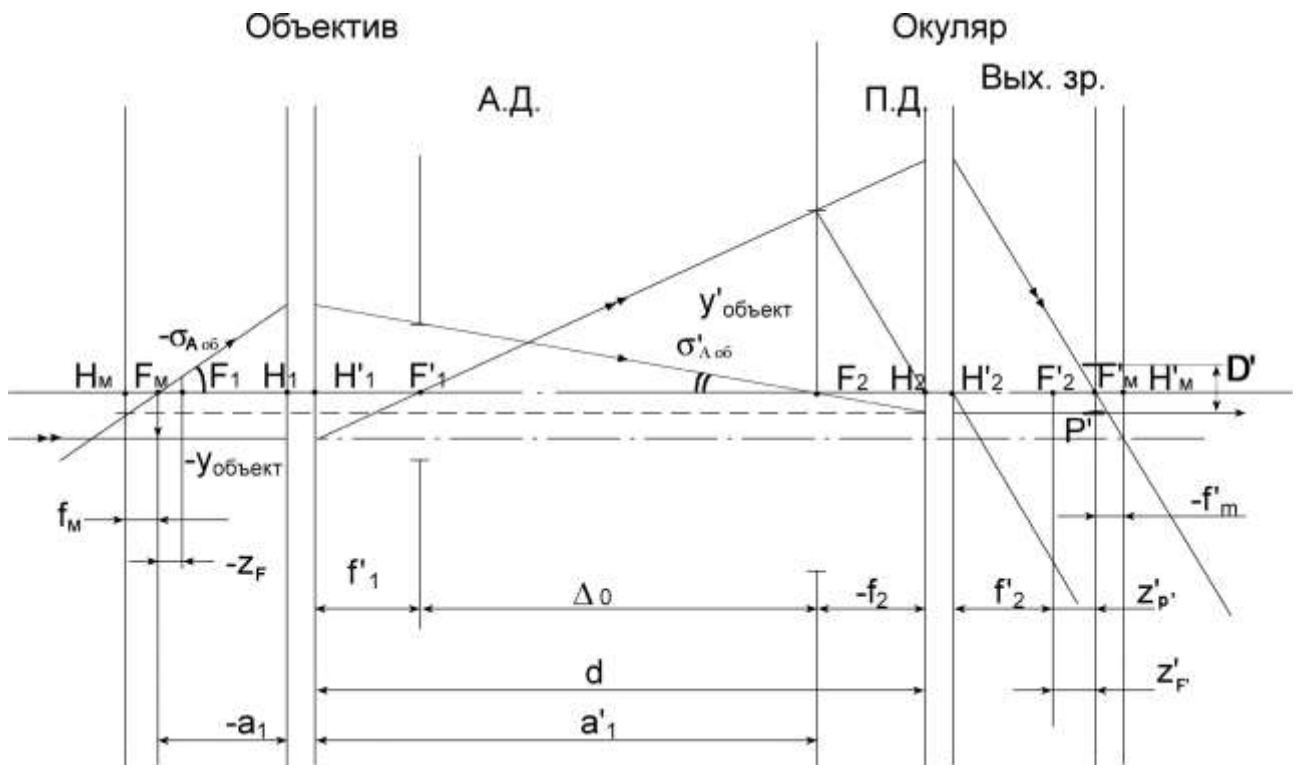


Рисунок 1.2. Ход лучей в наблюдательной системе микроскопа, состоящей из объектива и окуляра

Основные формулы для расчета

1. Видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{G} = \frac{250}{f'_m} = -\frac{\Delta_0 \cdot 250}{f'_{об} \cdot f'_{ок}} = \beta_{об} \cdot \bar{G}_{ок} = \frac{500 \cdot A_{об}}{D'}, \quad (1.11)$$

где $\beta_{об}$ - линейное увеличение объектива;

$f'_{об}$ - фокусное расстояние объектива;

$f'_{ок}$ - фокусное расстояние окуляра;

$$\overline{\Gamma}_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}} - \text{видимое увеличение окуляра.}$$

2. Линейное увеличение объектива:

$$\beta_{об} = -\frac{D_{ПД}}{2y_{об}} = \frac{A_{об}}{A'_{об}} = \frac{n \cdot \sin \sigma_{A_{об}}}{n' \cdot \sin \sigma'_{A_{об}}} = -\frac{\Delta_0}{f'_{об}} = \frac{a'_{об}}{a_{об}}. \quad (1.12)$$

3. Определение фокусного расстояния микроскопа f'_i , положения заднего фокуса микроскопа относительно заднего фокуса окуляра $z'_{F'}$ и положения переднего фокуса микроскопа относительно переднего фокуса объектива z_F .

$$f'_M = -\frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{\Delta_0}, \quad (1.13)$$

$$z'_{F'} = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0}, \quad (1.14)$$

$$z_F = \frac{f_{об} \cdot f'_{об}}{\Delta_0}, \quad (1.15)$$

где $f'_{iа}$ - переднее фокусное расстояние объектива, в иммерсионных микроскопах $f'_{об} \neq -f_{об}$.

4. Определение размера апертурной диафрагмы микроскопа:

$$D_{АД} = 2\Delta_0 \cdot \text{tg} \sigma'_{A_{об}} \cong 2f'_{об} \cdot A_{об}, \quad (1.16)$$

где $\sigma'_{A_{иа}}$ - апертурный угол объектива в пространстве изображения, причем:

$$\text{tg} \sigma'_{A_{об}} = \frac{D'}{2f'_{ок}}. \quad (1.17)$$

5. Определение положения выходного зрачка микроскопа относительно заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0}. \quad (1.18)$$

6. Определение линейного увеличения окуляра в зрачках:

$$\beta_{P_{ок}} = -\frac{D'}{D_{АД}} = -\frac{f'_{ок}}{\Delta_0}. \quad (1.19)$$

7. Определение числовой апертуры объектива в пространстве изображений:

$$A'_{об} = n' \sin(\arctg \frac{D'}{2f'_{ок}}), \quad (3.20)$$

или:

$$A'_{об} = n' \sin(\arctg \frac{D'_{АД}}{2\Delta_0}). \quad (1.21)$$

8. Определение диаметра полевой диафрагмы микроскопа:

$$D_{ПД} = 2y'_{об} = 2y_{об} \cdot \beta_{об} = 2f'_{ок} \cdot tg\omega', \quad (1.22)$$

где $2\omega'$ - угловое поле микроскопа в пространстве изображений.

9. Определение разрешающей способности микроскопа в линейной мере:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A_{об}}, \quad (1.23)$$

где λ – длина волны света в мм.

10. Определение глубины резко изображаемого пространства:

$$T = T_a + T_s = \frac{250}{\Gamma_m^2} + \frac{\lambda}{2A_{об}^2}, \quad (1.24)$$

где T_a - аккомодационная глубина;

T_s - волновая глубина.

Если изображение проецируется на экране или в плоскости полевой диафрагмы располагается сетка, то $T_a = 0$, тогда:

$$T = T_s = \frac{\lambda}{2A_{об}^2}. \quad (1.25)$$

Из условия полного использования глазом разрешающей способности микроскопа, полагая разрешающую способность глаза $\Psi'_{эл} = 2' \div 4'$, получаем следующее соотношение для полезного увеличения микроскопа:

$$500A_{об} \leq \Gamma_m \leq 1000A_{об}. \quad (1.26)$$

Подставляя в последнее выражение $\Gamma_m = \frac{500A}{D'}$, получим, что диаметр выходного зрачка лежит в пределах:

$$0,5\text{мм} \leq D'_p \leq 1\text{мм}. \quad (1.27)$$

Отсюда следует, что диаметр выходного зрачка микроскопа меньше диаметра зрачка глаза.

Величина Δ_0 изменяется от 160 мм до 200 мм в зависимости от фокусного расстояния объектива. Для того, чтобы выдержать эти значения, положение объективов при их установке на прибор фиксируется нижним срезом тубуса микроскопа.

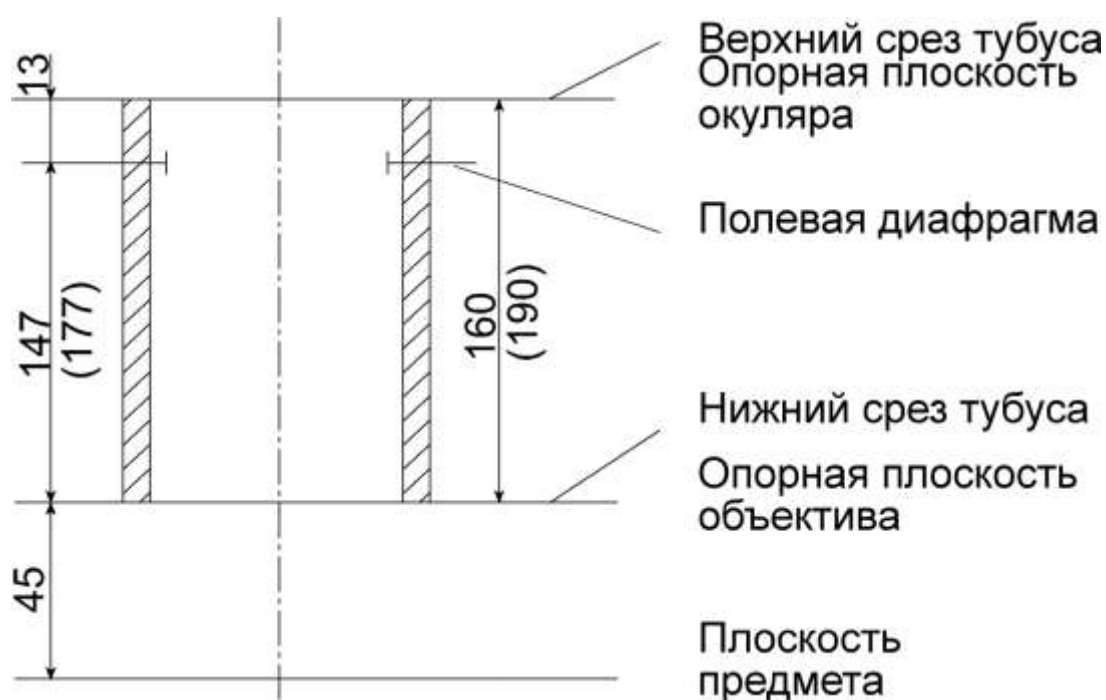


Рисунок 1.3. Схема тубуса упрощенного микроскопа.

Оправа окуляра опирается на верхний срез тубуса (рисунок 1.3). Расстояние от нижнего до верхнего среза тубуса называется механической длиной тубуса, которая стандартизована. Она равна 160мм для микроскопов, работающих в проходящем свете, и 190 мм для микроскопов, работающих в отраженном свете. Остальные стандартные величины показаны на рисунке 1.3.

В комплект микроскопа входят наборы объективов и окуляров, позволяющие получать различные значения видимого увеличения микроскопа. На оправе объектива гравировается его линейное увеличение и числовая апертура, а на оправе окуляра – видимое увеличение. Тубус микроскопа (рисунок 1.3), в нижнюю часть которого ввертывается объектив, а в верхнюю – окуляр, имеет согласованные посадные размеры с оправками объективов и окуляров.

Увеличения объективов для проходящего и фокусные расстояния для отраженного света, для тубуса бесконечность, изменяются в геометрической прогрессии со знаменателем 1.6. Это соответствует ряду Ra5 (ГОСТ 6636-69). Номинальные значения видимых увеличений окуляров рекомендуется выбирать из ряда Ra10 и они соответствуют кратности: 4; 6.3; 10; 12.5; 16; 20; 25.

Известно также третья длина тубуса – бесконечность, встречающаяся в микроскопах, работающих в отраженном свете. В этом случае из объектива выходит параллельный пучок лучей, т.к. предмет расположен в передней фокальной плоскости объектива (рисунок 1.4). Изображение расположено в задней фокальной плоскости тубусной линзы.

Тубусные линзы представляют собой двухлинзовый склеенный ахроматический объектив и имеют $f'_{м.л.} = 250; 190; 125\text{мм}$.

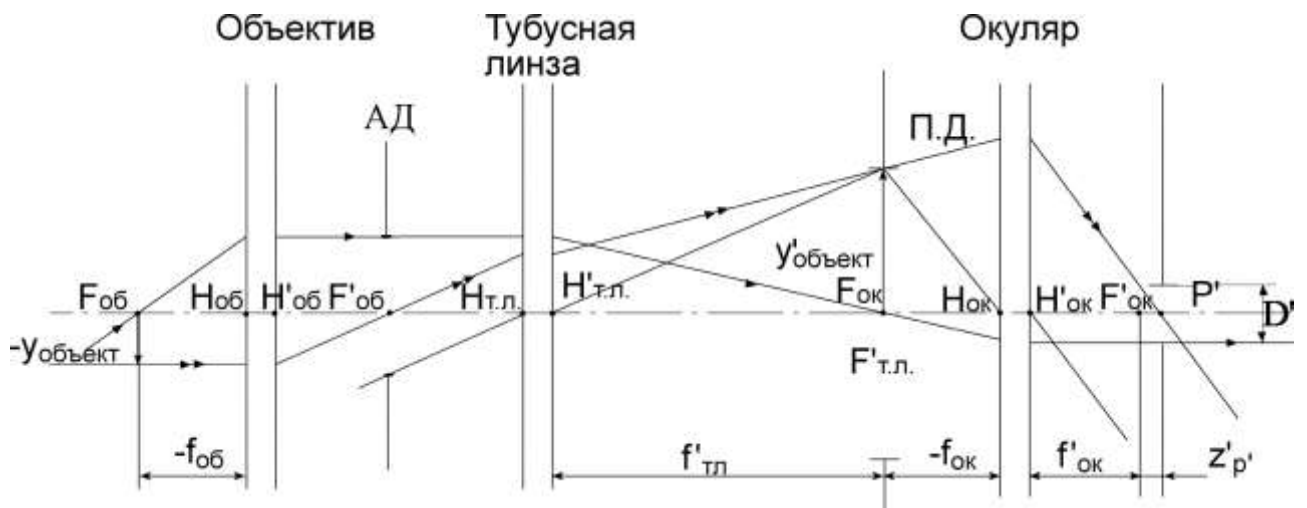


Рисунок 1.4. Ход лучей в наблюдательной части микроскопа, содержащей объектив с тубусом бесконечность.

Основные формулы для расчета

1. Линейное увеличение объективной части микроскопа, состоящей из объектива и тубусной линзы:

$$\beta_{об+т.л.} = -\frac{f'_{м.л.}}{f'_{об}} = -\frac{D_{пл}}{2y_{об}}. \quad (1.28)$$

2. Видимое увеличение микроскопа:

$$\overline{\Gamma} = \beta_{об+т.л.} \cdot \overline{\Gamma}_{ок} = -\frac{f'_{м.л.}}{f'_{об}} \cdot \overline{\Gamma}_{ок}. \quad (1.29)$$

3. Тубусная линза совместно с окуляром представляют собой телескопическую систему, видимое увеличение которой:

$$\bar{\Gamma}_{\text{т.л.}+\text{окуляр}} = -\frac{f'_{\text{т.л.}}}{f'_{\text{ок}}} = \frac{D_{\text{Ад}}}{D'}. \quad (1.30)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{z_p \cdot f'^2_{\text{ок}}}{f'^2_{\text{т.л.}}}, \quad (1.31)$$

где z_p - расстояние от переднего фокуса тубусной линзы до апертурной диафрагмы.

Расстояние от апертурной диафрагмы до тубусной линзы колеблется от 0.05 до 0.75 фокусного расстояния линзы.

3. Указания по выполнению работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам рассчитать видимое увеличение микроскопа $\bar{\Gamma}$, числовую апертуру объектива $A_{об}$, разрешающую способность δ , диаметр выходного зрачка.

3.2. По апертуре $A_{об}$ выбирается микрообъектив. Если микрообъектив имеет конечную длину тубуса, то в каталоге указаны $\beta_{об}$, линейное поле объектива в пространстве предметов $2y_{об}$, линейное поле микроскопа в пространстве изображений $2y'_{об} = D_{\text{ПД}}$, расстояние от первой поверхности объектива до плоскости предметов, расстояние от последней поверхности объектива до изображения.

В отчете представить конструктивные параметры объектива, параксиальные характеристики: $f'_{об}$, $S'_{F'}$, S_F и чертеж объектива с указанием отрезков S' и S .

3.3. Далее необходимо рассчитать диаметр апертурной диафрагмы $D_{\text{Ад}}$; оптическую длину тубуса; видимое увеличение окуляра, его фокусное расстояние; увеличение окуляра в зрачках; удаление выходного зрачка.

3.4. По фокусному расстоянию окуляра $f'_{ок}$ и размеру полевой диафрагмы $D_{\text{ПД}}$ выбрать из каталога окуляр визуальной части микроскопа.

В микроскопии применяются следующие типы окуляров: Гюйгенса, Кельнера, Аббе (ортоскопические), симметричные, широкоугольные, компенсационные.

Окуляры Гюйгенса и Кельнера применяются в микроскопах совместно с объективами ахроматами. Угловые поля $2\omega'$ и удаления выходных зрачков $S'_{p'}$ этих окуляров соответственно $2\omega' = 30^\circ$ и $2\omega' = 40^\circ \div 50^\circ$, $S'_{p'} \cong \frac{f'_{ок}}{3}$ и $S'_{p'} = \frac{f'_{ок}}{2}$.

Симметричные окуляры применяются в основном для микрофотографирования и реже для визуального наблюдения, для них $2\omega' = 40^\circ$, $S'_{p'} \cong 0,75f'_{ок}$. Окуляры Аббе (ортоскопические) применяются совместно с объективами ахроматами средних апертур при больших увеличениях. Угловые поля этих окуляров $2\omega' = 40^\circ$ и $S'_{p'} \cong 0,75f'_{ок}$. Для компенсации хроматизма увеличения объективов апохроматов с плоским полем применяются компенсационные окуляры. Фокусное расстояние окуляра не пересчитывается. Поэтому при несоответствии рассчитанного фокусного расстояния с фокусным расстоянием из каталога, необходимо уточнить видимое увеличение микроскопа по формуле:

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}, \quad (1.32)$$

$$\text{где } \Gamma_{ок} = \frac{250}{f'_{ок \text{ из каталога}}}. \quad (1.33)$$

В отчете представить чертеж окуляра с указанием отрезков S'_F и S_F , положения и размера полевой диафрагмы, конструктивные и параксиальные характеристики окуляра.

3.5. При расчете визуальной части микроскопа с тубусной линзой по апертуре $A_{об}$ выбирают микрообъектив с тубусом бесконечность. Для такого объектива известны фокусное расстояние $f'_{об}$, линейное поле в пространстве предметов $2y_{об}$, расстояние от первой поверхности до плоскости предметов.

Тубусная линза выбирается из каталога двухлинзовых объективов по относительному отверстию, угловому полю, фокусному расстоянию. Относительное отверстие ее не превышает, как правило, 1:10. Угловое поле определяется по формуле:

$$\text{tg}\omega_{м.л.} = \frac{D_{плд}}{2f'_{м.л.}} = \frac{y'_{об}}{f'_{м.л.}}. \quad (1.34)$$

Входным зрачком для тубусной линзы является апертурная диафрагма визуальной части микроскопа. Расстояние от апертурной диафрагмы до тубусной линзы колеблется от 0.05 до 0.75 фокусного расстояния линзы.

3.6. В микроскопах средних и больших увеличений, содержащих сложные объективы, апертурной диафрагмой служит оправа одной из последних линз объектива или специальная диафрагма, устанавливаемая между последней линзой и задним фокусом объектива. В микроскопах малых увеличений с простыми объективами, а также в визирных микроскопах, применяемых в геодезических и контрольно-измерительных приборах, апертурной диафрагмой является оправа объектива. В отсчетных микроскопах апертурная диафрагма устанавливается в задней фокальной плоскости объектива, что обеспечивает телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов. Это ослабляет влияние параллакса на точность измерений.

3.7. Далее необходимо определить все расстояния между компонентами и представить оптическую схему визуальной части упрощенного микроскопа. На этом чертеже необходимо указать также основные характеристики: $\bar{\Gamma}$ - видимое увеличение, $2y_{об}$ - линейное поле микроскопа в пространстве предметов, $A_{об}$ - числовая апертура, S'_p - удаление выходного зрачка от последней поверхности окуляра.

3.8. По программе «Опал» определяются aberrации объектива, а так же aberrации окуляра в обратном ходе, и в отчете приводятся таблицы и графики aberrаций.

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

- 4.1. Расчеты, выполненные по формулам.
- 4.2. Конструктивные данные, параксиальные характеристики и чертежи объектива, окуляра и всей системы
- 4.3. Оптическая схема всей системы с указанием нужных расстояний
- 4.4. Схема хода лучей в микроскопе
- 4.5. Таблицы и графики aberrаций.
- 4.5. Выводы по работе: соответствие полученных характеристик заданию и анализ качества изображения.

5. Литература

5.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. –446с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань»
[Электронный ресурс]

Режим доступа:

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=147

5.2 Прикладная оптика: Учебное пособие / Л.Г.Бибчук и др. Под ред. Н.П. Заказнова. 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 320с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань»
[Электронный ресурс]

Режим доступа:

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=148

5.3. Цуканова Г.И., Багдасарова О.В., Бахолдин А.В., Карпов В.Г., Карпова Г.В. Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Прикладная оптика». Часть 2. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.-СПб: СПб ГУИТМО, 2009. –124с.:ил.

[Электронный ресурс]— Электрон. версия печ. публикации —
Режим доступа: <http://aco.ifmo.ru/student/>

5.4. Теория оптических систем. Заказнов Н.Г. и др М. Машиностроение, 1992г

5.5. Справочник конструктора оптико-механических приборов Панов В.А. и др. Л. Машиностроение 1980г.

6. Задания для работы

№ варианта	Числовая апертура, $A_{об}$	Разрешающая способность, δ (мм)	Видимое увеличение, $\bar{\Gamma}$	Фокусное расстояние тубусной линзы, $f'_{т.л.}$ (мм)
1	0,1	-	-	-
2	0,2	-	-	-
3	0,3	-	-	-
4	0,4	-	-	-
5	0,5	-	-	-
6	0,6	-	-	-
7	0,7	-	-	-
8	0,8	-	-	-
9	0,9	-	-	-
10	1,0	-	-	-
11	1,1	-	-	-
12	1,2	-	-	-
13	0,1	-	-50^x	-
14	0,2	-	-100^x	-
15	0,3	-	-150^x	-
16	0,4	-	-200^x	-
17	0,5	-	-250^x	-
18	0,6	-	-300^x	-
19	0,7	-	-350^x	-
20	-	-	-400^x	-
21	-	-	-450^x	-
22	-	-	-500^x	-
23	-	0,0025		
24	-	0,0018		
25	-	0,0014		
26	-	0,0011		

27	-	0,0009		
28	-	0,00078		
29	-	0,00068		
30	-	0,00061		
31	-	0,00055		
32	-	0,0005		
33	-	0,00045		
34	-	-	-200 ^X	250
35	-	-	-220 ^X	250
36	-	-	-250 ^X	190
37	-	-	-270 ^X	190
38	-	-	-300 ^X	190
39	-	-	-350 ^X	190

Контрольные вопросы:

1. Принципиальная оптическая схема микроскопа, ход лучей.
2. Основные параметры и их соотношение.
3. Из каких компонентов состоит осветительная система микроскопа?
4. От чего зависит разрешающая способность микроскопа?
5. Какое увеличение микроскопа называется полезным?
6. Что называется оптической длиной тубуса микроскопа?
7. Приведите формулу для расчета видимого увеличения микроскопа.
8. От чего зависит глубина резко изображаемого пространства в микроскопе?
9. Основные типы объективов и окуляров микроскопов.
10. Основные характеристики объективов и окуляров микроскопа
11. Оценка качества изображения оптической системы микроскопов по результатам абберационного расчета.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа «Микроскоп (визуальная часть)»

Исходные данные:

Числовая апертура $A_{об} = 0,4$.

1.1. Задание для работы:

1. Исходя из заданных характеристик визуальной части микроскопа, необходимо выполнить габаритный расчет.
2. По полученным данным подобрать объектив и окуляр из каталогов или из библиотеки оптических систем программы «ОПАЛ».
3. Составить оптическую систему визуальной части микроскопа и определить расстояния между компонентами.
4. Построить ход лучей.
5. Определить aberrации наблюдательной части микроскопа.
6. Оценить качество изображения микроскопа.
7. Выполнить чертеж оптической схемы по ГОСТ 2.412-81

Расчет микроскопа:

1. Видимое увеличение:

$$\bar{\Gamma} = 1000 \cdot A_{об} = 400^x.$$

Разрешающая способность:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A_{об}} = 6,825 \cdot 10^{-4}.$$

Диаметр выходного зрачка $D' = \frac{500A}{\bar{\Gamma}} = \frac{500 \cdot 0,4}{400} = 0,5$ мм.

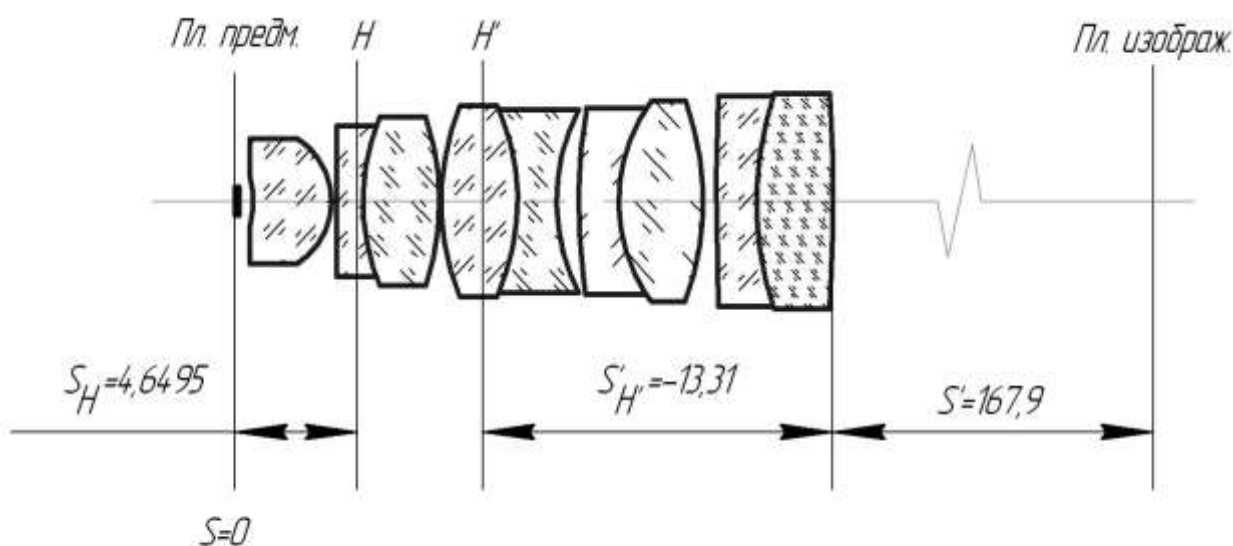
2. Конструктивные параметры **объектива**

«Планахромат» $\beta_{об} = -38,974$, $A_{об} = 0.75$, $2y = 0.62$:

N	Радиусы	Осевые расст.	Высо-ты	Марки Кат.	Показатели преломления		Свето-вые высоты	Стрел-ки
					L0=0.5461	L1=0.6438		
				Россия	L0=0.5461	L1=0.6438		
0				ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000		
1	0,0	0,17000	0,500	K14	1.5168046	1.5125989	0.313	0.000
2	0,0	0,57100	0,500	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	0.409	0.000
3	-2,93800	2,90000	0,890	TK17	1.6385146	1.6252876	0.898	-0.140
4	-2,48900	0,20000	2,180	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	2.179	-1.280
5	788,90000	1,00000	2,650	ТФ1	1.6521984	1.6429543	2.658	0.004
6	7,81500	2,90000	2,950	TK17	1.6305146	1.6252876	2.970	0.660
7	-8,55100	0,10000	3,260	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	3.281	-0.650
8	8,43300	2,90000	3,350	TK17	1.6305146	1.6252876	3.389	0.711
9	-7,58600	2,90000	3,210	ОФ4	1.6541887	1.6468524	3.231	-0.720
10	6,54600	0,84000	2,900	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	2.916	0.685
11	18,88000	1,50000	3,000	K8	1.5182959	1.5142938	3.024	0.244
12	5,67500	3,20000	3,270	ФЛЮОРИТ	1.4349587	1.4327866	3.291	1.052
13	-9,37600	0,50000	3,520	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	3.537	-0.690
14	77,62000	1,50000	3,610	K8	1.5182959	1.5142938	3.627	0.085
15	11,01500	2,90000	3,670	ФЛЮОРИТ	1.4349587	1.4327866	3.690	0.636
16	-64,57000		3,780	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	3.804	-0.110

Параксиальные характеристики:

F F' sF sF' sH sH' L
 -4.5333 4.5333 .1161 -8.7808 4.6495 -13.3141 24.88



Объектив микроскопа

3. Диаметр апертурной диафрагмы:

$$D_{Ад} \cong 2 \cdot f'_{об} \cdot A_{об} = 2 \cdot 4,5333 \cdot 0,4 = 3,63 \text{ мм.}$$

Диаметр полевой диафрагмы:

$$D_{ПД} = -2y_{об} \cdot \beta_{об} = 24,16 \text{ мм.}$$

Фокусное расстояние микроскопа (расчетное):

$$f'_м = \frac{250}{\Gamma} = -0,625 \text{ мм.}$$

Видимое увеличение окуляра:

$$\overline{\Gamma}_{ок} = \frac{\overline{\Gamma}}{\beta_{об}} = \frac{-400}{(-38,97)} = 10,26$$

Фокусное расстояние окуляра: $f'_{ок} = \frac{250}{\overline{\Gamma}_{ок}} = \frac{250}{10,26334} = 24,36 \text{ мм.}$

Оптическая длина тубуса:

$$\Delta_0 = -\frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{f'_м} = -\frac{4,5333 \cdot (24,36)}{-0,625} = 176,68 \text{ мм.}$$

Линейное увеличение окуляра в зрачках:

$$\beta_{р_{ок}} = -\frac{f'_{ок}}{\Delta_0} = -0,14.$$

Удаление выходного зрачка:

$$z'_{р'} = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0} = 3,36 \text{ мм.}$$

$$f' = 25 \text{ мм.}$$

4. Окуляр.

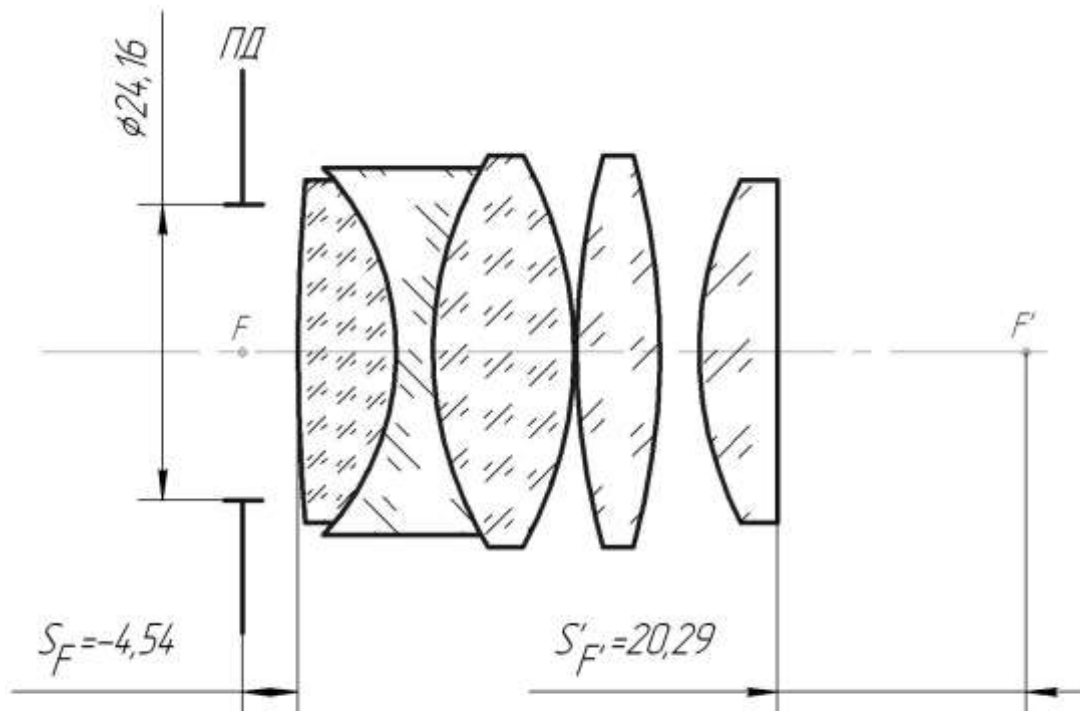
$$D = 2 \text{ мм, } 2\omega = 60^\circ.$$

Конструктивные параметры:

N	Радиусы	Осевые расст.	Высо-ты	Марки Кат.	Показатели преломления		Свето-вые высоты	Стрел-ки
					L0=0.5461	L1=0.4800		
				Россия	L0=0.5461	L1=0.4800		
0				ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000		
1	165,96000	0,00000	14,000	К8	1.5182959	1.5224062	13,324	0,536
2	-21,88000	3,00000	14,000	ТФ4	1.0000000	1.0000000	13,284	-4,494
3	30,76000	11,50000	16,000	К8	1.5182959	1.5224062	14,198	3,468
4	-32,81000	0,20000	16,000	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	14,977	-3,618
5	60,81000	6,80000	16,000	БК8	1.5488596	1.5533121	15,057	1,894
6	-60,81000	3,20000	16,000	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	14,810	-1,831
7	30,48000	6,40000	14,000	БК8	1.5488596	1.5533121	12,652	2,750
8	0,0		14,000	ВОЗДУХ	1.0000000	1.0000000	11,419	0,000

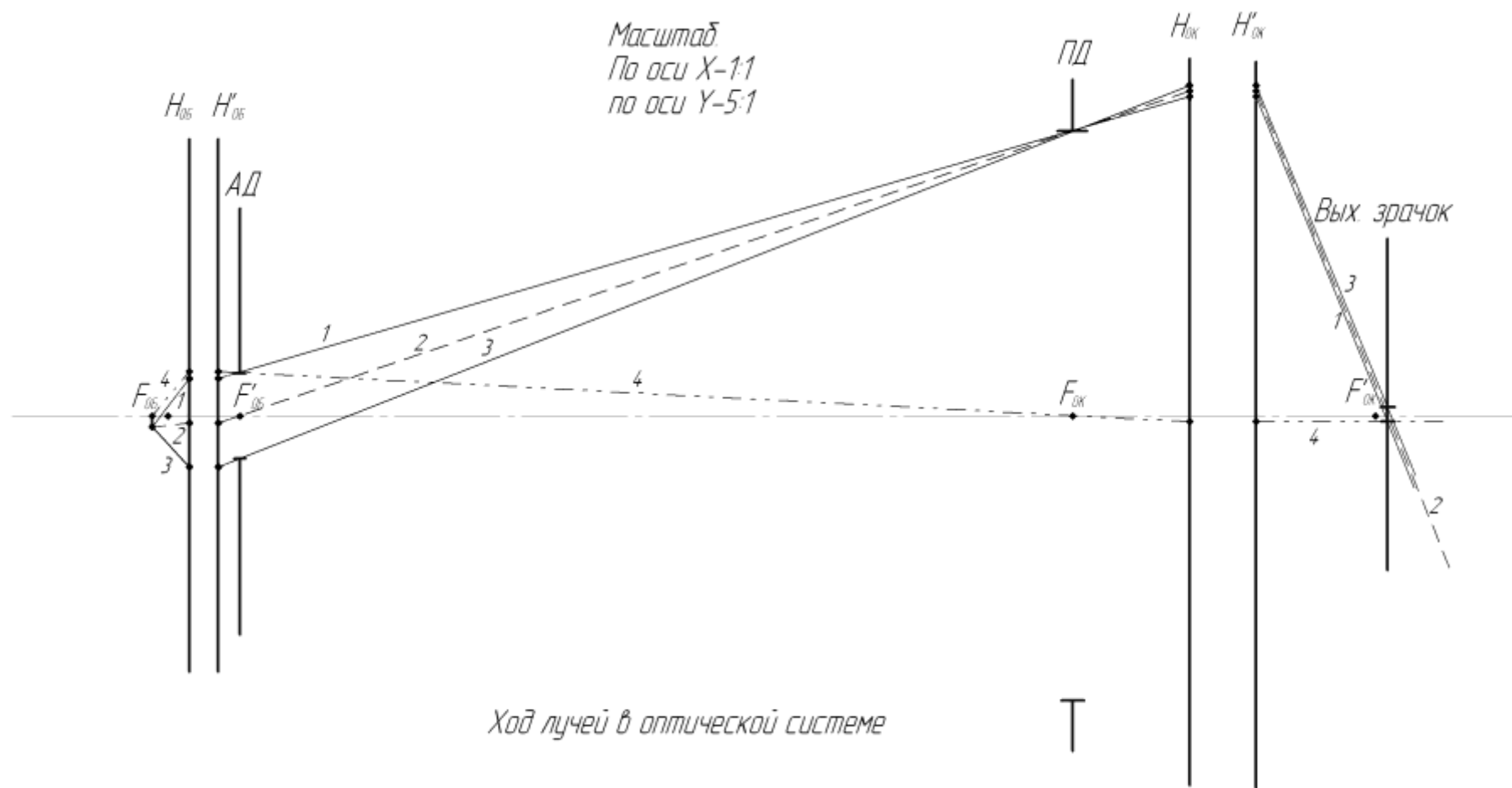
Параксиальные характеристики

F	F'	sF	sF'	sH	sH'	L
-25.0103	25.0103	-4.5397	20.2919	20.4706	-4.7184	39.10



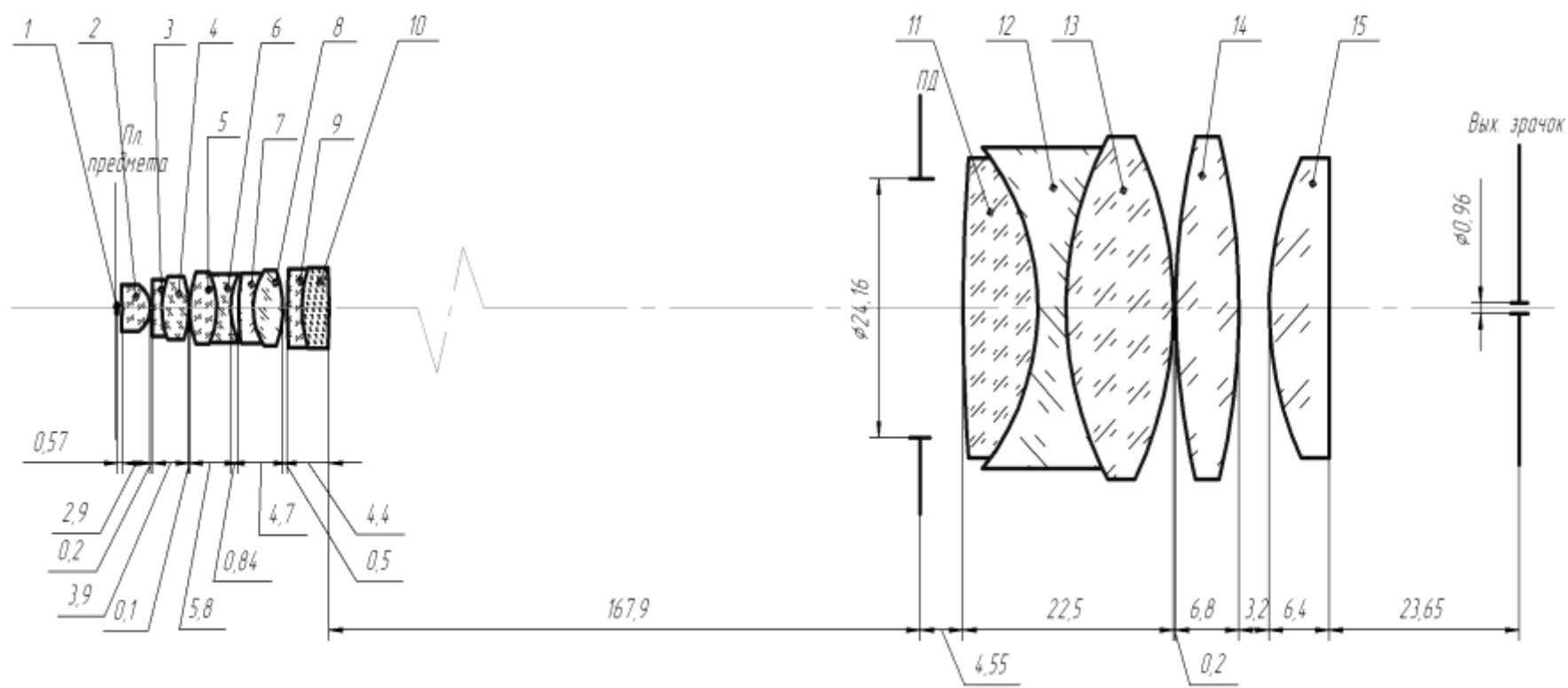
Окуляр микроскопа

5. Весь микроскоп.



Видимое увеличение $\Gamma=400\times$,
 Числовая апертура в пространстве предметов $A=0,4$,
 Линейное поле в пространстве предметов $2u=0,62$

№ поз	f'	S_F	S_F'
1-10	4,5333	0,1161	-8,7808
11-15	25,0103	-4,5397	20,2919
все	-0,6417	-0,0002	23,8323



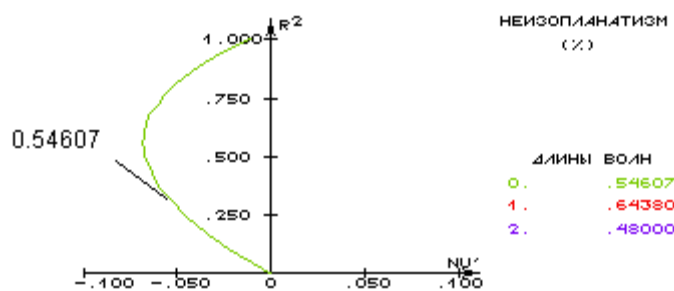
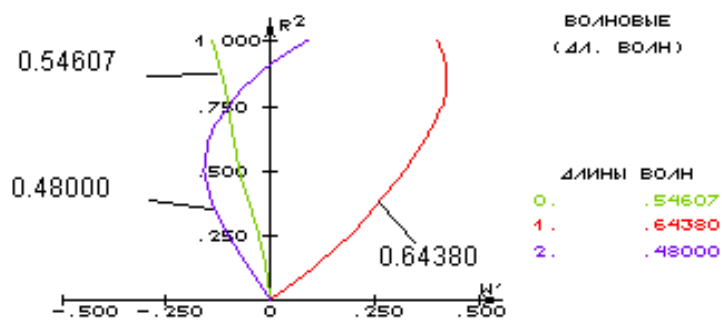
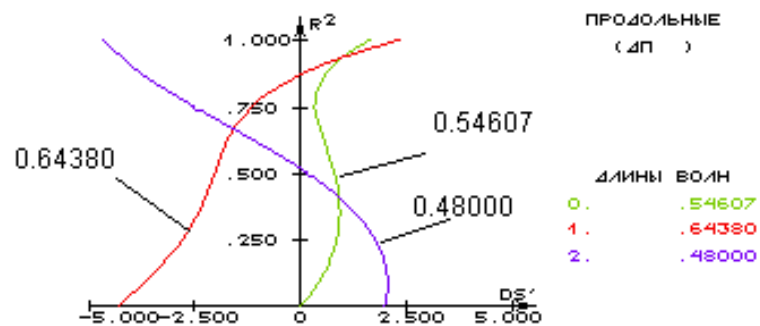
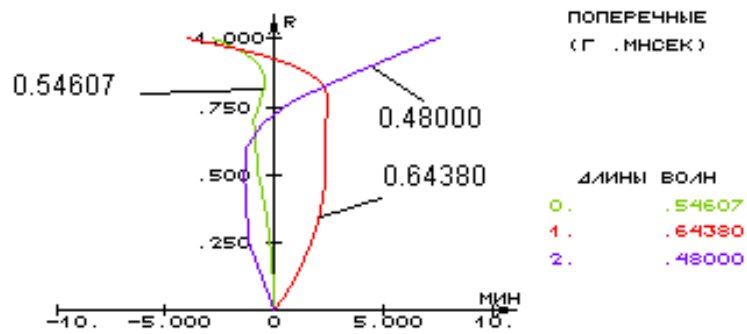
Конструктивные параметры:

N	Радиусы	Осевые расст.	Высо-ты	Марки Кат.	Показатели преломления		Свето-вые высоты	Стрел-ки
					L0=0.5461	L1=0.6438		
				Россия	L0=0.5461	L1=0.6438		
0				ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000		
1	0,0	0,17000	0,500	K14	1,5168046	1,5125989	0,313	0,000
2	0,0	0,57100	0,500	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	0,409	0,000
3	-2,93800	2,90000	0,890	TK17	1,6305146	1,6252876	0,898	-0,140
4	-2,48900	0,20000	2,180	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	2,179	-1,286
5	788,90000	1,00000	2,650	ТФ1	1,6521904	1,6429543	2,658	0,004
6	7,01500	2,90000	0,898	TK17	1,6305146	1,6252876	2,978	0,660
7	-8,55100	0,10000	3,260	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	3,281	-0,654
8	8,43300	2,90000	3,350	TK17	1,6305146	1,6252876	3,389	0,711
9	-7,58600	2,90000	3,210	ОФ4	1,6541887	1,6468524	3,231	-0,723
10	6,54600	0,84000	2,900	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	2,916	0,685
11	18,88000	1,50000	3,000	K8	1,5182959	1,5142938	3,824	0,244
12	5,67500	3,20000	3,270	ФЛЮОРИТ	1,4349587	1,4327866	3,291	1,052
13	-9,37600	0,50000	3,528	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	3,537	-0,693
14	77,62000	1,50000	3,618	K8	1,5182959	1,5142938	12,841	0,498
15	11,01500	2,90000	3,678	ФЛЮОРИТ	1,4349587	1,4327866	3,698	0,636
16	-64,57000	172,4397	3,780	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	3,804	-0,112
17	165,96000	0,00000	14,000	K8	1,5182959	1,5142938	12,841	0,498
18	-21,88000	3,00000	14,000	ТФ4	1,7462310	1,7683182	12,943	-4,239
19	30,76000	11,50000	16,000	K8	1,5182959	1,5142938	14,178	3,462
20	-32,81000	0,20000	16,000	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	15,195	-3,731
21	60,81000	6,80000	16,000	БК8	1,5488596	1,5533121	15,866	2,106
22	-60,81000	3,20000	16,000	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	15,798	-2,088
23	30,48000	6,40000	14,000	БК8	1,5488596	1,5533121	14,067	3,440
24	0,0	0,0	14,000	ВОЗДУХ	1,0000000	1,0000000	13,157	0,000

Аберрации осевых пучков:

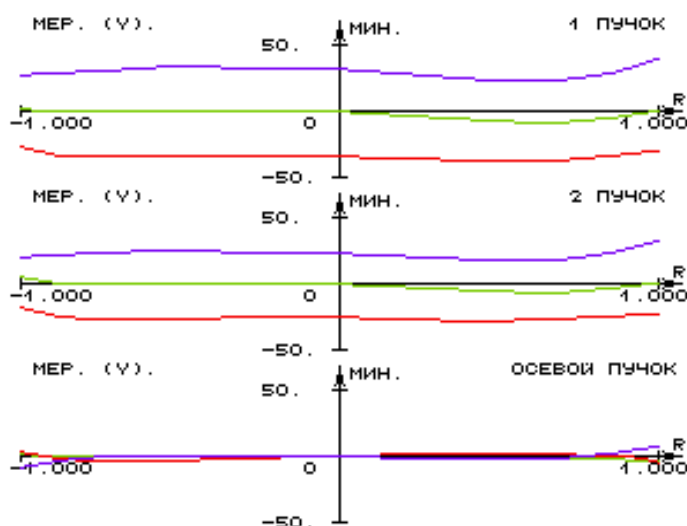
Отн. зр -коор.	Продольные аберрации (дптр)			Поперечные аберрации (гр.мнсек)		
	0	1	2	0	1	2
1.000	1.65246	2.36791	-4.67719	-.024406	-.035951	.073879
.866	.32978	-1.15191	-2.48729	-.002837	.014066	.033100
.707	.78075	-2.02255	.18080	-.005484	.022423	-.001250
.500	.86442	-2.80491	1.77164	-.004293	.022133	-.012645
.000	.00000	-4.28980	1.99405	.000000	.000000	.000000

Tg' *100	Волновые аберрации (дл. волн)			Неизопл. (%)	H ЗР (tg*100)
	0	1	2		
-.481	-.1384	.4012	.0915	-.0103	113.3893
-.417	-.1032	.4112	-.1019	-.0582	85.4242
-.341	-.0748	.3204	-.1583	-.0678	62.5543
-.241	-.0275	.1903	-.1024	-.0464	40.4520
.000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000



Аберрации внеосевых пучков:

Вых. координаты		Поперечные аберрации в (гр.мнсек)		
Канон.	(мм)	0	1	2
Меридиональное сечение			Пучок 1	У= - .3125
1.000	-.85	.003888	-.293189	.395830
.866	-.78	-.050220	-.331967	.290930
.707	-.70	-.080296	-.362291	.240904
.500	-.59	-.064651	-.360577	.245790
.000	-.32	.000000	-.321898	.325515
-.500	-.06	.012210	-.324995	.342241
-.707	.05	.003066	-.332109	.315574
-.866	.13	.000073	-.323307	.284096
-1.000	.20	.033275	-.264151	.280762
Меридиональное сечение			Пучок 2	У= -.2500
1.000	-.78	.012094	-.215192	.334014
.866	-.71	-.031124	-.240060	.232128
.707	-.63	-.060758	-.264456	.180148
.500	-.53	-.051991	-.265290	.180848
.000	-.29	.000000	-.245390	.244206
-.500	-.04	.011524	-.260362	.261617
-.707	.06	.010209	-.260451	.242381
-.866	.14	.011956	-.242459	.213634
-1.000	.20	.055962	-.165904	.212079



Уточним увеличение микроскопа и диаметр выходного зрачка:

$$\bar{\Gamma} = 389,57^x;$$

$$D' = 0,96 \text{ мм.}$$

Анализ качества изображения:

Качество изображения на оси, на краю поля и на зоне вполне удовлетворительное только для основной длины волны, а для других длин волн большой хроматизм увеличения.

Работа №2

«Простая телескопическая система»

Цель работы: приобретение практических навыков габаритного расчета и анализа аберраций простой зрительной трубы.

1. Задание для работы

В соответствии с индивидуальным заданием (таблицы 2.1 и 2.2) необходимо:

1. Исходя из заданных характеристик телескопической системы, выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний объектива и окуляра, длины трубы, угловых полей в пространстве предметов и изображений, размеров входного и выходного зрачков, их положений в системе, размеры полевой диафрагмы, диаметров объектива и окуляра, размеров граней призмы.

2. По полученным данным подобрать объектив и окуляр из каталогов оптических систем программы «ОПАЛ».

3. Составить телескопическую систему и определить расстояния между компонентами.

4. Выполнить построение хода апертурного, главного и двух наклонных лучей.

5. Определить аберрации простой зрительной трубы.

2. Краткая теория

Телескопические системы, или зрительные трубы составляют большую группу оптических приборов: астрономических наблюдательных телескопов, геодезических, стереоскопических, контрольно-измерительных приборов, биноклей, прицелов, дальномеров и т.п.

Телескопическая система предназначена для наблюдения удаленных предметов. Пучки лучей, входящие в телескопическую систему, можно принять за параллельные, т.к. входные зрачки значительно меньше расстояний до предметов, наблюдаемых в эти приборы. Поэтому числовая апертура в пространстве предметов равна нулю:

$$A = n \cdot \sin|\sigma_A| = 0. \quad (2.1)$$

Телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Для устранения напряжения аккомодации необходимо, чтобы изображение, создаваемое системой, находилось на бесконечности. Поэтому числовая апертура в пространстве изображений также равна нулю:

$$A' = n' \cdot \sin|\sigma_A'| = 0. \quad (2.2)$$

Выходящие пучки лучей должны быть параллельными.

Простые зрительные трубы состоят из двух компонентов: объектива и окуляра.

Для того, чтобы параллельный пучок лучей, попавший в телескопическую систему, вышел из нее параллельным необходимо совместить задний фокус объектива с передним фокусом окуляра. При этом оптический интервал Δ - расстояние между точкой F'_1 заднего фокуса объектива и точкой F_2 переднего фокуса окуляра – равнялся нулю:

$$\Delta = 0. \quad (2.3)$$

В системах с таким ходом лучей фокусное расстояние равно бесконечности, а оптическая сила равна нулю, и они также называются афокальными. Телескопические системы можно использовать не только для наблюдения удаленных предметов, но и в качестве коллимирующих систем для формирования излучения лазеров, а также как устройство для изменения увеличений (вращающиеся телескопические системы).

Для телескопической системы видимое Γ_T , линейное β , угловое γ и продольное α увеличения являются постоянными величинами, не зависящими от положения предмета и связанными друг с другом следующими зависимостями:

$$\beta = \frac{n}{n' \Gamma_T} = const \quad (2.4)$$

$$\gamma = \Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = const \quad (2.5)$$

$$\alpha = \frac{n}{n' \Gamma_T^2} = const \quad (2.6)$$

При видимом увеличении $\Gamma_T \neq 1$ происходит искажение видимого через зрительную трубу оптического изображения, т.к. увеличение $\beta \neq \alpha$. При $\Gamma_T > 1$ продольное увеличение $\alpha < \beta$, и пространственное изображение будет представляться сжатым в осевом направлении. Такое искажение перспективы есть результат невыполнения условия естественного впечатления $\Gamma_T = 1$. При этом условии $\beta = \alpha$ и искажение отсутствует. Простые телескопические системы, выполненные по схемам Кеплера и Галилея, представлены на рисунке 2.1.

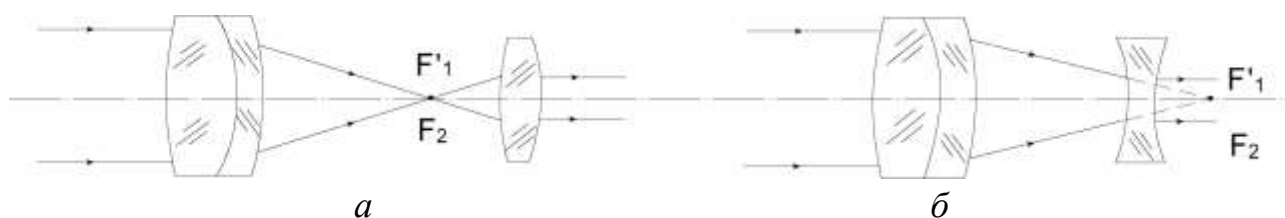


Рис. 2.1. Схемы простых телескопических систем. а) Зрительная труба Кеплера. б) Зрительная труба Галилея.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение Γ_T , угловое поле в пространстве предметов 2ω , диаметр выходного зрачка D' . другими важными характеристиками являются длина системы, удаление выходного зрачка a'_p (или от последней поверхности окуляра S'_p), коэффициент виньетирования, угловая разрешающая способность φ .

Габаритный расчет трубы Кеплера

В телескопической системе Кеплера фокусные расстояния объектива и окуляра положительные ($f'_1 > 0$, $f'_2 > 0$), поэтому видимое увеличение $\Gamma_T = -\frac{f'_1}{f'_2} < 0$ и изображение перевернутое. Труба Кеплера имеет действительное промежуточное изображение, расположенное в задней фокальной плоскости объектива и совпадающей с ней передней фокальной плоскостью окуляра. В этой же плоскости расположено визирное устройство (сетка, шкала), оправа которой служит полевой диафрагмой. Достоинством зрительной трубы Кеплера является использование сетки с делением и отсутствие виньетирования.

Апертурная диафрагма совпадает с оправой объектива или вынесена вперед, там же расположен входной зрачок. Положение выходного зрачка определяется ходом главного луча, а его размер – ходом апертурного луча. В визуальных телескопических системах глаз наблюдателя совмещен с выходным зрачком системы. На рисунке 2.2 представлена оптическая схема с ходом лучей трубы Кеплера из тонких компонентов при двух положениях входного зрачка.

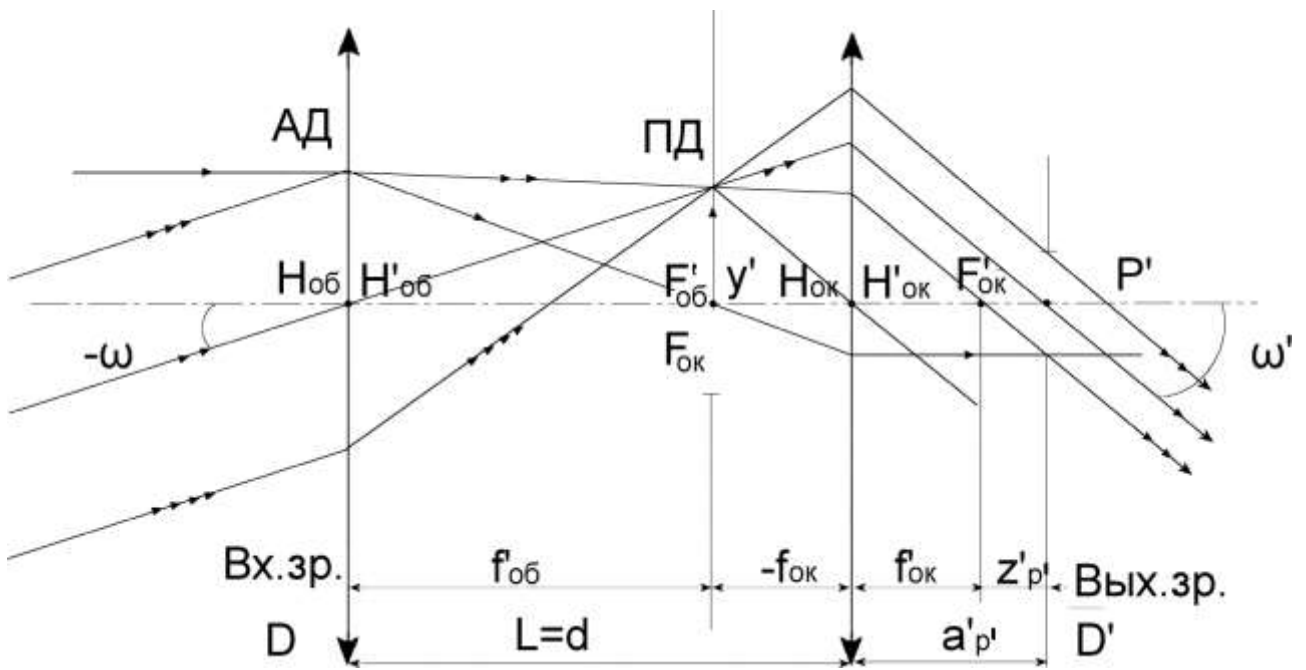


Рис. 2.2. а) Ход лучей в трубе Кеплера при $a_p = 0$.

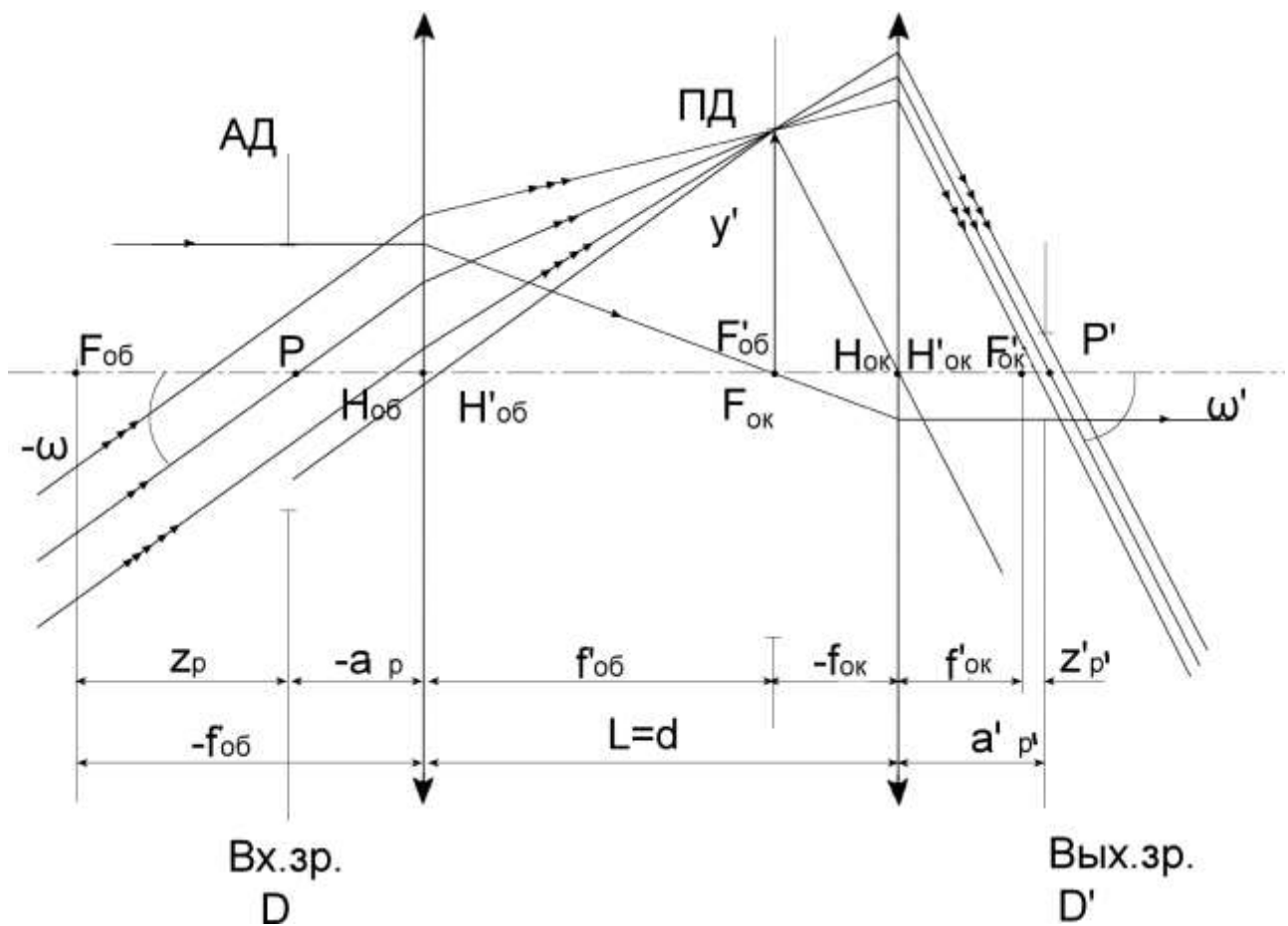


Рис. 2.2. б) Ход лучей в трубе Кеплера при $a_p \neq 0$ и виньетировании 50%.

Основные формулы для габаритного расчета трубы Кеплера

1. Видимое увеличение:

$$\Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{-D}{D'} = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (2.7)$$

2. Расстояние между компонентами:

$$d = f'_1 + f'_2. \quad (2.8)$$

3. Размер полевой диафрагмы:

$$D_{\text{пд}} = 2f'_1 \cdot tg\omega = 2f'_2 \cdot tg\omega'. \quad (2.9)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{z_p}{\Gamma_T^2}. \quad (2.10)$$

где z_p - расстояние от переднего фокуса объектива до входного зрачка.

Затем определяем удаление выходного зрачка от совмещенных главных плоскостей окуляра $a'_{p'}$:

$$a'_{p'} = f'_2 + z'_{p'}. \quad (2.11)$$

5. Определение диаметров объектива и окуляра:

$$D_{об} = 2(a_p tg\omega + m), \quad (2.12)$$

$$D_{ок} = 2(a'_p tg\omega' + m'), \quad (2.13)$$

где a_p - расстояние от совмещенных главных плоскостей объектива до входного зрачка;

m - ордината крайнего луча наклонного пучка лучей во входном зрачке

m' - ордината крайнего луча наклонного пучка лучей в выходном зрачке

При этом коэффициент виньетирования определяется выражением:

$$R_V = \frac{D - \bar{D}}{D}, \quad (2.14)$$

где D - диаметр входного зрачка;

\bar{D} - ширина наклонного пучка лучей, измеренная в плоскости входного зрачка.

$$\bar{D} = 2m, \quad (2.15)$$

$$|\Gamma_T| = \frac{m}{m'}. \quad (2.16)$$

6. Разрешающая способность в радианах, согласно дифракционной теории, определяется выражением:

$$\varphi = \frac{1,22\lambda}{D}. \quad (2.17)$$

Если принять $\lambda = 0,000556 \text{ мм}$ и осуществить переход от радиан к секундам, то:

$$\varphi = \left(\frac{140}{D} \right)'' . \quad (2.18)$$

В этом случае контраст между дифракционными изображениями точек составляет 22,5%. Этот критерий используется для приборов серийного и массового изготовления. По астрономическому критерию глаз способен различать контраст порядка 5%, тогда:

$$\varphi = \left(\frac{120}{D} \right)'' . \quad (2.19)$$

Последняя формула используется для определения разрешающей способности точных приборов.

7. Угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза:

$$\varphi_{\text{эл}} = \frac{60''}{\Gamma_T}. \quad (2.20)$$

8. Необходимое перемещение окуляра для компенсации недостатков зрения:

$$\Delta = \frac{f_2'^2}{\frac{1000}{A_D} + z_{p'}'}, \quad (2.21)$$

где A_D - аметропия глаза в диоптриях;

$z_{p'}'$ - расстояние от заднего фокуса окуляра до выходного зрачка.

Далее рассмотрим телескопическую систему Галилея. Фокусное расстояние объектива в трубе Галилея положительное ($f_1' > 0$), а фокусное расстояние окуляра отрицательное ($f_2' < 0$), видимое увеличение

$\Gamma_T = -\frac{f_1'}{f_2'} > 0$ и система дает прямое изображение.

Апертурной диафрагмой в системе «Труба + глаз» является зрачок глаза наблюдателя. Он же является выходным зрачком системы. Поскольку в

трубе нет действительного промежуточного изображения, то отсутствует полевая диафрагма, и, следовательно, нет визирного устройства – сетки с делениями. Поэтому такую телескопическую систему можно использовать в театральных, туристических биноклях, в качестве коллимирующих систем лазерного излучения (обратные системы).

На рисунке 5.3 представлена оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

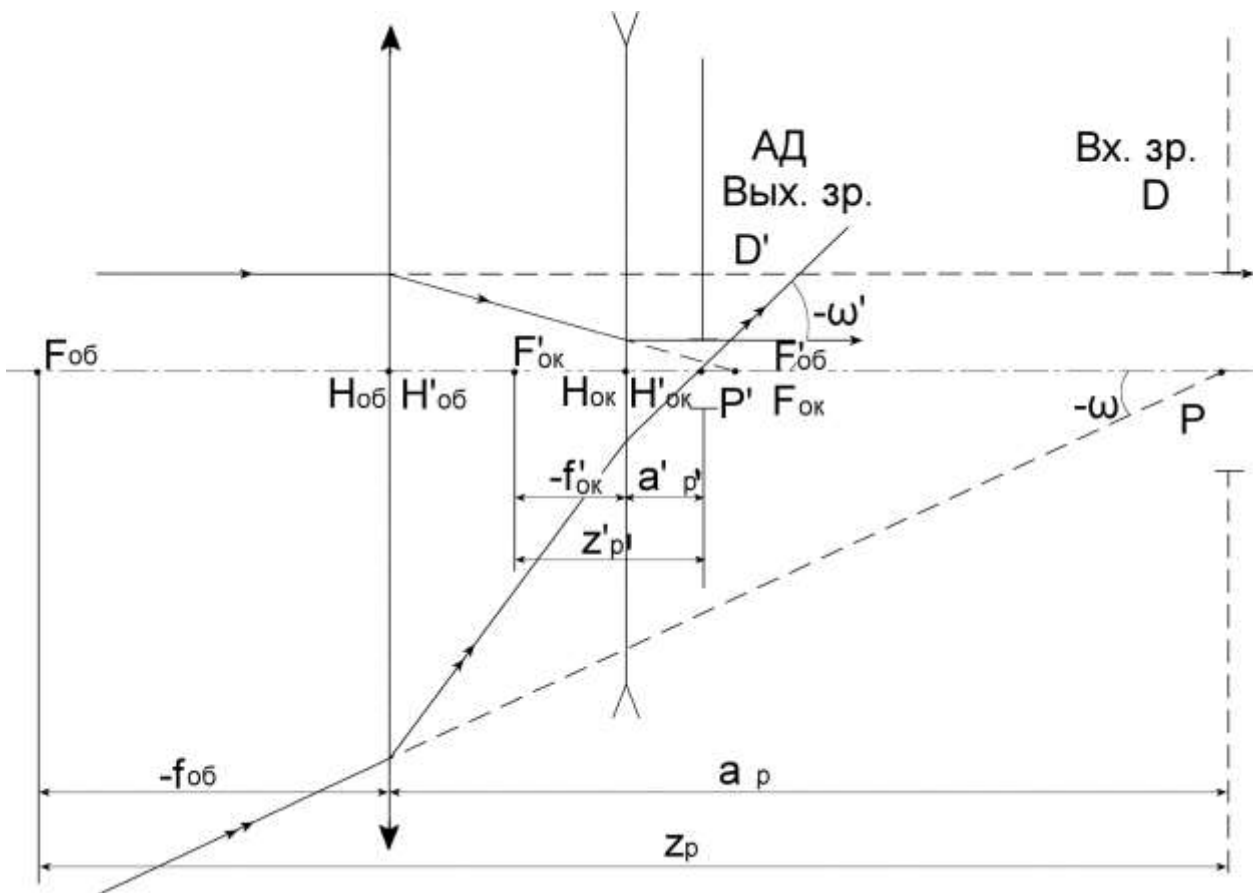


Рис.2.3. Оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

Размер и положение зрачка глаза наблюдателя определяют размер и положение апертурной диафрагмы. Отрезок a'_p является исходным данным для габаритного расчета трубы Галилея.

Положение входного зрачка a_p находим по формуле:

$$a_p = a'_p \Gamma_T^2 + f'_1 (\Gamma_T - 1). \quad (5.22)$$

Из формулы следует, что входной зрачок мнимый и всегда располагается за телескопической системой.

Угловое поле в трубе Галилея ограничивается виньетирующей диафрагмой, роль которой выполняет оправа объектива. В зависимости от

степени виньетирования угловое поле в пространстве предметов можно рассчитать по следующим формулам:

а) при отсутствии виньетирования:

$$tg\omega = \frac{D_{об} - D}{2a_p}; \quad (2.23)$$

б) при виньетировании 50%:

$$tg\omega = \frac{D_{об}}{2a_p}; \quad (2.24)$$

в) при виньетировании 100%:

$$tg\omega = \frac{D_{об} + D}{2a_p}. \quad (2.25)$$

При виньетировании 50% диаметры объектива и окуляра определяются выражениями:

$$D_{об} = D_{од} = 2a_p \cdot tg\omega, \quad (2.26)$$

$$D_{ок} = 2a'_p \cdot tg\omega'. \quad (2.27)$$

3. Указания для выполнения лабораторной работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам рассчитать фокусные расстояния объектива f'_1 и окуляра f'_2 , угловые поля в пространстве предметов 2ω и изображений $2\omega'$, положения и размеры входного и выходного зрачков (a_p , D , a'_p , D').

Определить длину системы d , размер полевой диафрагмы (в трубе Кеплера) $D_{пд}$, относительное отверстие объектива D/f'_1 , угловой предел разрешения, определяемый дифракцией, и угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза, диаметры объектива и окуляра.

3.2. По фокусному расстоянию объектива f'_1 , относительному отверстию D/f'_1 и угловому полю 2ω подобрать объектив. В качестве объективов в простых зрительных трубах часто используются склеенные объективы. Конструктивные данные этих объективов можно найти в книге М.М. Русинова «Габаритные расчеты оптических систем», М., 1963, а также в

«Методических указаниях по габаритному расчету и выбору компонентов телескопических систем» Л., 1989, ИТМО.

Двухлинзовые склеенные объективы с различными фокусными расстояниями целесообразно применять при следующих относительных отверстиях:

f'_1 , мм	100	≤ 300	≤ 500	≤ 1000
D/f'_1 , не более	1:4	1:5	1:6	1:10

Угловое поле объектива не превышает $10-12^\circ$ при малых фокусных расстояниях и $7-10^\circ$ при больших.

Из каталога следует выбирать объективы с тем же относительным отверстием, что и расчетное, или же с несколько большим.

Угловое поле выбранного объектива должно быть равно или больше рассчитанного углового поля.

Фокусное расстояние выбранного объектива обычно не совпадает с рассчитанным, поэтому делают пересчет объектива. Для этого определяют коэффициент пересчета $K_{пер}$, равный отношению фокусного расстояния рассчитанного объектива к фокусному расстоянию объектива каталога:

$$K_{пер} = \frac{f'_{расчет}}{f'_{каталог}} \quad (2.28)$$

Величины радиусов, толщин, фокусных расстояний, отрезков S_H , S'_H , S_F и S'_F умножаются на этот коэффициент. Желательно, чтобы коэффициент был в пределах от 0,5 до 2,5.

Расстояние до входного зрачка S_p у выбранного объектива должно быть равным или большим, чем у рассчитанного объектива. Следует также сравнить световые диаметры объектива из каталога и рассчитанного. Световой диаметр выбранного объектива должен быть больше или равен диаметру расчетного объектива.

Конструктивные данные и чертеж объектива с указанием фокусных расстояний, отрезков S_H , S'_H , S_F и S'_F , главных плоскостей, расстояний между ними приводится в отчете.

3.3. Окуляр. При расчете зрительной трубы Кеплера окуляры выбирают из каталога по угловому полю $2\omega'$ и фокусному расстоянию.

Угловое поле $2\omega'$ окуляра каталога должно равняться или быть немного больше $2\omega'$ расчетного.

Если рассчитанное фокусное расстояние окуляра отличается от фокусного расстояния окуляра каталога или библиотеки «Орал», то для данной лабораторной работы нужно взять окуляр с ближайшим фокусным расстоянием, а фокусное расстояние объектива пересчитать сохранив Γ_T системы (формула 2.7)

Конструктивные данные и чертеж окуляра с указанием фокусных расстояний, отрезков S_F и S'_F , главных плоскостей, расстояний между ними приводятся в отчете.

3.4. При расчете трубы Галилея входной зрачок расположен за телескопической системой и является мнимым. Так как в каталоге ограничен выбор объективов с внесенным входным зрачком, то условие $a_{\text{каталог}} \geq a_{\text{расчет}}$ выполнить трудно. В этом случае можно выбрать объектив с большим относительным отверстием, чтобы диаметр выбранного объектива был равен или больше диаметра рассчитанного объектива.

Отрицательную линзу, используемую в качестве окуляра трубы Галилея, следует рассчитать самостоятельно. Зная диаметр окуляра, нужно задать толщину линзы равной или большей, чем $0,1D$. Линзу можно выполнить из стекла К8, при этом ее форма – плосковогнутая, либо двояковогнутая $r_1 = -r_2$. Радиусы кривизны и положения главных плоскостей определяется по формулам:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}, \quad (2.29)$$

$$S'_F = f' \left(1 - \frac{(n-1)d}{nr_1}\right), \quad (2.30)$$

$$S_F = -f' \left(1 + \frac{(n-1)d}{nr_2}\right), \quad (2.31)$$

$$S'_H = S'_F - f', \quad (2.32)$$

$$S_H = S_F - f. \quad (2.33)$$

3.5. С учетом виньетирования, заданного в работе, строится ход лучей в масштабе. Построить следует апертурный, главный и два наклонных луча.

3.6. Расчет призм.

Призма или призмённые системы вводятся в простую зрительную трубу Кеплера для получения прямого изображения, сокращения габаритов оптической системы, компенсации вращения изображения, получения

заданного угла между оптическими осями объектива и окуляра, который должен обеспечить удобное положение головы наблюдателя.

Особенность габаритного расчета оптической системы с призмами состоит в том, что необходимо определить положение и габариты призм. Для этого необходимо: 1) знать задний фокальный отрезок объектива S'_{F_1} ; 2) световой диаметр объектива; 3) размер полевой диафрагмы; 4) передний фокальный отрезок окуляра S_{F_2} и фокусное расстояние окуляра; 5) учесть, что в процессе расчета призмы заменяются эквивалентными плоскопараллельными пластинами, которые затем редуцируются, т.е. заменяются эквивалентными воздушными пластинами, причем:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (2.34)$$

Такие замены возможны, если первая и последняя грани призмы перпендикулярны к оптической оси;

Положение призмы в заданном коническом пучке зависит от различных конструктивных требований.

Для получения наименьших габаритов призмы ее нужно помещать ближе к узкой части светового конуса. Когда призма создает перископичность, ее положение определяется необходимостью обеспечения значения перископичности. Заднюю грань призмы не следует располагать слишком близко к передней фокальной плоскости окуляра, т.к. все дефекты стекла (пузыри, мелкие царапины, пылинки) видны и мешают наблюдению. Оптимальное положение призмы, определяемое отрезком z , будет таким, при котором ее последняя поверхность размещается перед окуляром так, что изображение поверхности в поле окуляра получается вне пределов аккомодации глаза наблюдателя:

$$z \geq 0,01 f_2'^2 \quad (2.35)$$

Выбрав положение выходной грани, проводят вспомогательную прямую под углом γ к оси до пересечения с прямой, соединяющей край объектива и край сетки (рисунок 2.4). Угол γ находим по формуле:

$$\text{tg} \gamma = \frac{n}{2k}, \quad (2.36)$$

где n – показатель преломления стекла призмы;

k – коэффициент, характеризующий тип призмы, он определяется из справочника.

Добавляем $1 \div 2$ мм на крепление и юстировку призмы и снимаем с чертёжа $\frac{D_{\text{пр}}}{2}$. Затем определяем длину хода луча в призме:

$$d = d = k \cdot D_{\text{призмы}}. \quad (2.37)$$

Толщина редуцированной воздушной пластины равны:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (2.38)$$

Ее сравнивают для проверки с толщиной пластинки, измеренной по чертежу.

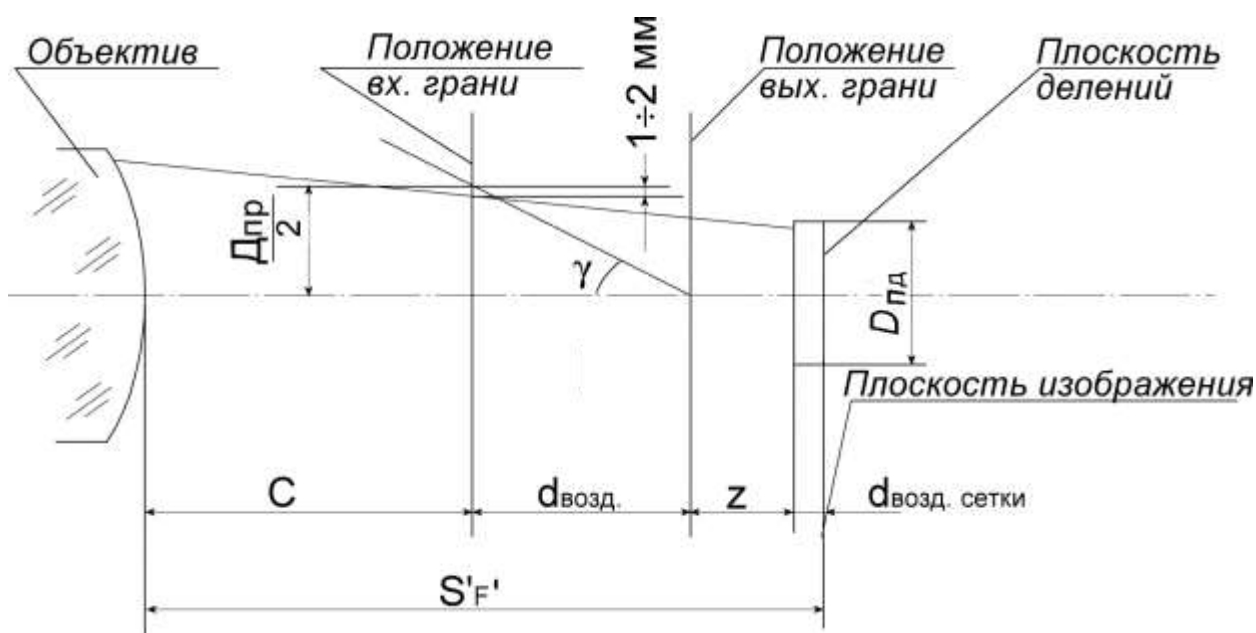


Рисунок 2.4. Определение размеров граней призмы.

Расстояние от последней поверхности объектива до входной грани призмы определяется по формуле:

$$c = S'_{F_1} - d_{\text{возд.сетки}} - z - d_{\text{возд}}. \quad (2.39)$$

Если изображение находится на первой поверхности сетки (т.е. плоскость делений на 1-ой поверхности), отрезок определяется, по формуле:

$$c = S'_{F_1} - z - d_{\text{возд}}. \quad (2.40)$$

Как только будут определены диаметры пучков, которые должны пропустить призмы, остальные размеры отражательных призм определяются из справочника. Затем приводится чертёж призмы со всеми размерами.

3.7. Далее необходимо определить все расстояния между компонентами системы и представить оптическую схему простой зрительной трубы. Пример оформления оптической схемы показан на рисунке 2.5.

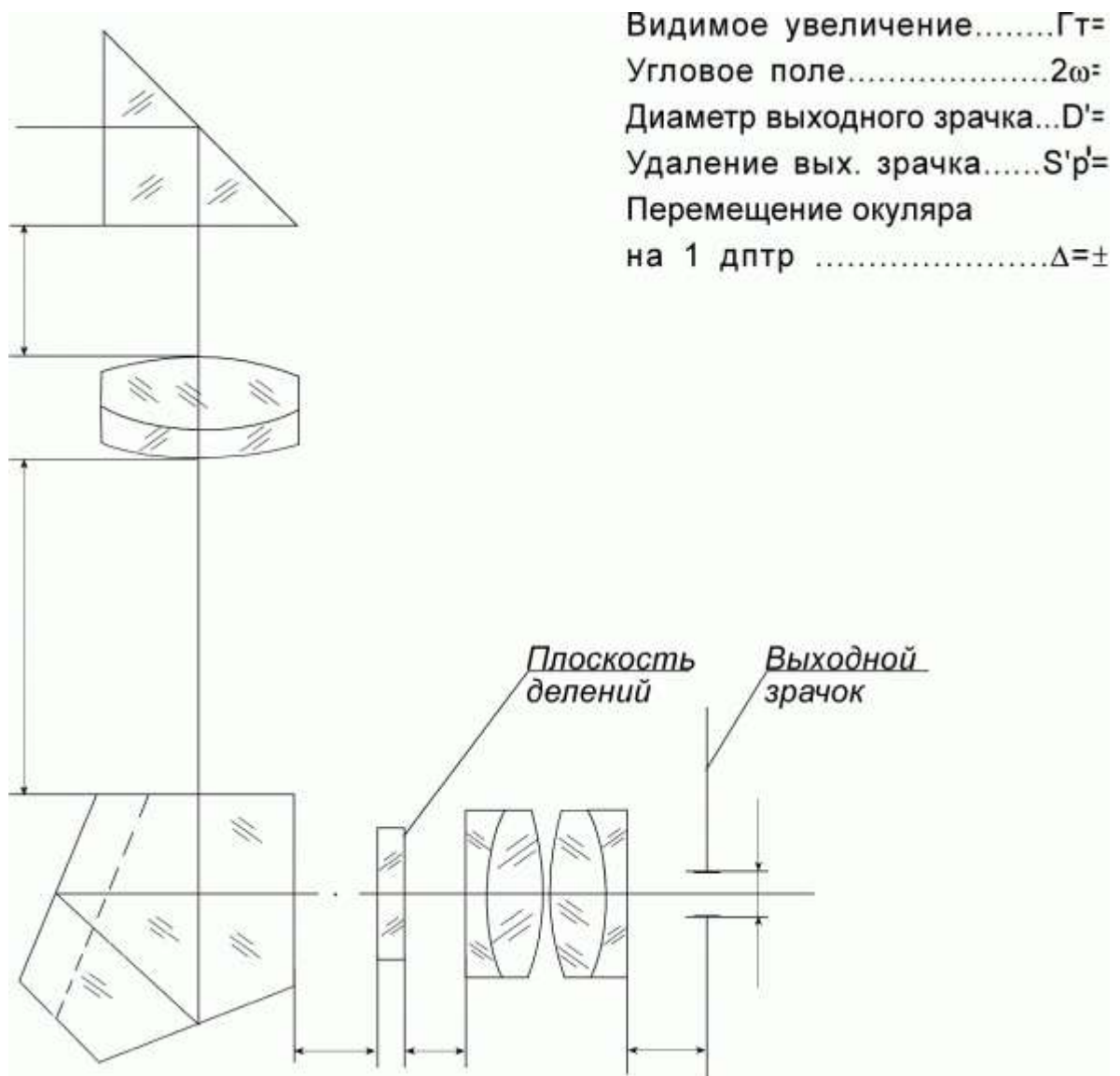


Рисунок 2.5. Оптическая схема зрительной трубы Кеплера.

3.8. По программе автоматизированного расчета оптики «ОПАЛ» определяются aberrации всей зрительной трубы, приводятся таблицы (таблица 2.3 – 2.6) и графики aberrаций (рисунок 2.6 - 2.8.).

Таблица 2.3

Аберрации точки на оси

m отн	e				F'		C'		$S'_{F'} - S'_{C'}$ дптр
	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	W дл. волн	η %	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	
1.000	-0.381	-2'31''	-	0.323	-1.079	-7'07''	0.125	0'49''	-1.204
0.707	-0.188	-0'53''	-	0.160	-0.879	-4'06''	0.313	1'28''	-1.192
0.000	0	0	-	0	-0.684	0	0.497	0	-1.181

Таблица 2.4

Аберрации точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	ω'_{zl}	L'_m	L'_s	$\Delta \%$	$\omega'_{F'} - \omega'_{C'}$
-11°	107.0	6.734	-28° 58' 23''	2.010	-1.486	9.531	1'04''
-8°	107.0	6.959	-20° 57' 00''	1.155	-0.745	4.751	0'25''
0°	107.0	7.069	0	0.000	0.000	0	0'0''

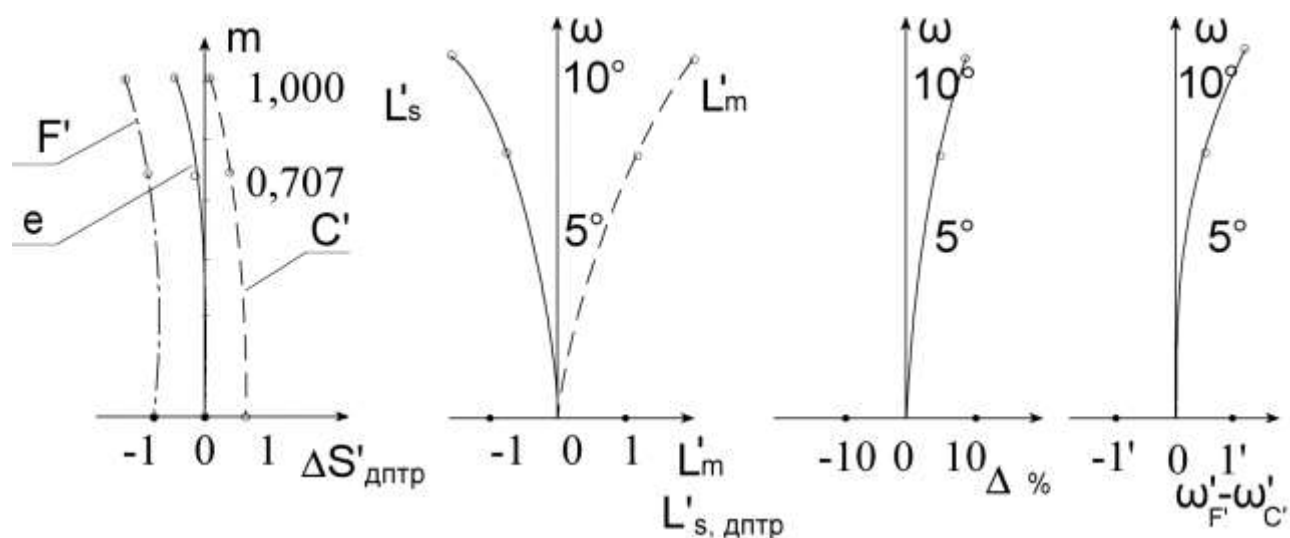


Рисунок 2.6. Графики аберраций бинокля галилеевского БГШ-3.

Таблица 2.5

Аберрации широкого наклонного пучка лучей в меридиональном сечении

m	$\omega = -11^\circ$	$\omega = -8^\circ$
	$\Delta\omega'$	$\Delta\omega'$
1.000	3'46''	-1'36''
0.707	2'14''	0'24''
0	0	0
-0.707	-1'30''	-4'06''
-1.000	-2'26''	-6'34''

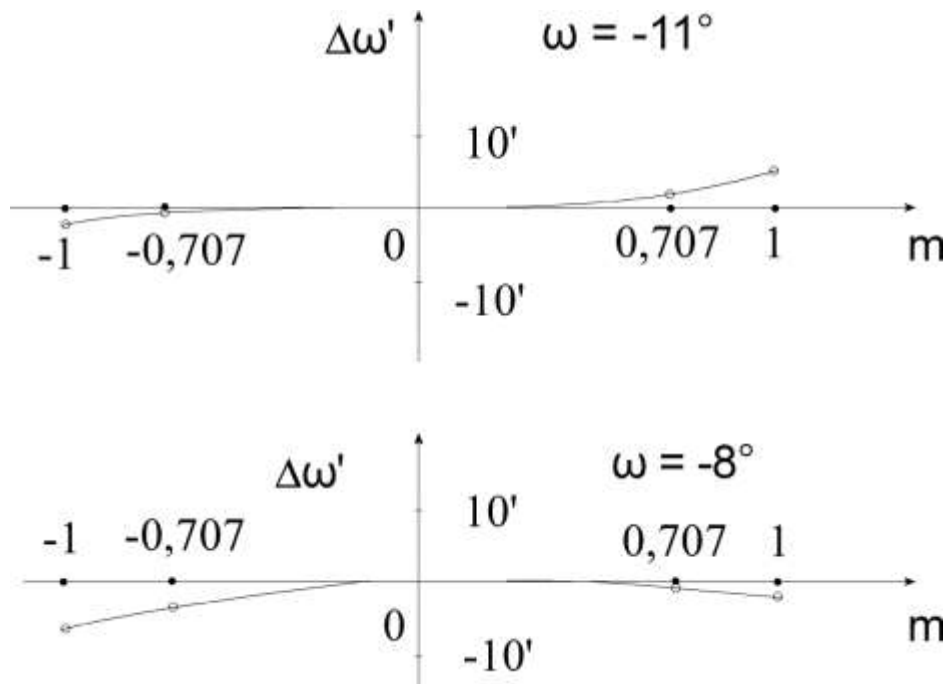


Рисунок 2.7. Графики аберраций бинокля галилеевского БГШ-3.

Таблица 2.6

Аберрации широкого пучка лучей в сагиттальном сечении

M	$\omega = -11^\circ$		$\omega = -8^\circ$	
	$\Delta\psi'$	$\Delta\omega'$	$\Delta\psi'$	$\Delta\omega'$
1.000	-13'01''	-6'10''	-7'42''	-4'16''
0.707	-8'09''	-3'04''	-4'29''	-2'07''

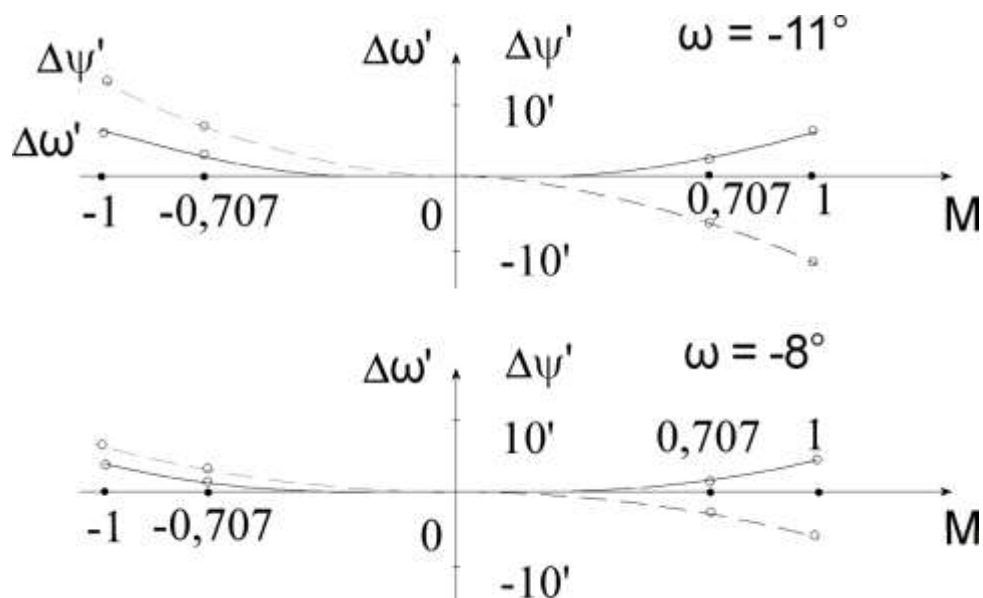


Рисунок 2.8. Графики aberrаций бинокля галилеевского БГШ-3.

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

1. Исходные данные
2. Габаритный расчет простой телескопической системы
3. Конструктивные данные и чертежи объектива и окуляра
4. Схема хода лучей
5. Расчет призм и чертежи для определения размеров граней призм
6. Оптическая схема всей системы с указанием нужных расстояний
7. Таблицы и графики aberrаций телескопической системы
8. Выводы по работе: соответствие полученных характеристик заданию и анализ качества изображения.

5. Литература

5.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. –446с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]

Режим доступа:

http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=147

5.2 Прикладная оптика: Учебное пособие / Л.Г.Бибчук и др. Под ред. Н.П. Закамова. 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 320с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]

Режим доступа:
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=148

5.3. Цуканова Г.И., Багдасарова О.В., Бахолдин А.В., Карпов В.Г., Карпова Г.В. Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Прикладная оптика». Часть 2. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.-СПб: СПб ГУИТМО, 2009. –124с.:ил. [Электронный ресурс]— Электрон. версия печ. публикации — Режим доступа: <http://aco.ifmo.ru/student/>

5.4. Теория оптических систем. Закамов Н.Г. и др М. Машиностроение, 1992г

5.5. Справочник конструктора оптико-механических приборов Панов В.А. и др. Л. Машиностроение 1980г.

6. Задание для работы

Таблица 2.1

Труба Кеплера с призмами

№ вар.	Γ_T	D'	2ω	a_p	Относ. отв. объектива и окуляра	$2\omega'$	D	Примечание
1.	$3,5^x$	5	10°	0	1:7	-	-	Система Малафеева-Порро I рода после объектива
2.	4^x	5	10°	-10	1:7	-	-	
3.	$4,2^x$	5	10°	-15	1:7	-	-	
4.	$4,4^x$	4	10°	-20	1:7	-	-	
5.	$4,5^x$	4	10°	0	1:6	-	-	
6.	$4,6^x$	4	10°	-10	1:6	-	-	
7.	5^x	4	8°	-15	1:6	-	-	
8.	$5,4^x$	5	8°	-20	1:5	-	-	
9.	$5,6^x$	5	$7^\circ 30'$	-30	1:5	-	-	

10.	6 ^x	5	7°30'	-10	1:5	-	-	
11.	5,8 ^x	5	7°	-20	1:5	-	-	
12.	5,6 ^x	4	8°	-25	1:6	-	-	
13.	5,7 ^x	4	7°30'	-20	1:5	-	-	
14.	5,5 ^x	5	8°	-25	1:5	-	-	
15.	5,9 ^x	5	7°	-15	1:4	-	-	
16.	5,8 ^x	4	8°	-25	1:6	-	-	
17.	6°	6	7°30'	-15	1:5	-	-	
18.	4 ^x	5	-	0	1:6	38°	-	Призма Шмидта с крышей (В _{кР} -45) после объектива
19.	4,2 ^x	5	-	-10	1:6	40°	-	
20.	4,4 ^x	5	-	-30	1:6	40°	-	
21.	4,5 ^x	4,5	-	0	1:5	40°	-	
22.	4,6 ^x	4,5	-	0	1:5	40°	-	
23.	4,7 ^x	4,5	-	0	1:6	45°	-	
24.	4,8 ^x	4	-	-10	1:5	45°	-	
25.	4,9 ^x	4	-	-20	1:4	40°	-	
26.	5 ^x	4	10°	-15	1:4	-	-	
27.	5,1 ^x	4	10°	0	1:5	-	-	
28.	5,2 ^x	4	10°	0	1:6	-	-	
29.	5,3 ^x	4	8°	0	1:4	-	-	
30.	5,4 ^x	4	8,5°	-10	1:5	-	-	
31.	5,3 ^x	4	9°	-5	1:5	-	-	
32.	5,2 ^x	4	10°	-10	1:5	-	-	
33.	5,5 ^x	4	9°	-25	1:4	-	-	
34.	5,6 ^x	-	8°	-30	1:4	-	25	
35.	5,7 ^x	-	8°	-20	1:5	-	25	
36.	5,8 ^x	-	8°	-25	1:6	-	25	
37.	5,9 ^x	-	7,5°	-30	1:5	-	30	
38.	6 ^x	-	6°	-15	1:5	-	30	
39.	6,1 ^x	-	6°	-20	1:5	-	30	
40.	6 ^x	-	6°	-40	1:5	-	30	
41.	5,9 ^x	4	7,5°	-30	1:4	-	-	
42.	5,8 ^x	4	7,5°	-20	1:4	-	-	
43.	6,5 ^x	4	6°	-15	1:5	-	-	
44.	6,5 ^x	4	6°	-15	1:5	-	-	
45.	7 ^x	5	6°	-30	1:6	-	-	

46.	5 ^x	5	9°	-25	1:6	-	-	Головная прямоуголь- ная призма, после объектива – пентапризма с крышей
47.	4,5 ^x	5	10°	-20	1:6	-	-	
48.	3,5 ^x	4	8°	-25	1:5	-	-	
49.	4,5 ^x	5	10°	-20	1:6	-	-	
50.	3,5 ^x	4	8°	-10	1:5	-	-	
51.	4 ^x	4	10°	-20	1:7	-	-	
52.	4,5 ^x	5	10°	-25	1:6	-	-	
53.	5 ^x	5	8°	-20	1:4	-	-	
54.	5,5 ^x	4	9°	-25	1:5	-	-	
55.	5,2 ^x	5	8,5°	-25	1:6	-	-	
56.	4,8 ^x	5	8°	-30	1:5	-	-	
57.	5 ^x	4	7,5°	-25	1:4	-	-	
58.	4,5 ^x	5	7°	-20	1:5	-	-	
59.	4,8 ^x	4	8°	-25	1:6	-	-	
60.	5 ^x	4	8,5°	-30	1:5	-	-	

Таблица 2.2.

Труба Галилея

№ вар.	Γ_T	D'	2ω	a_p	Относ. отв. объектива и окуляра	$2\omega'$	D	Примечание
1.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
2.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
3.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
4.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
5.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
6.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
7.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
8.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
9.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
10.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
11.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
12.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
13.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
14.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	

15.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
16.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
17.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
18.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
19.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
20.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
21.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
22.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
23.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
24.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
25.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
26.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
27.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
28.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
29.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
30.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
31.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
32.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
33.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
34.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
35.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
36.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
37.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
38.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
39.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
40.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
41.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
42.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
43.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
44.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
45.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
46.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
47.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
48.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
49.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
50.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	

51.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
52.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
53.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
54.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
55.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
56.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
57.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
58.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
59.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
60.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	

Контрольные вопросы:

1. Какая система называется телескопической?
2. Почему переднее и заднее фокусные расстояния глаза разные по величине?
3. Принципиальные оптические схемы простых телескопических систем Кеплера и Галилея, ход осевого и наклонного пучков лучей.
4. Что такое видимое увеличение?
5. Разрешающая способность телескопических систем.
6. Чему равно «расстояние наилучшего видения» и почему оно наилучшее?
7. Основные параметры простейших телескопических систем и их связь.
8. Определение диаметров и положения входного и выходного зрачков.
9. Почему адаптация глаза с темноты на свет (со света на темноту) переходит постепенно?
10. Оценка качества изображения телескопических систем по результатам абберационного расчета на компьютере.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа «Простая телескопическая система»

Исходные данные:

$$\Gamma_T = 5,8^x; \quad D' = 5\text{мм}; \quad 2\omega = 7^\circ; \quad a_p = -20\text{мм};$$

Относительное отверстие объектива и окуляра 1:5. После объектива расположена призмная система Малафеева - Порро I рода.

Задание для работы:

1. Исходя из заданных характеристик телескопической системы, выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний объектива и окуляра, длины трубы, угловых полей в пространстве предметов и изображений, размеров входного и выходного зрачков, их положений в системе, размера полевой диафрагмы, диаметров объектива и окуляра, размеры граней призмы.
2. По полученным данным подобрать объектив и окуляр из каталогов оптических систем и библиотеки оптических систем программы «ОПАЛ».
3. Составить телескопическую систему и определить расстояния между компонентами.
4. Выполнить построение хода апертурного, главного и двух крайних лучей наклонного пучка.
5. Определить aberrации простой зрительной трубы.
6. Выполнить чертеж оптической схемы по ГОСТ 2.412-81.

Габаритный расчет простой трубы Кеплера.

1. Найдем $f'_{ок}$.

$$\frac{D'}{f'_{ок}} = \frac{1}{5} \Rightarrow f'_{ок} = 25 \text{ мм}.$$

2. Выбираем окуляр $f'_{ок} = 26\text{мм}$; $2\omega = 62^\circ$; $d=5\text{мм}$.

3. Находим $f'_{об}$.

$$\Gamma_T = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}, \quad f'_{об} = -\Gamma_T \cdot f'_{ок} = -(-5,8) \cdot 26 = 150 \text{ мм}.$$

4. Выбираем объектив. Таир-56 $f' = 150\text{мм}$; 1:2,8; $2\omega = 10^\circ$.

5. Находим диаметр входного зрачка

$$D = \Gamma_T \cdot D' = 5,8 \cdot 5 = 29 \text{ мм}.$$

6. Находим диаметр полевой диафрагмы

$$D_{\text{ПД}} = 2 \cdot f'_{\text{об}} \cdot \text{tg}\omega = 26,25 \text{ мм.}$$

7. Длина системы

$$L = f'_{\text{об}} + f'_{\text{ок}} = 150 + 26 = 176 \text{ мм.}$$

8. Расстояние между объективом и обёрнутым окуляром без призмы

$$d = S'_{F'_{\text{об}}} - S_{F_{\text{ок}}} = 88,18 - 20,77 = 67,41 \text{ мм.}$$

Графоаналитическим методом определяем диаметр светового пучка призмы, он равен $D_{\text{пр}} = 19,04$ мм. Длина хода луча в призме $d = D_{\text{пр}} \cdot k = 19,04 \cdot 4 = 76,16$.

Из конструктивных соображений задаем $z = 6,25$ мм.

Тогда $c = 67,47 - 76,16 / 1,5183 - 6,25 = 11$ мм.

где c – расстояние от последней поверхности объектива до первой поверхности призмы

Конструктивные параметры всей системы.

№ поверхности	Радиусы (r)	Осевые расстояния (d)	Марки стекла	Показатель преломления. (n_e)	Световые диаметры	Стрелки
0						
1	186,21	16,4	ТК-9	1,6199	29,04	0,57
2	-84,14	4,4	ТФ-3	1,7232	28,16	-1,19
3	2355	0,1			27,96	0,41
4	78,34	10,01	ТК-9	1,6199	27,90	1,25
5	229,6	23,2			26,34	0,38
6	26	10,6	К-8	1,5183	21,20	2,26
7	20,18	11,0			16,80	1,83
8	0	76,16	К-8	1,5183	15,00	0,00
9	0	6,25			17,04	0,00
10	0	8,8	ТФ-4	1,746	17,30	0,00
11	-28,58	3,8	БК-10	1,571	17,52	-1,38
12	30,41	13,5			17,32	1,26
13	-105,93	4,8	ТФ-2	1,678	20,76	-0,51
14	122,46	21,6	ТК-16	1,615	22,90	0,54
15	-31,92	10,0			30,36	-3,54
16	78,7	4,8	ТФ-4	1,746	31,30	1,57
17	29,51	19,5	ТК-16	1,615	30,30	4,19
18	-105,93	0,3			31,21	-1,16
19	37,58	9,2	К-8	1,5183	29,82	3,08
20	-727,8				26,89	-0,12

$S = 0$ дптр, $S' = -0.096$ дптр.

Видимое увеличение $\Gamma = 5,8$.

Угловое поле $2\omega = 10^\circ$.

Диаметр выходного зрачка 5 мм

Листов примен																																																																																		
Сторон №																																																																																		
Подп и дата	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>№</th> <th>f'</th> <th>S_F</th> <th>S'_F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>803.88</td> <td>-472.31</td> <td>776.79</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-651.46</td> <td>1056.14</td> <td>-653.51</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>187.04</td> <td>-190.19</td> <td>177.81</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>-459.83</td> <td>542.28</td> <td>-395.84</td> </tr> <tr> <td>Сист.</td> <td>150.07</td> <td>-184.08</td> <td>88.18</td> </tr> </tbody> </table>		№	f'	S_F	S'_F	1	803.88	-472.31	776.79	2	-651.46	1056.14	-653.51	3	187.04	-190.19	177.81	4	-459.83	542.28	-395.84	Сист.	150.07	-184.08	88.18	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Радиусы</th> <th>d</th> <th>Марку</th> <th>n_e</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>186.21</td> <td>16.4</td> <td>TK-9</td> <td>1.6199</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-84.14</td> <td>4.4</td> <td>TФ-3</td> <td>1.7232</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2355</td> <td>0.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>78.34</td> <td>10.1</td> <td>TK-9</td> <td>1.6199</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>229.6</td> <td>23.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>26</td> <td>10.6</td> <td>K-8</td> <td>1.5183</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>20.18</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Радиусы	d	Марку	n_e	0				1	186.21	16.4	TK-9	1.6199	2	-84.14	4.4	TФ-3	1.7232	3	2355	0.1			4	78.34	10.1	TK-9	1.6199	5	229.6	23.2			6	26	10.6	K-8	1.5183	7	20.18													
№	f'	S_F	S'_F																																																																															
1	803.88	-472.31	776.79																																																																															
2	-651.46	1056.14	-653.51																																																																															
3	187.04	-190.19	177.81																																																																															
4	-459.83	542.28	-395.84																																																																															
Сист.	150.07	-184.08	88.18																																																																															
Радиусы	d	Марку	n_e																																																																															
0																																																																																		
1	186.21	16.4	TK-9	1.6199																																																																														
2	-84.14	4.4	TФ-3	1.7232																																																																														
3	2355	0.1																																																																																
4	78.34	10.1	TK-9	1.6199																																																																														
5	229.6	23.2																																																																																
6	26	10.6	K-8	1.5183																																																																														
7	20.18																																																																																	
Взам инв. №	Инв. № дубл	<p>1. Фокусное расстояние $f' = 150$ 2. Угловое поле $2\omega = 10^\circ$ 3. Относительное отверстие 1:5</p>																																																																																
Подп и дата	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;"></td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> Объектив телескопической системы </td> <td style="width: 10%; text-align: center;">Лит</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">Масса</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">Масштаб</td> </tr> <tr> <td>Изм</td> <td>Лист</td> <td>№ док-м</td> <td>Подп</td> <td>Дата</td> <td style="text-align: center;">1:1</td> </tr> <tr> <td>Разраб.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Проб.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Т.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Инв. № подл</td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Подп</td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Дата</td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Лист</td> <td style="text-align: center;">Листов</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>									Объектив телескопической системы	Лит	Масса	Масштаб	Изм	Лист	№ док-м	Подп	Дата	1:1	Разраб.						Проб.						Т.контр.						Инв. № подл	Подп	Дата				Лист	Листов																																					
									Объектив телескопической системы		Лит	Масса	Масштаб																																																																					
Изм					Лист	№ док-м	Подп	Дата			1:1																																																																							
Разраб.																																																																																		
Проб.																																																																																		
Т.контр.																																																																																		
Инв. № подл	Подп	Дата				Лист	Листов																																																																											

Листы документа

Спецификация

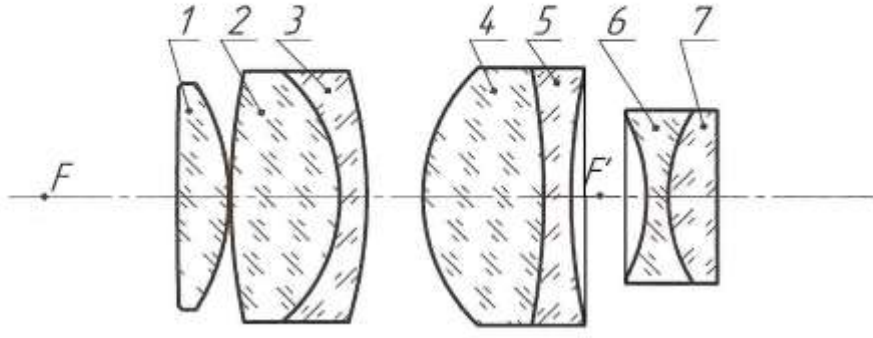
Листы и даты

Изм. № документа

Взам. инв. №

Листы и даты

Изм. № листа



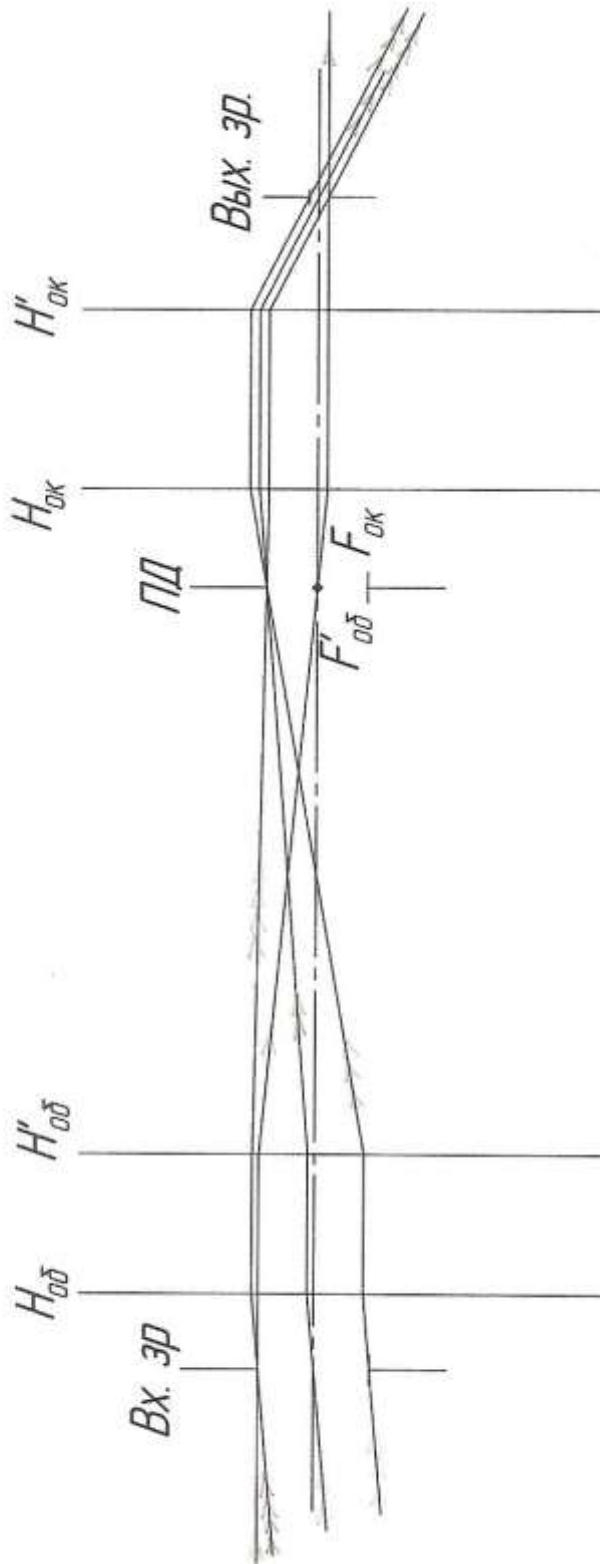
№	f'	S_F	S'_F
1	69.23	-63.44	68.93
2	1040.4	-627.74	967.46
3	193.9	-305.03	196.27
4	88.79	-53.29	65.9
5	-144.59	237.82	-144.82
6	-140.96	79.52	-147.36
7	163.39	-256.73	158.35
Сист.	25.86	-23.71	20.77

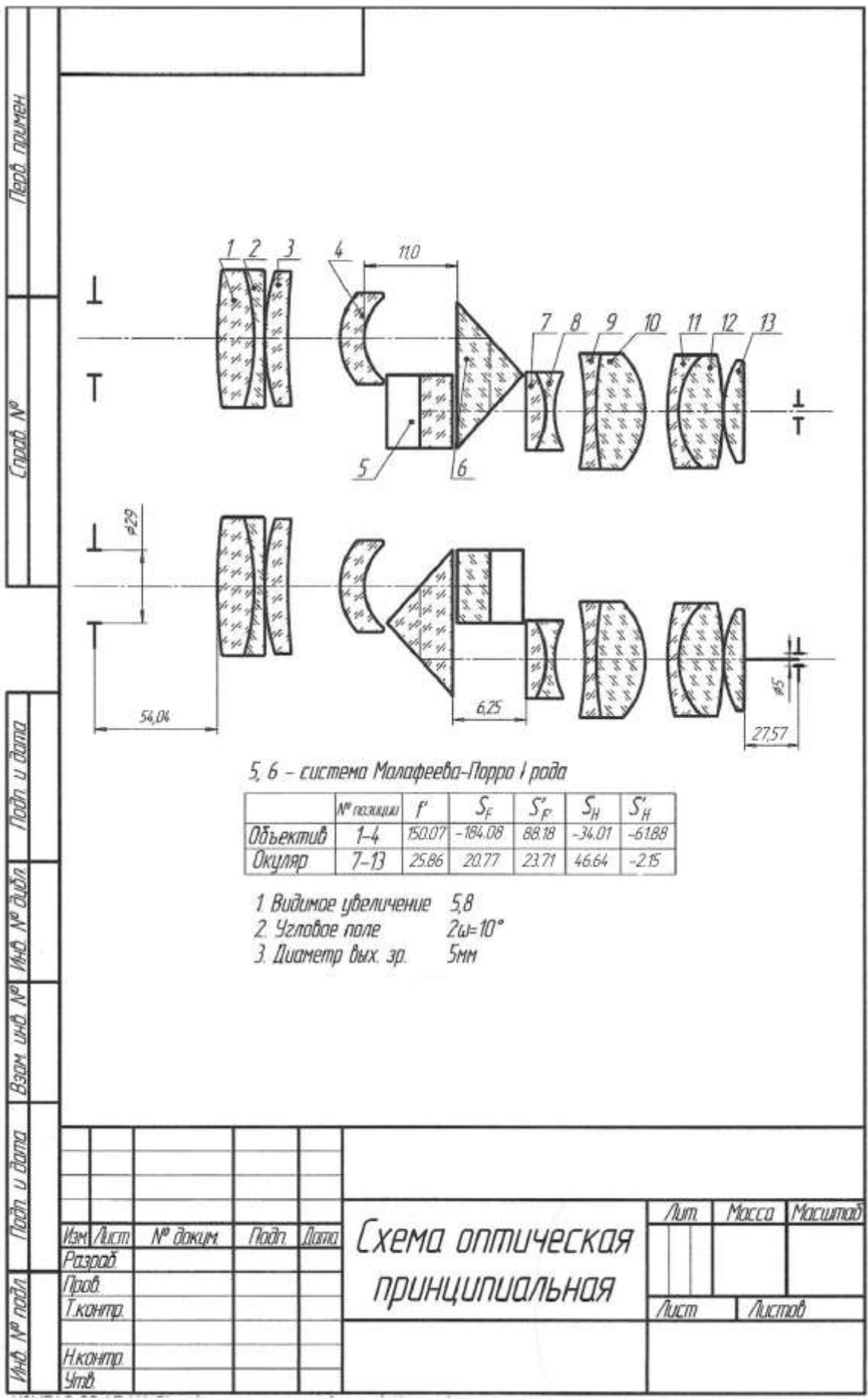
Радиусы	d	Марки	n_e
0			
1	727.8	9.2	К-8 1518
2	-375.8	0.3	
3	105.93	19.5	ТК-16 1615
4	-295.1	4.8	ТФ-4 1746
5	-78.7	10	
6	31.92	21.6	ТК-16 1615
7	-122.5	4.8	ТФ-2 1678
8	105.93	13.5	
9	-30.41	3.8	БК-10 1571
10	28.58	8.8	ТФ-4 1746
11	0.0		

- 1. Видимое увеличение $\Gamma=9.6$
- 2. Угловое поле $2\omega=62^\circ$
- 3. Диаметр вых. зр. $D'=5\text{мм}$

Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Окуляр телескопической системы	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.							1:1
Проб.					Лист	Листов	
Т.контр.							
И.контр.							
Утв.							

Ход лучей в телескопической системе





5, 6 - система Малафеева-Порро I рода

	№ позиции	f'	S_f	S_f'	S_H	S_H'
Объектив	1-4	150.07	-184.08	88.18	-34.01	-61.88
Окуляр	7-13	25.86	20.77	23.71	46.64	-2.15

- 1 Видимое увеличение 5,8
- 2 Угловое поле $2\omega=10^\circ$
- 3 Диаметр вых. зр. 5мм

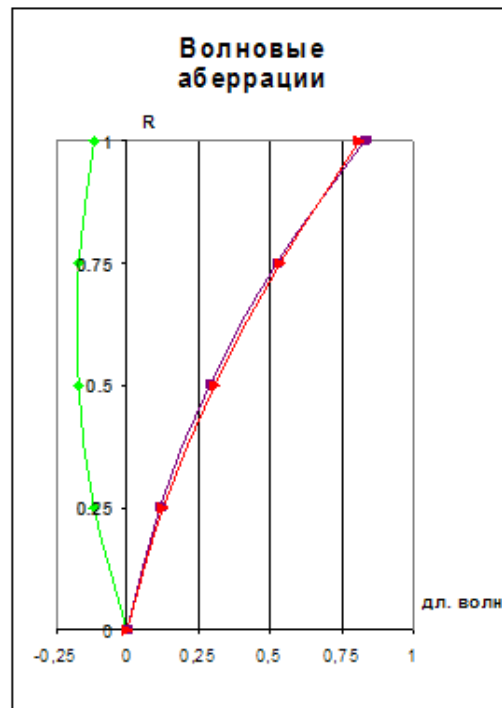
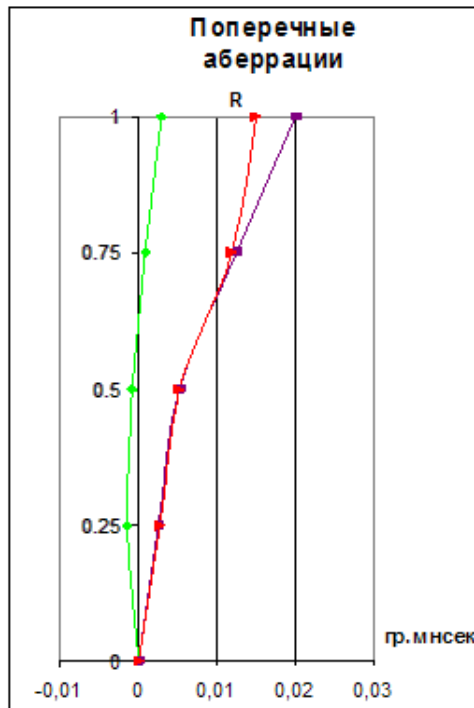
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Схема оптическая принципиальная	Лит.	Масса	Масштаб
	Разраб.							
Проб.						Лист	Листов	
	Т.контр.							
И.контр.								
	Утв.							

Аберрации осевого пучка:

Угловые аберрации			
Отн. зр. коор.	e	F'	C'
1.000	29''88	2'0''59	1'49''83
0.866	8''37	1'24''63	1'19''27
0.707	-7''57	52''76	51''73
0.500	-15''57	25''68	27''40
0.000	0	0	0

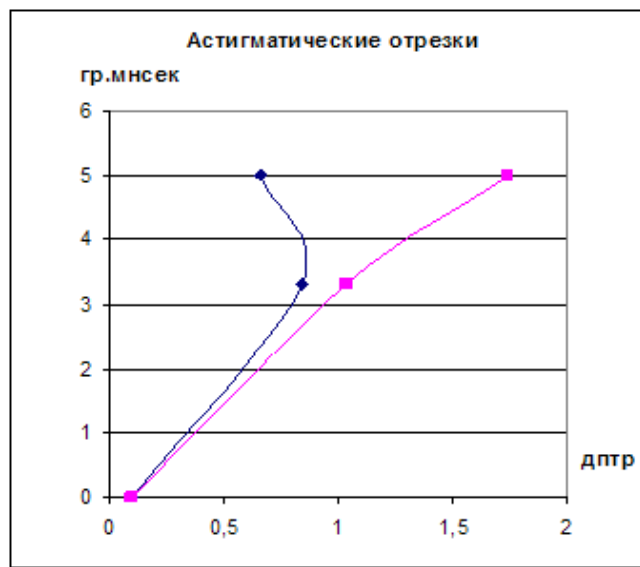
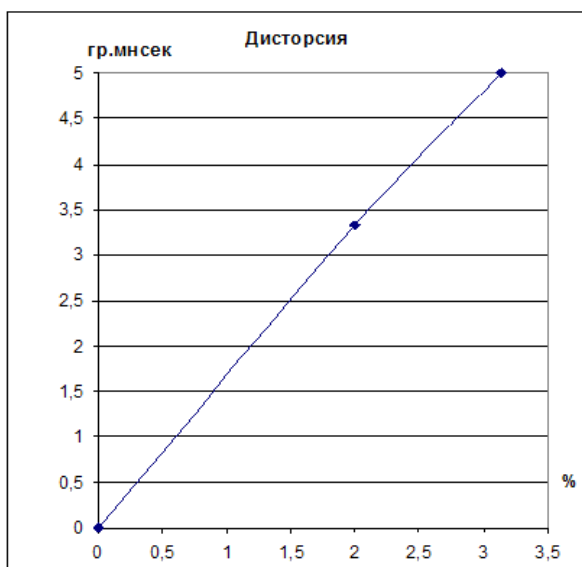
Волновые аберрации			
Отн. зр. коор.	e	F'	C'
1.000	-0,1193	0,8281	0,8150
0.866	-0,1743	0,5244	0,5344
0.707	-0,1729	0,2850	0,3051
0.500	-0,1148	0,1101	0,1270
0.000	0	0	0

Неизопланатизм (%)	
Отн. зр. коор.	
1.000	-0,0938
0.866	-0,0704
0.707	-0,0469
0.500	-0,0235
0.000	0



Аберрации точки вне оси:

Угловое поле в пространстве предметов		Угловое поле в пространстве изображений	Дисторсия	Астигматические отрезки		$\Delta\omega_{F'-C'}$, град.
относ.	гр. мнсек	гр. мнсек	%	L'_m , дптр	L'_s , дптр	
1,000	5°	-27°38'22"50	3,1339	0,6609	1,7374	10''76
0,707	3°32'22"17	-20°06'39"40	2,0007	0,8352	1,0392	1''3

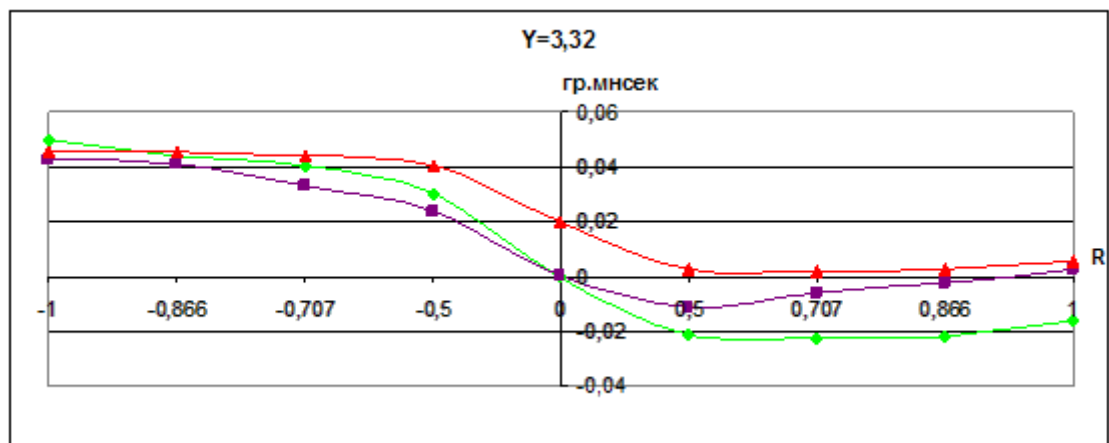
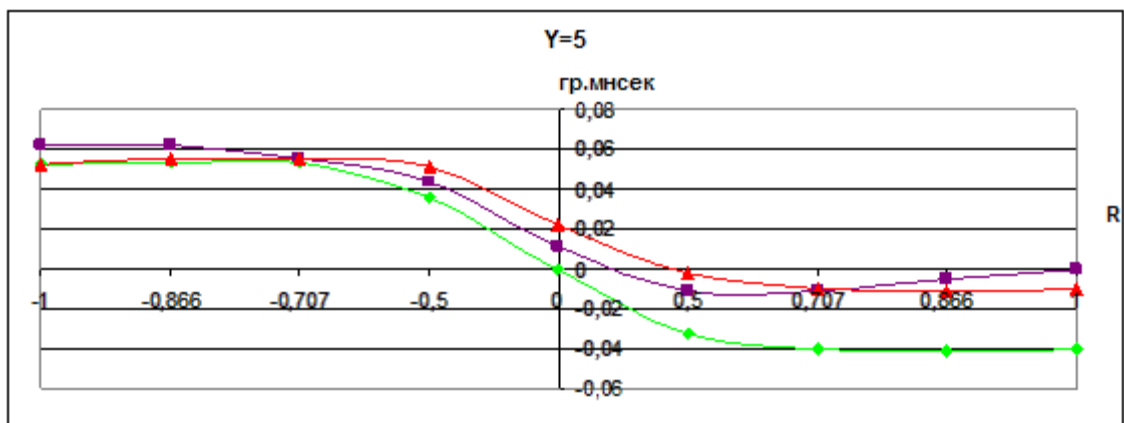


$\Delta\omega_{F'-C'}$

Аберрации внеосевого пучка

Угловые аберрации			
Вых. координаты	e	F'	C'
Меридиональное сечение $\omega = 5^\circ$			
1.000	-4'05''41	-3''83	-1'00''77
0.866	-4'16''80	-47''81	-1'10''11
0.707	-4'07''07	-1'12''30	-1'01''24
0.500	-3'22''96	-1'06''05	-23''22
0.000	0	1'13''88	2'24''87
-0.500	3'54''85	4'41''99	5'19''18
-0.707	5'30''81	5'50''78	5'55''10
-0.866	5'30''85	6'22''69	5'52''87
-1.000	5'28''73	6'28''64	5'22''80

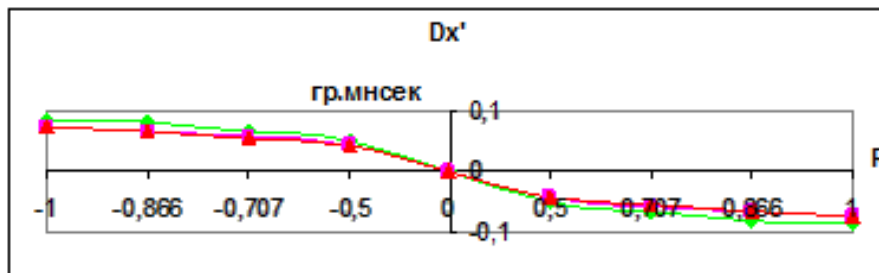
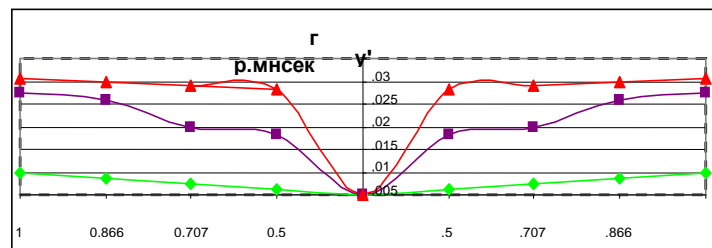
Угловые aberrации			
Вых. координаты	e	F'	C'
Меридиональное сечение $\omega = 3^{\circ}32'22''$			
1.000	-1'57''52	27''	53''81
0.866	-2'20''61	-22''87	29''86
0.707	-2'28''19	-58''54	18''51
0.500	-2'10''78	-1'12''30	26''98
0.000	0	4''64	2'00''57
-0.500	3'00''19	2'35''43	4'05''98
-0.707	4'06''08	3'34''03	4'43''09
-0.866	4'41''82	4'09''29	4'57''09
-1.000	5'01''08	4'28'99	4'55''11



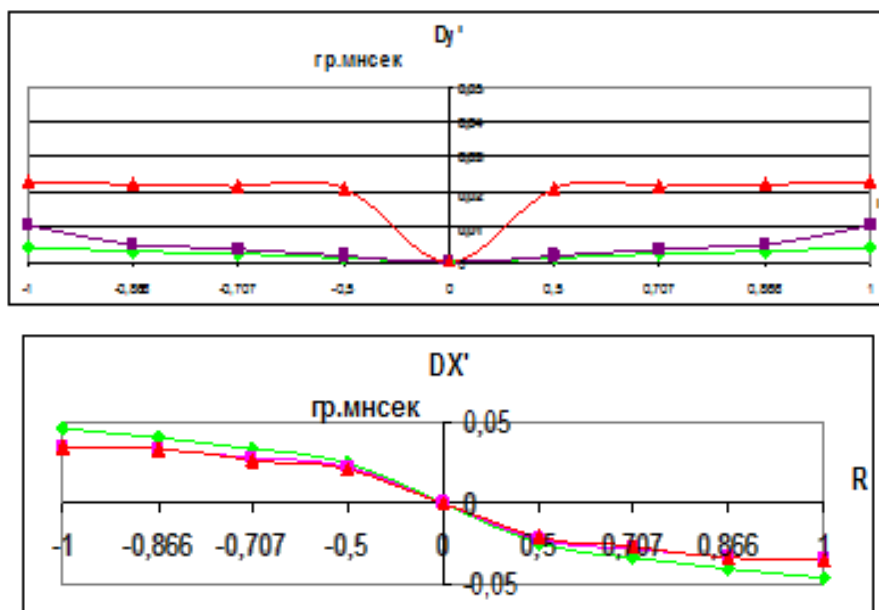
Угловые aberrации						
Сагиттальное сечение Пучок 1 $\omega = 5^\circ$						
Вых. коор.	e		F'		C'	
	Dx'	Dy'	Dx'	Dy'	Dx'	Dy'
1.000	-8'52''08	46''69	-7'27''87	2'23''09	-7'26''52	2'54''44
0.866	-8'03''41	35''66	-6'52''32	2'06''24	-6'48''	2'47''81
0.707	-6'52''98	24''19	-5'56''51	1'49''07	-5'50''28	2'40''70
0.500	-5'04''78	12''30	-4'26''01	1'31''60	-4'19''60	2'33''06

Угловые aberrации						
Сагиттальное сечение Пучок 2 $\omega = 3^\circ 32' 22''$						
Вых. коор.	e		F'		C'	
	Dx'	Dy'	Dx'	Dy'	Dx'	Dy'
1.000	-4'29''28	42''92	-3'01''82	1'03''47	-3'06''47	2'31''37
0.866	-4'13''17	32''41	-2'59''50	48''86	-3'	2'24''07
0.707	-3'42''99	21''76	-2'44''60	34''19	-2'41''94	2'16''43
0.500	-2'49''13	10''96	-2'09''12	19''45	-2'05''02	2'08''68

$\omega = 5^\circ$



$\omega = 3^\circ 32' 22''$



Вывод:

Выполнен расчёт простой телескопической системы и анализ получившегося качества изображения. Следует отметить, что aberrации точки на оси для основной длины волны не превышают $0,25\lambda$, хроматизм положения исправлен, но имеет место небольшая сферохроматическая aberrация. Для внеосевых точек при $\omega = 5^\circ$ угловые aberrации не превышают $8'$, а при $\omega = 3^\circ 32'$ - $4'$ для всего спектрального диапазона.

Работа №3

“Сложная телескопическая система”

Цель работы: приобретения практических навыков габаритного расчета и анализа аберраций сложной зрительной трубы.

1. Задание для работы

В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 3.1) необходимо:

- 1.1 Выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний объектива, коллектива, первого и второго компонентов оборачивающей системы, окуляра; углового поля в пространстве изображений; размера входного зрачка; размеров апертурной и полевой диафрагм, диаметров компонентов системы.
- 1.2 По полученным данным подобрать объектив, компоненты оборачивающей системы и окуляр из каталогов оптических систем или из библиотеки оптических систем программы «OPAL».
- 1.3 Составить телескопическую систему и определить расстояния между компонентами.
- 1.4 Выполнить построение хода апертурного, главного и двух наклонных лучей.
- 1.5 Осуществить для сложной телескопической системы, а также для всех выбранных компонентов, расчет параксиальных характеристик по программе «OPAL».
- 1.6 Произвести оценку качества изображения по величинам остаточных аберраций в разработанной системе.
- 1.7 Выполнить чертеж принципиальной оптической схемы.
- 1.8 Оформить отчет по лабораторной работе.

2. Краткая теория

Сложная зрительная труба отличается от простой зрительной трубы наличием, как минимум, одной оборачивающей системы и коллектива в плоскости

промежуточного изображения. Принципиальная оптическая схема сложной зрительной трубы приведена на рис.3.1

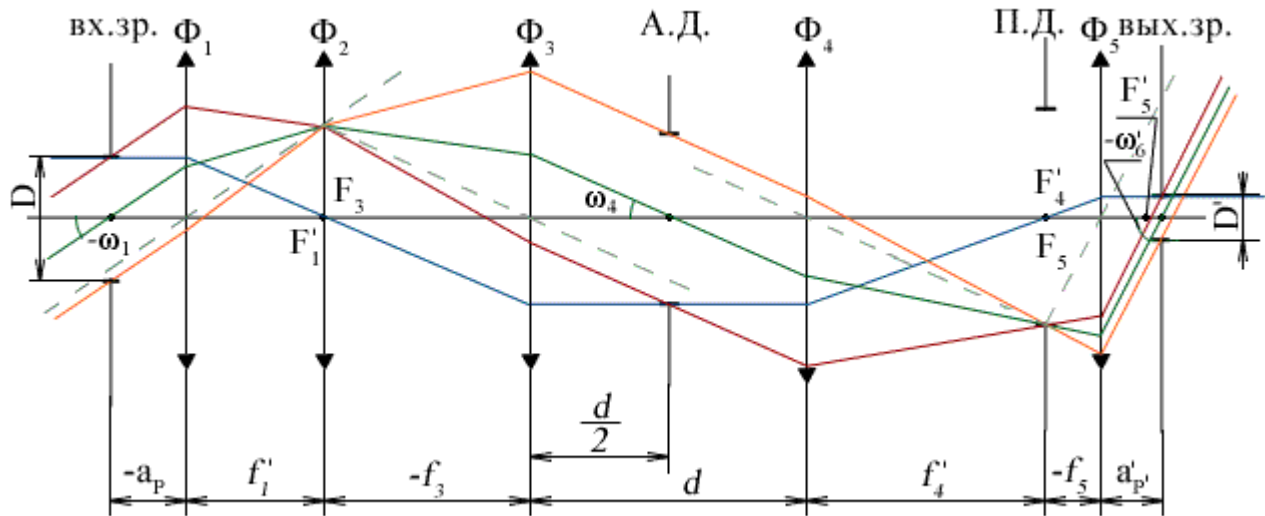


Рис.3.1. Принципиальная оптическая схема сложной телескопической системы

- Φ₁ – объектив;
- Φ₂ – коллектив;
- Φ₃ – 1-ый компонент оборачивающей системы;
- Φ₄ – 2-ой компонент оборачивающей системы;
- Φ₅ – окуляр.

Коллектив служит для согласования зрачков (для уменьшения габаритов системы).

Видимое увеличение сложной телескопической системы равно:

$$\Gamma_T = \frac{tg \omega_6}{tg \omega_1} = -\frac{f'_1}{f'_5} \beta_{оборсис.} \quad (3.1)$$

Из рис.3.2 следует:

$$tg \omega_4 = \frac{y}{f'_3} \quad tg \omega_4 = \frac{-y'}{f'_4} \quad \frac{-y'}{f'_4} = \frac{y}{f'_3}$$

$$\beta_{оборсис.} = \frac{y'}{y} = -\frac{f'_4}{f'_3}$$

Следовательно:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega_6}{\operatorname{tg} \omega_1} = -\frac{f'_1}{f'_5} \beta_{\text{обор.сис.}} = \frac{f'_1 f'_4}{f'_3 f'_5} \quad (3.2)$$

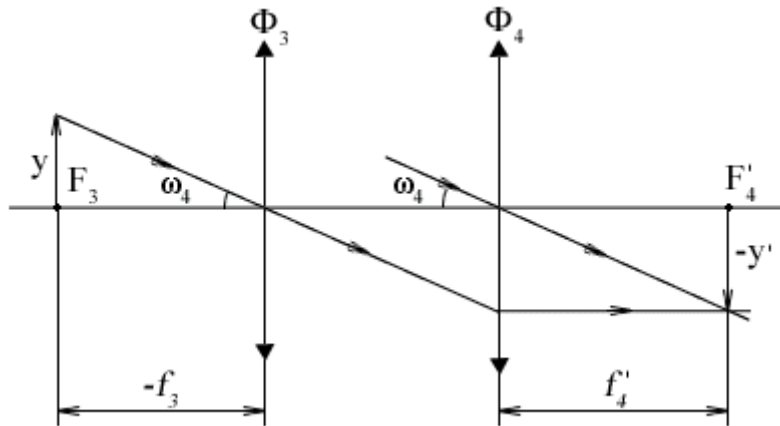


Рис.3.2. Оборачивающая система.

Методы расчета сложных зрительных труб.

1) Графо-аналитический.

Применяется если задан диаметр трубы и нужно получить максимальную длину.

2) Аналитический.

Применяется, если задана длина трубы и нужно получить минимальный диаметр.

3) Составление телескопической системы путем совмещения фокальных плоскостей.

При расчёте с применением первого и второго методов диаметры второго, третьего и четвёртого компонентов одинаковые. При расчёте третьим способом получаются разные диаметры компонентов.

Графо-аналитический метод расчета.

Исходные данные:

Видимое увеличение Γ_T ; угловое поле в пространстве предметов 2ω ; диаметр входного или выходного зрачка $D(D')$; диаметр трубы D_0 ; положение входного и выходного зрачков a_p, a'_p ; виньетирование.

Основные расчётные формулы:

$$D = \Gamma_T \cdot D'$$

$$f'_1 = \frac{D_0}{2|\operatorname{tg} \omega|}$$

$$\frac{D}{f'_1} = \frac{D_0}{f'_3} \rightarrow f'_3 = \frac{D_0}{D} f'_1$$

$$\Gamma_T = \frac{f'_1 \cdot f'_4}{f'_3 \cdot f'_5} \rightarrow f'_4 = \frac{\Gamma_T \cdot f'_3 \cdot f'_5}{f'_1}$$

Выбираем окуляр исходя из удаления выходного зрачка.

$$S'_{p'} \approx S'_{F'}$$

$$a'_{p'} \approx f'_{ок}$$

$$tg \omega'_{ок} = tg \omega'_6 = tg \omega \cdot \Gamma_T$$

Найдём расстояние между третьим и четвёртым компонентами. Из рис. 3.1 следует:

$$\frac{D_0}{2} = tg \omega_4 \frac{d}{2} + k D_0$$

$$tg \omega_4 = \frac{D_0}{2 f'_3}$$

$$\frac{D_0}{2} = \frac{D_0}{2 f'_3} \cdot \frac{d}{2} + k \cdot D_0$$

Если виньетирование 50%, то $k=0,25$ и расстояние между компонентами оборачивающей системы равно фокусному расстоянию третьего компонента:

$$d = f'_3$$

Из соотношения:

$$\frac{D_0}{f'_4} = \frac{D'}{f'_5}$$

Получаем первую проверочную формулу:

$$D' = \frac{f'_5}{f'_4} \cdot D_0 \tag{3.3}$$

Вторая проверочная формула:

$$tg \omega' = \frac{\phi_{ПД}}{2 f'_{ок}} \tag{3.4}$$

$$\phi_{ПД} = 2 f'_4 \cdot tg \omega_4$$

$$tg \omega' = tg \omega'_6 = tg \omega \cdot \Gamma_T$$

Определение оптических характеристик компонентов:

Объектив (первый компонент):

Оптические характеристики: f'_1 , a_p , $2\omega_1$, относительное отверстие $\frac{D}{f'_1}$.

Диаметр объектива $\phi_{об}$ определяется по формуле:

$$\phi_{об} = 2 \cdot a_p \cdot \operatorname{tg} \omega + k \cdot D,$$

если $\phi_{об} < D$, то $\phi_{об} = D$.

Третий компонент:

Оптические характеристики: f'_3 , $a_p = -\frac{d}{2}$, $2\omega_4$, относительное отверстие $\frac{D_0}{f'_3}$, диаметр компонента равен диаметру трубы $\phi_3 = D_0$.

Четвёртый компонент:

Оптические характеристики: f'_4 , $a_p = -\frac{d}{2}$, $2\omega_4$, относительное отверстие $\frac{D_0}{f'_4}$, диаметр компонента равен диаметру трубы $\phi_4 = D_0$.

Окуляр (пятый компонент):

Оптические характеристики: f'_5 , a'_p , $2\omega_6$, $\frac{D'}{f'_5}$, диаметр окуляра $\phi_{ок}$ равен:

$$\phi_{ок} = 2 \cdot a'_p \cdot \operatorname{tg} \omega' + \frac{\kappa D'}{4},$$

$\kappa = 0.25$ при виньетирование 50%.

Общий метод расчета коллектива.

Основные расчётные формулы (рис.3.3):

$$H_1 = \operatorname{tg} \omega_1 \cdot a_p \tag{3.5}$$

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \operatorname{tg} \omega_1 + H_1 \cdot \Phi_1 \tag{3.6}$$

$$H_2 = H_1 - \operatorname{tg} \omega_2 \cdot f'_1 = H_1 - (\operatorname{tg} \omega_1 + H_1 \cdot \Phi_1) f'_1 = -\operatorname{tg} \omega_1 \cdot f'_1 \tag{3.7}$$

$$\operatorname{tg} \omega_4 = \frac{D_0}{2f'_3} \tag{3.8}$$

$$H_3 = \operatorname{tg} \omega_4 \cdot \frac{d}{2} \quad (3.9)$$

$$\operatorname{tg} \omega_3 = \operatorname{tg} \omega_4 - H_3 \cdot \Phi_3 \quad (3.10)$$

$$\Phi_2 = \frac{\operatorname{tg} \omega_4 - \operatorname{tg} \omega_3}{H_2} \quad (3.11)$$

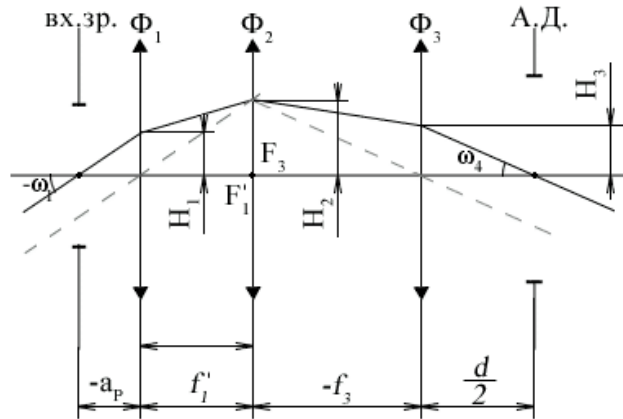


Рис.3.3. Работа коллектива

Аналитический метод расчета сложной зрительной трубы.

Метод применяется в том случае, если задана длина системы L и нужно получить минимальный диаметр трубы D_0 .

Исходные данные:

Γ_T ; L ; $2\omega_1$; $D(D')$; a_p ; a'_p .

Из рис. 3.4 следует:

$$L = f'_1 + f'_3 + d + f'_4 + f'_5$$

Примем следующие условия:

- 1) увеличение оборачивающей системы равно -1 , это означает, что $f'_3 = f'_4$;
- 2) виньетирование = 50%, следовательно $d = f'_3$;
- 3) в длину не включаем положения зрачков, следовательно

$$L = f'_1 + 3f'_3 + f'_5.$$

Используя известные формулы:

$$f'_1 = \frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \omega_1}$$

$$f'_3 = \frac{D_0}{D} f'_1 = \frac{D_0}{D} \cdot \frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \omega_1} = \frac{D_0^2}{D \cdot 2 \operatorname{tg} \omega_1}$$

$$f'_5 = \frac{f'_1}{\Gamma_T} = \frac{D_0}{\Gamma_T \cdot 2tg \omega_1}, \text{ получаем}$$

$$\frac{D_0}{2tg \omega_1} + \frac{3D_0^2}{D \cdot 2tg \omega_1} + \frac{D_0}{\Gamma_T \cdot 2tg \omega_1} = L$$

$$D_0 + \frac{3D_0^2}{D} + \frac{D_0}{\Gamma_T} - L \cdot 2tg \omega_1 = 0$$

$$\frac{3D_0^2}{D} + \frac{\Gamma_T + 1}{\Gamma_T} D_0 - L \cdot 2tg \omega_1 = 0$$

Формула представляет собой квадратное уравнение, решение которого позволяет определить диаметр трубы D_0 .

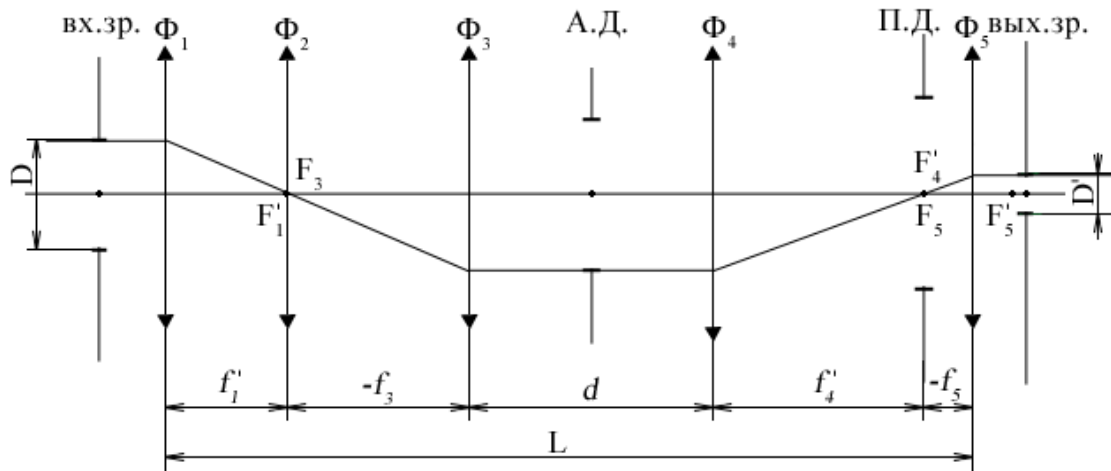


Рис.3.4. Сложная зрительная труба с одной оборачивающей системой.

3. Указания для выполнения лабораторной работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам выполнить габаритный расчет сложной телескопической системы. Принять увеличение оборачивающей системы $\beta_{OC} = -1$ и виньетирование 50%.

3.2. После проведения габаритного расчета необходимо определить оптические характеристики объектива, компонентов оборачивающей системы и окуляра.

3.3. Подобрать из каталогов объектив, компоненты оборачивающей системы, окуляр, руководствуясь рекомендациями, приведенными в работе №2.

3.4. Определить радиус кривизны коллектива, приняв одну из поверхностей плоской.

3.4. Определить расстояния между компонентами.

3.5. Выполнить расчёт всей системы по компьютерной программе и убедиться в том, что получаются заданные характеристики.

3.6. Определить aberrации всей системы.

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

1. Исходные данные
2. Габаритный расчет сложной телескопической системы
3. Конструктивные данные, параксиальные характеристики и чертежи всех компонентов
4. Схема хода лучей в сложной зрительной трубе
5. Оптическая схема всей системы с указанием нужных расстояний
6. Таблицы и графики aberrаций всей системы
7. Выводы по работе: соответствие полученных характеристик заданию и анализ качества изображения.

5. Литература

5.1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 446с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]

Режим доступа:

http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=147

5.2 Прикладная оптика: Учебное пособие / Л.Г.Бибчук и др. Под ред. Н.П. Заказнова. 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 320с.: ил.

Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]

Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=148

5.3. Цуканова Г.И., Багдасарова О.В., Бахолдин А.В., Карпов В.Г., Карпова Г.В. Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Прикладная оптика». Часть 2. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.–СПб: СПб ГУИТМО, 2009. –124с.:ил.

[Электронный ресурс]— Электрон. версия печ. публикации — Режим доступа: <http://aco.ifmo.ru/student/>

5.4. Теория оптических систем. Заказнов Н.Г. и др М. Машиностроение, 1992г.

5.5. Справочник конструктора опико-механических приборов Панов В.А. и др. Л. Машиностроение 1980г.

6. Задание для работы

Таблица 3.1

№ вар.	Γ_T	D'	2ω	a_p	Длина системы L	$2\omega'$	D
1.	$3,5^x$	5	10°	0	1000	-	-
2.	4^x	5	10°	-10	1500	-	-
3.	$4,2^x$	5	10°	-15	1000	-	-
4.	$4,4^x$	4	10°	-20	1400	-	-
5.	$4,5^x$	4	10°	0	1600	-	-
6.	$4,6^x$	4	10°	-10	1800	-	-
7.	5^x	4	8°	-15	1000	-	-
8.	$5,4^x$	5	8°	-20	1500	-	-
9.	$5,6^x$	5	$7^\circ 30'$	-30	2000	-	-
10.	6^x	5	$7^\circ 30'$	-10	1800	-	-
11.	$5,8^x$	5	7°	-20	1500	-	-
12.	$5,6^x$	4	8°	-25	2000	-	-
13.	$5,7^x$	4	$7^\circ 30'$	-20	2000	-	-
14.	$5,5^x$	5	8°	-25	1500	-	-
15.	$5,9^x$	5	7°	-15	1500	-	-
16.	$5,8^x$	4	8°	-25	1000	-	-
17.	6°	6	$7^\circ 30'$	-15	1500	-	-
18.	4^x	5	-	0	1000	38°	-
19.	$4,2^x$	5	-	-10	1400	40°	-
20.	$4,4^x$	5	-	-30	1600	40°	-
21.	$4,5^x$	4,5	-	0	1800	40°	-
22.	$4,6^x$	4,5	-	0	1000	40°	-
23.	$4,7^x$	4,5	-	0	1500	45°	-
24.	$4,8^x$	4	-	-10	2000	45°	-
25.	$4,9^x$	4	-	-20	1800	40°	-
26.	5^x	4	10°	-15	1500	-	-
27.	$5,1^x$	4	10°	0	2000	-	-

28.	5,2 ^x	4	10°	0	2000	-	-
29.	5,3 ^x	4	8°	0	1500	-	-
30.	5,4 ^x	4	8,5°	-10	1500	-	-
31.	5,3 ^x	4	9°	-5	1000	-	-
32.	5,2 ^x	4	10°	-10	1500	-	-
33.	5,5 ^x	4	9°	-25	1000	-	-
34.	5,6 ^x	-	8°	-30	1400	-	25
35.	5,7 ^x	-	8°	-20	1600	-	25
36.	5,8 ^x	-	8°	-25	1800	-	25
37.	5,9 ^x	-	7,5°	-30	1000	-	30
38.	6 ^x	-	6°	-15	1500	-	30
39.	6,1 ^x	-	6°	-20	2000	-	30
40.	6 ^x	-	6°	-40	1800	-	30
41.	5,9 ^x	4	7,5°	-30	1500	-	-
42.	5,8 ^x	4	7,5°	-20	2000	-	-
43.	6,5 ^x	4	6°	-15	2000	-	-
44.	6,5 ^x	4	6°	-15	1500	-	-
45.	7 ^x	5	6°	-30	1500	-	-

Контрольные вопросы:

1. Основные характеристики сложной телескопической системы.
2. Определение оптических характеристик компонентов телескопической системы.
3. Принципиальная оптическая схема сложной телескопической системы с одной оборачивающей системой, основные параметры и соотношения.
4. Методы расчёта сложных зрительных труб.
5. Определение диаметров и положения входного и выходного зрачков.
6. Из каких соображений апертурную диафрагму размещают посередине между компонентами оборачивающей системы?
7. Разрешающая способность телескопических систем.
8. Основные параметры для выбора объектива, компонентов оборачивающей системы и окуляра.
9. С какой целью устанавливается коллектив после объектива.
10. Допустимые значения аберраций в телескопических системах.
11. Анализ качества изображения в телескопических системах.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа «Сложная телескопическая система»

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \Gamma_T &= 4, \\ 2\omega &= 8^\circ, \\ D' &= 5 \text{ мм}, \\ L &= 3 \text{ м} = 3000 \text{ мм} \end{aligned}$$

Расчеты:

Определяем диаметр входного зрачка D , диаметр трубы D_0 , фокусные расстояния компонентов зрительной трубы.

$$D = \Gamma_T \cdot D' = 20 \text{ мм}$$

$$\frac{3D_0^2}{D} + \frac{\Gamma_T + 1}{\Gamma_T} D_0 - L \cdot 2 \operatorname{tg} \omega_1 = 0$$

$$\frac{3D_0^2}{20} + \frac{5}{4} D_0 - 419,56 = 0$$

$$D_0 = 48,89$$

$$f_1' = \frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \omega} = \frac{70,926572}{0,28108167794} = 349,18 \text{ мм}$$

$$f_3' = \frac{D_0}{D} f_1' = 853,57 \text{ мм}$$

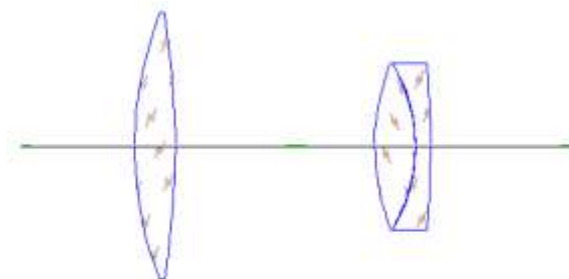
$$f_5' = \frac{f_1'}{\Gamma_T} = 87,30 \text{ мм}$$

$$f_4' = \frac{D_0}{D} f_1' = 853,57 \text{ мм}$$

Выбор окуляра:

В каталоге есть окуляр со следующими характеристиками:

Окуляр Кельнера: $f' = 80$, $2\omega = 45^\circ$, $d = 10$



Конструктивные параметры

N пов.	Радиусы кривизны	Осевые расст.	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
				L= ВОЗДУХ	.54607	.48000	.64380
1	100.9300	11.0000	33.000	К8	1.51830	1.52241	1.51429
2	-220.8000	55.0000	33.000	ВОЗДУХ			
3	59.7000	11.0000	20.000	БК6	1.54214	1.54679	1.53767
4	-44.8700	4.0000	20.000	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
5	-239.9000		20.000	ВОЗДУХ			

Параксиальные характеристики

F	F'	SF	SF'	SH	SH'
-80.03408	80.03408	-32.43671	35.20984	47.59737	-44.82423

Уточняем значения фокусных расстояний объектива и компонентов оборачивающей системы:

$$f'_1 = \Gamma_T \cdot f'_5 = 321,36 \text{ мм}$$

$$f'_3 = \frac{D_0}{D} f_1 = 721,30 \text{ мм}$$

$$f'_4 = \frac{\Gamma_T \cdot f'_3 \cdot f'_5}{f'_1} = 721,30 \text{ мм}$$

Выбор объектива

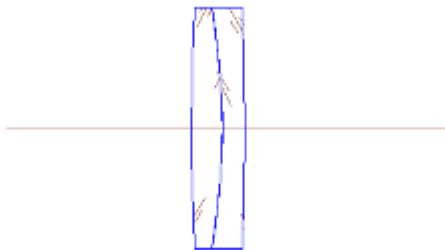
Характеристики рассчитанного объектива:

$$f^* = 321,36$$

$$1:16$$

$$2\omega = 8^\circ$$

Выбираем из каталога объектив с относительным отверстием 1:10, фокусным расстоянием 350 мм и угловым полем $2\omega = 10^\circ$, пересчитываем на нужное фокусное расстояние.



Конструктивные параметры

N пов.	Радиусы кривизны	Осевые расст.	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
				L= ВОЗДУХ	.54607	.48000	.64380
1	254.1000	4.5000		TK2	1.57486	1.58000	1.56995
2	-93.9700	3.2000		Ф2	1.62054	1.62944	1.61238
3	-461.3000			ВОЗДУХ			

Параксиальные характеристики

F	F'	SF	SF'	SH	SH'
-321.42158	321.42158	-319.77757	318.21440	1.64401	-3.20718

Выбор компонентов оборачивающей системы

Первый компонент:

Характеристики рассчитываемого объектива:

$$f'_3 = 721,3$$

$$1:16$$

$$2\omega = 3^{\circ}54'$$

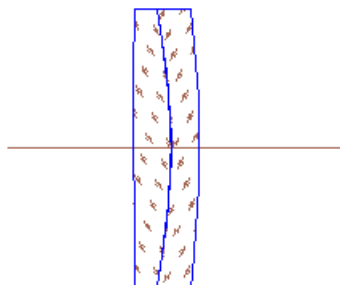
Выбираем из каталога объектив с $f' = 321,36$, относительным отверстием 1:10, угловым полем $2\omega = 4^{\circ}$, пересчитываем на нужное фокусное расстояние.

Конструктивные параметры

N пов.	Радиусы кривизны	Осевые расст.	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
				L=	.54607	.48000	.64380
				ВОЗДУХ			
1	2051.0000	11.0000	22.447	К8	1.51830	1.52241	1.51429
2	-190.1100	8.0000	22.470	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
3	-355.6000	721.5000	22.572	ВОЗДУХ			

Параксиальные характеристики

F	F'	SF	SF'	SH	SH'
-722.3395	722.3395	-709.976	722.5920	12.3599	.2525



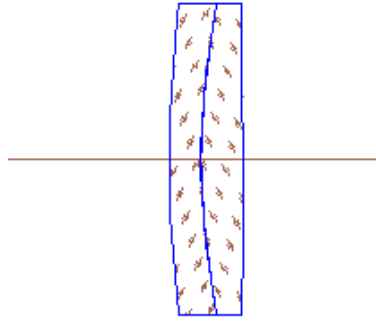
Второй компонент

Конструктивные параметры

N пов.	Радиусы кривизны	Осевые расст.	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
				L=	.54607	.48000	.64380
				ВОЗДУХ			
1	355.6000	8.0000	22.550	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
2	190.1100	11.0000	22.448	К8	1.51830	1.52241	1.51429
3	-2051.0000	743.0427	22.425	ВОЗДУХ			

Параксиальные характеристики

F	F'	SF	SF'	SH	SH'
-722.3395	722.3395	-722.5920	709.976	12.3599	.2525



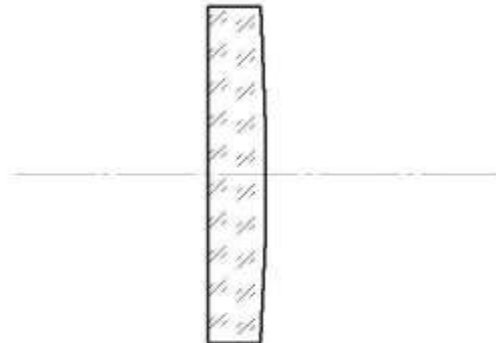
Расчет коллектива:

- 1) $H_1 = \operatorname{tg} \omega_1 \cdot a_p = 0$, т.к. $a_p = 0$
- 2) $\operatorname{tg} \omega_2 = \operatorname{tg} \omega_1 + H_1 \cdot \Phi_1 = 0,07$
- 3) $H_2 = H_1 - \operatorname{tg} \omega_2 \cdot f'_1 = -\operatorname{tg} \omega_2 \cdot f'_1 = -0,07 \cdot 321,36 = -22,5$
- 4) $\operatorname{tg} \omega_4 = \frac{D_0}{2f'_3} = \frac{48,89}{2 \cdot 721,3} = 0,034$
- 5) $H_3 = \operatorname{tg} \omega_4 \cdot \frac{d}{2} = 12,26$
- 6) $\operatorname{tg} \omega_3 = \operatorname{tg} \omega_4 - H_3 \cdot \Phi_3 = 0,018$
- 7) $\Phi_2 = \frac{\operatorname{tg} \omega_3 - \operatorname{tg} \omega_2}{H_2} = \frac{0,018 - 0,07}{-22,5} = 0,015$

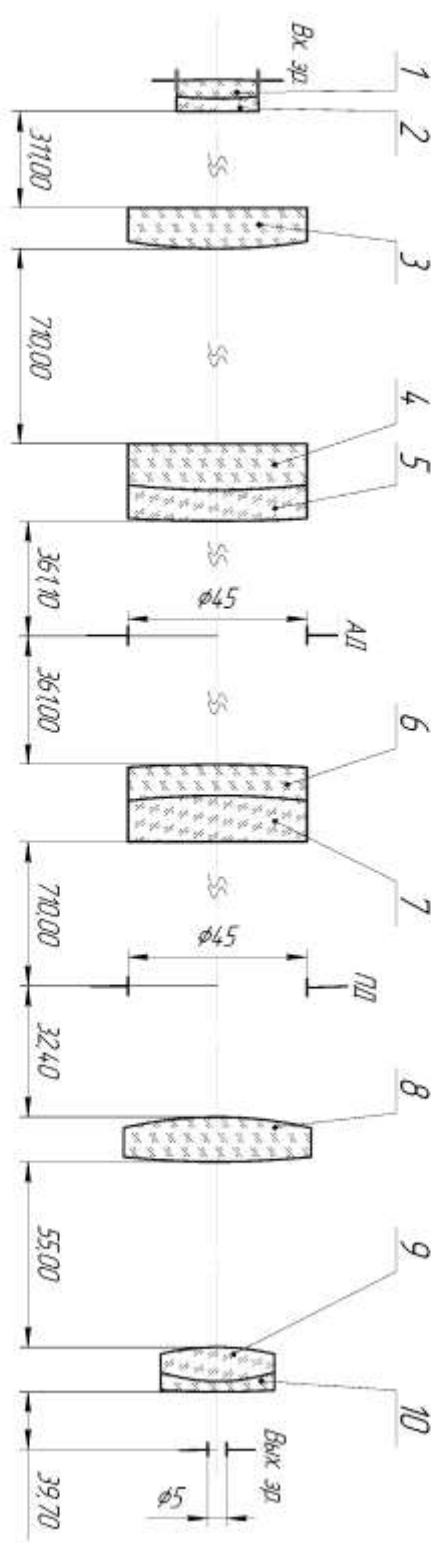
Радиусы коллектива:

$$r_1 = 0$$

$$r_2 \approx -\frac{(n-1)}{\Phi_2} = -\frac{0,518296}{0,015} = -172,77 \text{ мм}$$



Инд. № разра	Инд. и дата	Взам. инд. №	Инд. № дубл	Инд. и дата	Лист №	Листов
--------------	-------------	--------------	-------------	-------------	--------	--------



Видимое угловое поле $\Gamma = 4^\circ$
 Угловое поле в пространстве предметной $2\omega = 8^\circ$
 Диаметр выходного зрачка $D' = 5$ мм

Позиция	Наименование	Г, мм	S,	S',
1-2	объектив	321.12	-319.78	318.21
3	коллектив	218.02	-211.44	218.02
4-5	два компонента объективной системы	722.34	-709.98	722.60
6-7	два компонента объективной системы	722.34	-722.60	709.89
8-10	окуляр	80.03	-32.44	35.21

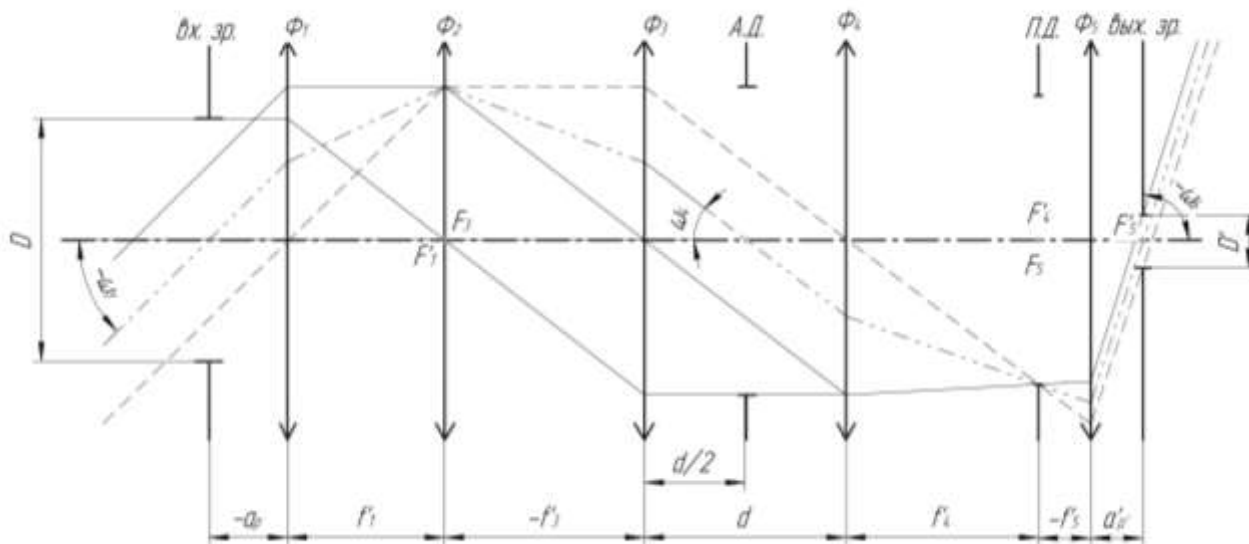
Исполн	Провер	Лист	Листов	Исполн	Провер	Лист	Листов	Исполн	Провер	Лист	Листов

**Схема оптической
принципиальная**

Лист 11

Формат А3

Ход лучей в оптической системе



Конструктивные параметры сложной зрительной трубы

N пов.	Радиусы кривизны	Осевые расст.	Световые высоты	Марки стекол	Показатели преломления		
				L=	.54607	.48000	.64380
				ВОЗДУХ			
1	254.1000	4.5000	10.000	TK2	1.57486	1.58000	1.56995
2	-93.9700	3.2000	9.946	Ф2	1.62054	1.62944	1.61238
3	-461.3000	311.0000	9.906	ВОЗДУХ			
4	.0000	10.0000	22.050	K8	1.51830	1.52241	1.51429
5	-137.0000	709.9800	22.366	ВОЗДУХ			
6	2051.0000	11.0000	22.447	K8	1.51830	1.52241	1.51429
7	-190.1100	8.0000	22.470	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
8	-355.6000	721.5000	22.572	ВОЗДУХ			
9	355.6000	8.0000	22.550	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
10	190.1100	11.0000	22.448	K8	1.51830	1.52241	1.51429
11	-2051.0000	743.0427	22.425	ВОЗДУХ			
12	100.9300	11.0000	23.504	K8	1.51830	1.52241	1.51429
13	-220.8000	55.0000	23.076	ВОЗДУХ			
14	59.7000	11.0000	14.490	BK6	1.54214	1.54679	1.53767
15	-44.8700	4.0000	13.163	ТФ1	1.65219	1.66234	1.64295
16	-239.9000		12.318	ВОЗДУХ			

Параксиальные характеристики

F	F'	SF	SF'	SH	SH'

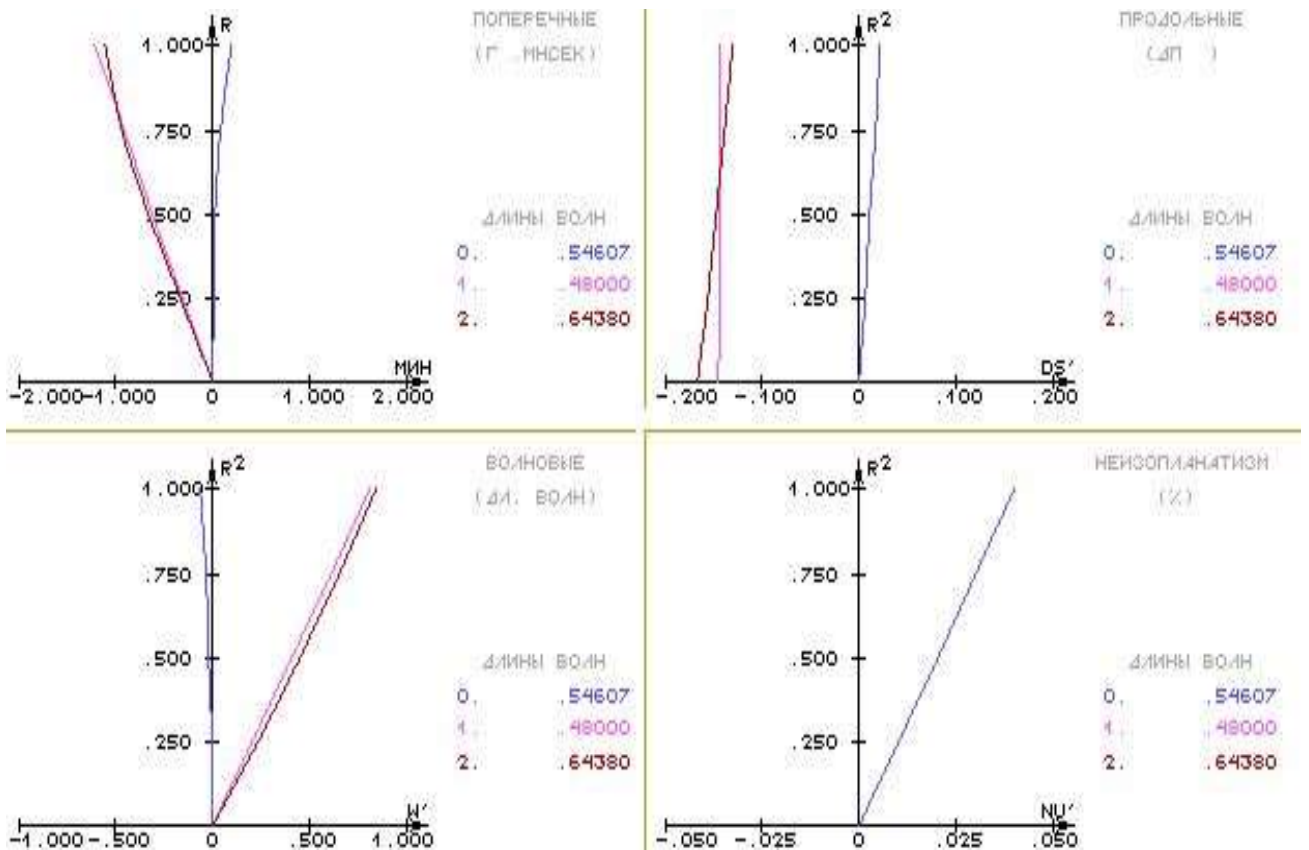
S	S'	S'G	V	SP	SP'
(дптр)	(дптр)	(дптр)		(мм)	(мм)
0	.00000	-.00005	4.01002	-1.19344	39.64999
1	.00000	-.00005	.00240	1.81719	39.26099
2	.00000	-.00005	-.00269	-4.16837	40.05095

Аберрации сложной зрительной трубы

Аберрации осевого пучка

-Отн.зр -коор.	Продольные аберрации (дптр)			Поперечные аберрации (гр.мсек)		
	0	1	2	0	1	2
1.000	.02123	-.14249	-.12999	.001092	-.011305	-.010701
.866	.01647	-.14259	-.13850	.000733	-.010332	-.010184
.707	.01134	-.14309	-.14735	.000412	-.005188	-.005372
.500	.00585	-.14398	-.15654	.000150	-.003692	-.004036
.000	.00000	-.14524	-.16605	.000000	.000000	.000000

- -Тг'*100	Волновые аберрации (дл. волн)			Неизопл. (%)	Н ЗР (мм)
	0	1	2		
2.493	-.0631	.8109	.8441	.0401	10.0000
2.159	-.0363	.6095	.6523	.0301	8.6603
1.763	-.0165	.4075	.4480	.0201	7.0711
1.247	-.0042	.2046	.2307	.0101	5.0000
.000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000

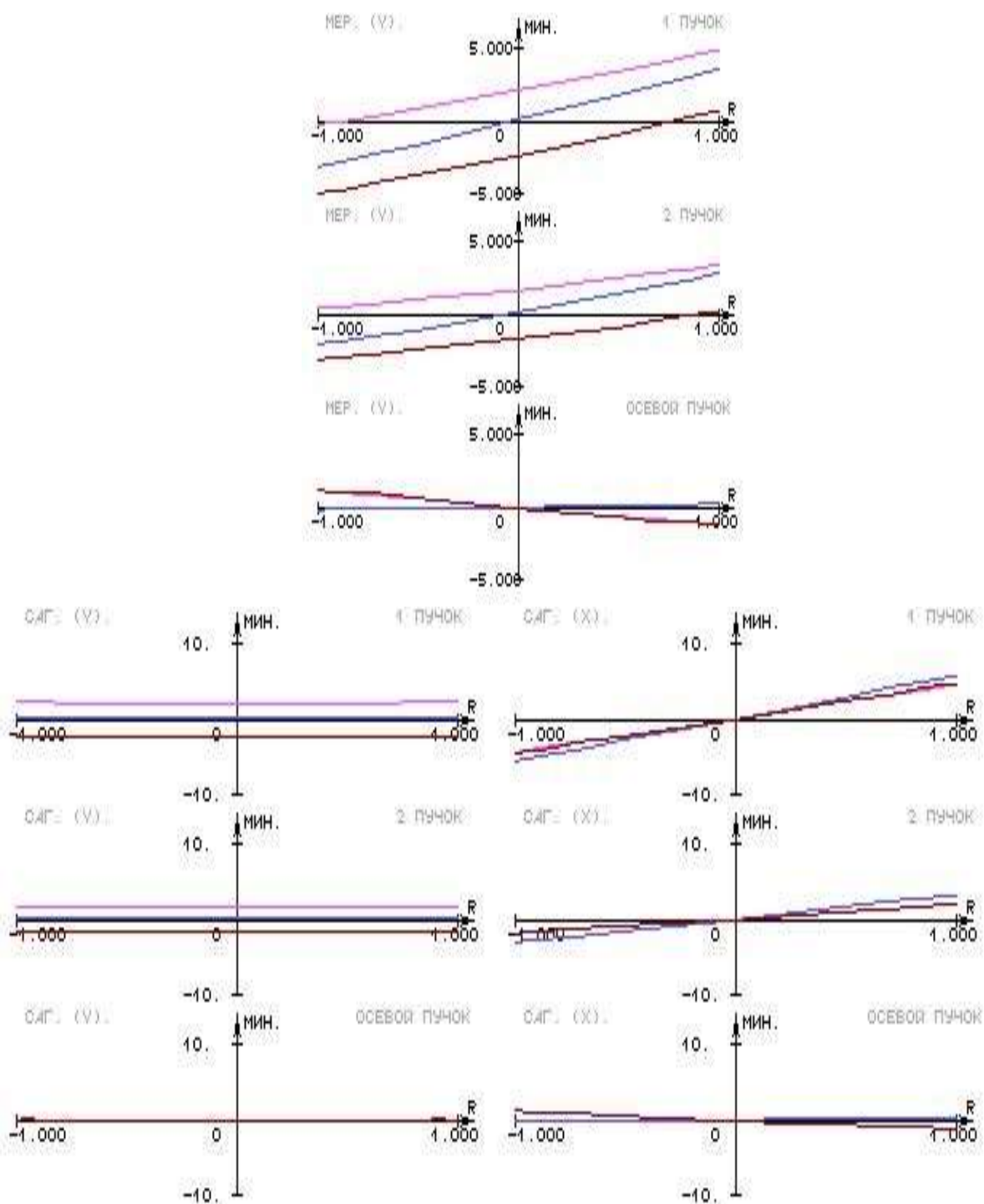


Аберрации внеосевых пучков

= Вых. координаты		Поперечные аберрации в (гр.мнсек)		
= Канон.	(мм)	0	1	2
- Меридиональное сечение			Пучок 1	Y= 4.0000
1.000	.66	.033140	.044164	.003642
.866	.49	.030191	.041951	.001080
.707	.30	.022743	.035354	-.001891
.500	.05	.014331	.032020	-.005656
.000	-.57	.000058	.020248	-.022272
-.500	-1.18	-.013692	.004926	-.034299
-.707	-1.44	-.021584	.002041	-.041476
-.866	-1.64	-.024515	-.000110	-.043863
-1.000	-1.80	-.030948	-.001879	-.045843
- Меридиональное сечение			Пучок 2	Y= 2.4949
1.000	1.40	.024217	.031522	.000844
.866	1.19	.021808	.030000	-.001004
.707	.94	.015051	.024243	-.003061
.500	.60	.011619	.022067	-.005536
.000	-.20	.000038	.013349	-.014664
-.500	-1.00	-.010671	.005422	-.022852
-.707	-1.34	-.013235	.004034	-.024390
-.866	-1.60	-.015127	.003066	-.025513

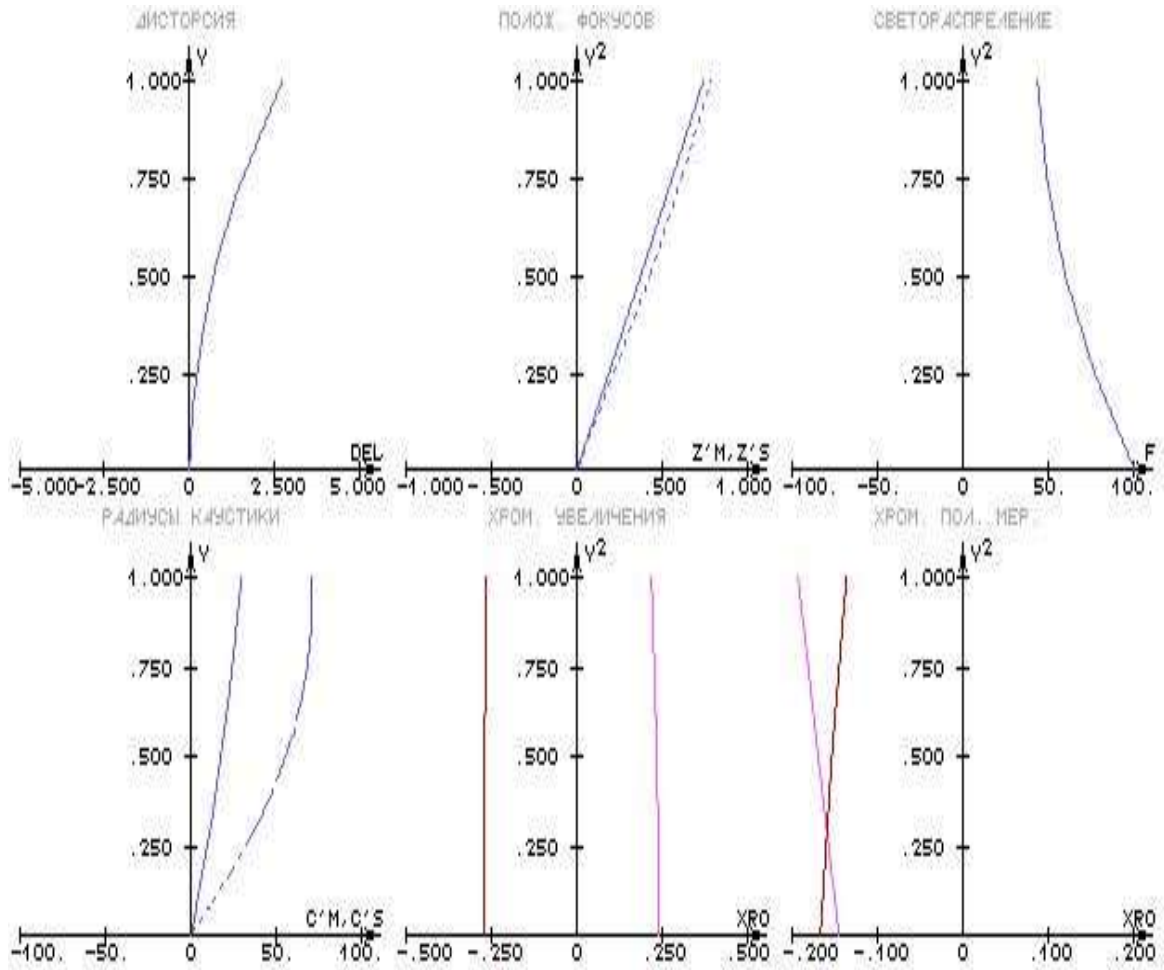
Аберрации внеосевых пучков

= Выходные координаты			Поперечные аберрации в (гр.мнсек)					
= Радиус	(мм)		Dx'	Dy'	Dx'	Dy'	Dx'	Dy'
x	y		0	1	2			
- Сагиттальное сечение				Пучок 1	Y= 4.0000			
1.000	2.18	-.58	.054013	.001295	.042454	.021372	.043508	-.020893
.866	1.89	-.58	.045324	.000988	.034912	.021093	.035579	-.021235
.707	1.54	-.57	.035828	.000680	.030703	.020813	.031047	-.021579
.500	1.09	-.57	.024763	.000370	.021217	.020531	.021319	-.021924
- Сагиттальное сечение				Пучок 2	Y= 2.4949			
1.000	2.35	-.21	.031247	.001282	.015233	.014504	.020080	-.013310
.866	2.03	-.21	.024497	.000973	.013727	.014217	.014152	-.013647
.707	1.66	-.20	.021320	.000663	.011931	.013929	.012026	-.013984
.500	1.17	-.20	.013306	.000351	.005593	.013640	.005483	-.014324



Характеристики главных лучей пучков

= N	Величина предмета		Величина изображ.		Д и с т о р с и я		Астигмат.отрезки		Радиусы каустики	
	относ.	(гр.мнсек)	относ.	(гр.мнсек)	%	(гр.мнсек)	Z'm	Z's	C'm	C's
1	1.000	4.000000	1.000	16.034200	2.6756	.235187	.7890	.7397	70.9905	29.4485
2	.707	2.494908	.698	11.213650	1.3433	.084826	.4288	.3793	67.2131	23.6909
0	.000	.000000	.000	.000000	.0000	.000000	.0000	.0000	.0000	.0000



Анализ качества изображения: для осевой точки волновая aberrация для основной длины волны равна $0,14\lambda$, для других длин волн угловая aberrация не превышает $2'$, следовательно, качество изображения удовлетворительное.

Содержание:

1.	ВВЕДЕНИЕ	3
2.	РАБОТА №1 «МИКРОСКОП (ВИЗУАЛЬНАЯ ЧАСТЬ)»	4
3.	РАБОТА №2 «ПРОСТАЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА»	28
4.	РАБОТА №3 « СЛОЖНАЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА»	60
5.	СОДЕРЖАНИЕ	81

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

Хваловский Владимир Васильевич

Крупный ученый–оптик, внесший значительный вклад в подготовку специалистов–оптиков и развитие оптического приборостроения.



Хваловский Владимир Васильевич (1916 - 2014)

в 1940 году закончил с отличием Ленинградский институт точной механики и оптики и был оставлен на кафедре “Теория оптических приборов”.

С 29 июня 1941 года до 9 мая 1945 года воевал в действующей Советской Армии на Ленинградском и 2-ом Прибалтийском фронтах, участвовал в обороне Ленинграда, в прорыве и снятии блокады Ленинграда, награжден орденом Красной звезды и медалями за боевые заслуги.

В 1946 году после демобилизации вернулся в ЛИТМО на кафедру “Теория оптических приборов”.

Трудовая деятельность Хваловского В.В. после войны:

- В 1946 – 49 годах – старший инженер с исполнением обязанностей зам. зав. кафедрой по учебной работе.
- С 1956 года доцент Хваловский В.В. подготовил и прочитал курсы лекций по шести дисциплинам: Теория оптических приборов, Оптико-механические приборы, Сканирующие оптические системы, Проектирование и расчет оптических систем, Асферическая оптика, Расчет оптических систем.

- С 1984 года двенадцать лет посвятил вопросам автоматизации проектирования оптических систем, создал пакеты прикладных программ для применения в учебном процессе с целью сокращения времени при выполнении домашних расчетных заданий, УИРС, курсовых и дипломных проектов.

- С 1970 по 1995 год подготовил 24 выпуска инженеров по специализации кафедры. Свыше 400 специалистов по расчёту оптических систем — его ученики.

- В 1994-95 годах доцент Хваловский В.В. провёл исследование ранее не описанной в литературе особой группы оптических систем, называемых «гомотопическими» и разработал для них общую теорию геометрического расчета.

- С 1969 по 1993 год доцент Хваловский В.В. — постоянный рецензент журнала «Известия ВУЗов — Приборостроение», им написано более 50 рецензий.

За 50 лет инженерной и научно–исследовательской работы доцент Хваловский В.В. выполнил более 100 научно-исследовательских работ, получивших практическое применение.

В списке научных трудов — 92 наименования, из которых: 28 авторских свидетельств на изобретения, 5 зарубежных патентов (США, Франции, Австрии, Англии, Нидерландов), 4 учебных пособия, 31 статья в научных журналах (ОМП, Известия ВУЗов — Приборостроение), 24 отчета по НИР (в основном рукописи по закрытым работам).

Высокую оценку (Золотая медаль, Лейпциг, 1989) получило "Устройство для когерентного освещения объектов" (А.с. N 593276), созданное группой авторов под его руководством.

Хваловский В.В. подготовил шест кандидатов технических наук.

Хваловскому В.В. присвоено звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации».

Научные труды и лекции Хваловского В.В. актуальны до настоящего времени. Его лекции являются настольной книгой для многих его учеников.

Цуканова Галина Ивановна,
Карпова Галина Васильевна,
Багдасарова Ольга Васильевна

Прикладная оптика. Часть 2.

Учебно-методическое пособие.

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

К.Д. Бутылкина

Н.Ф. Гусарова

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