

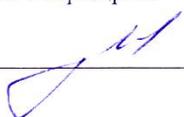
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт *высокоточных систем им. В.П. Грязева*  
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры  
«Приборы управления»  
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

  
В.В. Матвеев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению курсового проекта по дисциплине**  
**(модулю)**  
**«Основы конструирования оптических приборов»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**12.03.03 Фотоника и оптоинформатика**

с направленностью (профилем)  
**Интеллектуальные фотонные системы**  
Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

**Разработчик методических указаний:**

Алалуев Р.В., доц. каф., к.т.н., \_\_\_\_\_



(подпись)

<b>Введение</b> .....	4
<b>1. Задачи учебного проектирования</b> .....	4
<b>2. Методика учебного проектирования</b> .....	6
<b>2.1. Техническое задание на курсовое проектирование</b> .....	6
<b>2.2. Содержание и правила оформления пояснительной записки</b> .....	7
<b>2.3. Оформление графического материала</b> .....	10
<b>3. Методика расчетов в курсовом проектировании</b> .....	13
<b>3.1. Расчет проекционной установки.</b> .....	15
<b>3.2 Расчет микроскопа</b> .....	21
<b>3.3 Расчет телескопической системы</b> .....	28
<b>4. Варианты заданий</b> .....	38
<b>Литература</b> .....	39

## **Введение**

Современные оптические приборы — это сложные комплексы, функциональной основой которых являются законы оптики. С их помощью решаются разнообразные задачи исследования физических явлений, контроля производственных процессов, метрологических измерений и многие другие задачи в машиностроении, медицине, астрономии, средствах наблюдения и связи.

Качество приборов в значительной степени определяется процессом проектирования, когда материализуется замысел разработчика и создается проект в виде конструкторского решения с учетом возможностей технологии, требований эстетики и экономики. В этой работе заняты специалисты всех категорий, от знаний и профессиональной культуры которых зависит успешное решение поставленной задачи. В связи с этим необходимо совершенствовать конструкторскую подготовку учащихся. Без такой подготовки невозможно создать отряд квалифицированных работников научных, проектных и производственных предприятий.

### **1. Задачи учебного проектирования**

Курсовое проектирование является учебным. Его основная задача -научить будущего конструктора использовать приобретенные знания и индивидуальные способности для решения конкретного технического вопроса. Оно завершает цикл изучения общетехнических и специальных дисциплин. Теоретической основой курсового проектирования является предмет «Расчет и конструирование ОМП», который знакомит учащегося с принципами конструирования и выпуском рабочих чертежей деталей, сборочных единиц и простейших оптических приборов. Считается, что к этому времени учащиеся овладели приемами черчения, без труда читают производственные чертежи базовых предприятий и способны создавать несложные проекты.

В процессе выполнения курсового проекта учащийся должен:

тщательно изучить полученное задание;

подобрать и изучить необходимую литературу;

изучить и проанализировать оптические схемы и конструкции заданной группы приборов, оценить их достоинства и недостатки;

произвести расчет заданной оптической схемы и кинематические расчеты механизмов, добиваясь простого конструктивного решения при наиболее полном удовлетворении технического задания;

определить необходимые конструкторские базы, решить вопрос компоновки прибора;

на основе требований задания и оптической схемы выполнить графическую часть проекта в соответствии с ЕСКД;

провести технико-экономическое обоснование проекта и составить пояснительную записку.

В зависимости от требований задания содержание проекта может меняться и дополняться.

Как и рабочее проектирование, курсовой проект можно разделить на три части: теоретическую, расчетную и конструкторскую.

Работа над теоретической частью учит обращению с книгой, целенаправленному сбору и обработке нужной информации, проведению анализа для выявления достоинств и недостатков конструкций-аналогов. Правильно организованная работа на этом этапе воспитывает у учащегося способность логически мыслить, обобщать, делать выводы и творчески относиться к поиску нужного решения.

На этапе выполнения расчетной части курсового проекта проверяется умение учащегося правильно понимать физические и технические закономерности, используемые в приборе, оценивать качественную сторону выбранной конструкции и принимать необходимые меры для ее оптимизации. Необходимость в расчетах и их сложность приводят его к освоению вычислительной техники.

Конструкторская работа прививает будущему специалисту профессиональные навыки конструктора: способность творчески обобщать полученную информацию, создавать теоретическую модель и выражать ее графически по законам ЕСКД в виде конкретной конструкции. Она развивает умение разрабатывать конструкторскую документацию по требованиям ТЗ и на основе заданной оптической схемы. При этом черчение наряду с устной речью, письменностью, математическими формулами и т. п. выступает важнейшим средством коммуникации, обязательным для всех технических работников. В процессе самостоятельной работы над курсовым проектом учащиеся овладевают свободным чтением чертежей большой сложности.

Необходимый эффект от курсового проекта возможен только при методически правильной организации его выполнения. Следует учитывать, что это первая самостоятельная конструкторская работа учащегося, а как показала практика, основная сложность выполнения проекта начинается там, где необходимо самостоятельно принимать конкретное техническое решение. Даже при наличии хороших теоретических знаний их логическое использование затруднено из-за отсутствия опыта конструкторской работы. В связи с этим целесообразно рассматривать учебное проектирование как процесс, который организует и совмещает теоретическую подготовку с творческой работой.

## **2. Методика учебного проектирования**

### **2.1. Техническое задание на курсовое проектирование**

Техническое задание составляют в соответствии с ГОСТ 2. 105-79\* (СТ СЭВ 2667-80) и ГОСТ 15. 001-73\*. Оно должно содержать необходимую информацию для выполнения курсового проекта. Особое внимание следует уделить четкости постановки задания для каждого этапа курсового проектирования. Необходимо, чтобы учащийся, изучив ТЗ, понимал поставленную задачу и умел ориентироваться в общих вопросах данной группы приборов. Для этого в ТЗ должна быть указана рекомендованная литература.

При создании ТЗ нужно учитывать, что курсовой проект по предмету «Конструирование ОМП» должен соответствовать программе предмета и вместе с тем отражать специализацию базовых предприятий. В связи с этим желательны в качестве приложения к ТЗ оптическая схема и чертежи прибора или механизма базового предприятия с конкретным указанием того, что требуется изменить и почему. При этом особое внимание необходимо уделять наибольшей расчлененности конструкции прибора на типовые оптические и механические сборочные единицы (объективы, окуляры, осветители, щели, диафрагмы, установочные механизмы и т. п.) и точности их взаимосвязи в соответствии с оптической схемой.

При выдаче ТЗ нужно учитывать способность и степень подготовки учащегося к предлагаемой работе, его заинтересованность в ней с учетом будущей специальности. В большинстве случаев ТЗ должно быть типовым, однако хорошо подготовленным учащимся можно выдавать оригинальные задания по новой разработке.

В качестве тем курсовых проектов целесообразно использовать приборы и сборочные единицы, которые изучают в процессе обучения и имеют отношение к большинству ОМП базовых предприятий.

## **2.2. Содержание и правила оформления пояснительной записки**

Пояснительная записка к курсовому проекту (ПЗ) в объеме 20-40 листов содержит материалы, поясняющие смысл выполненной работы с учетом требований ТЗ. Содержание и объем разделов ПЗ должны быть следующими.

Оглавление (1 стр.). Выполняется на формате А5 (ГОСТ 2. 106- 96\*).

Введение (2- 3 стр.). В нем необходимо отразить достижения оптико-механического приборостроения, развитие оптики, оснащение приборов вычислительной техникой, расширение их функциональных возможностей за счет использования лазерной техники, голографии, волоконной оптики, телевидения и

т. п. Необходимо показать перспективу дальнейшего развития оптического приборостроения.

1. Обзор существующих схем и конструкций (6- 8 стр.). Это основной теоретический раздел, в котором необходимо указать назначение проектируемого прибора (сборочной единицы), четко сформулировать задачу, решаемую прибором, и проанализировать другие возможные способы решений той же задачи. Если прибор (сборочная единица) модернизируется, то следует подробно разобрать недостатки аналога и дать теоретическое обоснование необходимости модернизации. Раздел должен заканчиваться принципиальной схемой прибора, предложенной для разработки в курсовом проекте.

2. Технические характеристики прибора (1-2 стр.). Каждая группа оптических приборов имеет свои определенные оптические характеристики: увеличение, поле зрения - для наблюдательных приборов; фокусное расстояние и относительное отверстие - для коллиматоров; разрешающая способность, точность и пределы измерения - для измерительных приборов. Могут быть и общие технические характеристики: условия эксплуатации, габаритные и присоединительные размеры, уровень автоматизации и т. п. Кроме того, в этом разделе необходимо указать оптические характеристики первичных сборочных единиц, используемых в приборах: объективов, окуляров, конденсоров, оборачивающих систем, источников излучения и приемников.

3. Расчетная часть (5-6 стр.). В зависимости от темы курсового проекта расчеты могут быть оптические, кинематические и точностные. Обязательным является габаритный расчет оптической схемы, который выполняют по рекомендованной методике 3 (см. п. 3.1.).

4. Описание конструкции (2-3 стр.). Этот раздел ПЗ может быть выполнен только после завершения графической части проекта. Описание должно быть подробным и последовательным, сопровождаться указанием позиций деталей сборочного чертежа или пунктов его технических условий. Цель этого раздела - обосновать и объяснить крепление оптических

деталей, выполнение отдельных механизмов и их взаимосвязь, как достигается необходимая точность подвижных и неподвижных соединений, за счет каких перемещений осуществляется юстировка оптической схемы и

т. д.

5. Методика работы на приборе или методика юстировки (2-3 стр.).  
Раздел выполняется по решению руководителя курсового проекта.

Заключение (1-2 стр.). Раздел должен содержать краткий технико-экономический анализ выполненного проекта. Особое внимание нужно уделить анализу конструкции с точки зрения ее соответствия ТЗ.

В конце ПЗ размещают список литературы и приложения.

В зависимости от темы курсового проекта могут быть изменены наименования разделов и последовательность их расположения. Так, если проект предусматривает макетирование, то в ПЗ включаются разделы с описанием эксперимента, методики и результатов испытаний, технологии изготовления макета и т. п. Все материалы иллюстрируются схемами, графиками, характеристиками и осциллограммами. Пояснительную записку помещают в папку, на лицевую сторону которой наклеивают титульный лист.

Оформление ПЗ должно соответствовать общим требованиям выполнения текстовых документов, которые изложены в ГОСТ 2. 105-79\*. Записку следует выполнять на листах формата 210X297 мм по ГОСТ 2. 301-68\* с нанесением на них рамки и оформлением по ГОСТ 2. 106- 68\* для формата 5 и 5а.

Текст ПЗ пишется от руки черными или синими чернилами четко и аккуратно. Терминология и определения должны соответствовать установленным стандартам, например ГОСТ 7427-76\* - для геометрической оптики, а при их отсутствии - общепринятым в научно-технической литературе. Сокращения в тексте допускаются только тех слов, которые установлены ГОСТ 2. 316-68\*, ГОСТ 7.12-77\* и ГОСТ 7.11-78\*.

Изложение ведут в неопределенной форме (“находим”, “определяем”, “по данной формуле было рассчитано” и т. п.).

Все страницы ПЗ должны быть пронумерованы, кроме первых двух (задания и оглавления). Номера проставляют внизу, в штампе.

Каждый новый раздел должен начинаться с новой страницы и с указанием номера раздела и его наименования. Введение и заключение как разделы не нумеруют.

Рисунки и таблицы следует размещать в тексте так, чтобы можно было их читать без поворота записки или с поворотом по часовой стрелке.

При изложении текста особое внимание следует уделять правильному написанию чисел, символов, формул и оформлению списка литературы.

### **2.3. Оформление графического материала**

Учащийся, прежде всего, должен знать, что конструкторская документация не самоцель, а средство для создания на производстве действующего устройства. Чертеж и разработанная на его основе технология являются законом при изготовлении детали, сборочной единицы и прибора в целом. Эта взаимосвязь повышает ответственность при разработке документации и требует знания и умения использовать существующие стандарты.

Приступая к выполнению графического материала курсового проекта, учащийся должен знать следующее:

разработанная конструкция должна всегда соответствовать ТЗ;

основой при создании оптического устройства является оптическая схема; ее требования должны выполняться от эскизного проекта до выпуска рабочих чертежей;

компоновка устройства должна обеспечить наименьшие габаритные размеры, рациональную форму и простоту сборки и юстировки;

целесообразно объединить как можно больше деталей в самостоятельные сборочные единицы, которые могли бы быть отдельно собраны, проверены и аттестованы;

целесообразно объединить и отдельные сборки в функционально завершенные сборочные единицы;

конструкция должна быть гармонична; это значит, что все ее детали и сборочные единицы должны обладать одинаковой степенью соответствия требованиям точности, жесткости, прочности, надежности и эргономики;

выбор материала должен быть обоснованным; необходимо, чтобы физико-механические свойства выбранного материала обеспечивали работоспособность детали при оптимальной его массе и габаритных размерах с учетом технологических и экономических требований;

конструкция каждой детали должна быть технологична, т. е. для ее изготовления должны требоваться наименьшие затраты времени, труда и средств в условиях конкретного производства; прежде всего необходимо сокращать механическую обработку детали резанием и использовать прогрессивные средства формообразования;

необходимо сокращать количество типоразмеров сборочных единиц, деталей и их элементов; для повышения технико-экономических показателей конструкции требуется повсеместно внедрять унификацию и стандартизацию;

вся конструкторская документация должна выполняться в соответствии с существующими стандартами.

Графическая часть курсового проекта по предмету «Расчет и конструирование ОМП» должна содержать три листа:

лист 1 (формат А1) - сборочный чертеж устройства;

лист 2 (формат А2-А1) - оптическая схема устройства, выполненная по ГОСТ 2. 412-81 (СТ СЭВ 130-74);

лист 3 (формат А1) - не менее пяти чертежей деталей, из которых одна должна быть оптической.

Сборочный чертеж проекта должен быть выполнен в масштабе (ГОСТ 2. 302-68\*) с необходимым количеством изображений (видов, разрезов и сечений) по ГОСТ 2.305-68\*, дающих полное представление о габаритных размерах конструкции, назначении и связи составных частей, взаимодействии этих частей в

процессе работы, сборки, разборки и контроля сборочных единиц. Сборочный чертеж следует выполнять с условностями и упрощениями, предусмотренными ГОСТ 2.109-73\* (СТ СЭВ 858-78, СТ СЭВ 1182-8) и другими стандартами на оформление чертежей. Например, допускается не показывать выступы, рифления, насечки и другие мелкие элементы; сварную сборку изображать как монолит; шестигранные и квадратные головки гаек показывать упрощенно; крепежные детали, шпонки, сплошные валы и зубья колес условно показывать нерассеченными, если секущая плоскость проходит через их ось; ребра жесткости и другие тонкие стенки показывать рассеченными, но без нанесения штриховки; пластины, а также элементы деталей размером 2 мм и меньше изображать с отступлением от масштаба в сторону увеличения.

Основные надписи на чертеже должны соответствовать ГОСТ 2.104-68. Спецификацию к сборочному чертежу оформляют по ГОСТ 2.108-73.

При выполнении чертежей деталей следует ограничиться наименьшим количеством изображений, но при этом чертеж должен содержать все данные, необходимые для изготовления детали и ее контроля: номинальные размеры, их предельные отклонения, форму и расположение поверхностей, параметры их шероховатости, материал, покрытие и другие технические требования. Для деталей, представляющих собой тела вращения, в большинстве случаев достаточно дать одно изображение, добавляя к нему разрезы и сечения в соответствии с ГОСТ 2.305-68\*. Правила нанесения размеров регламентированы ГОСТ 2.307-68\*. При выполнении сварных конструкций сварные швы на чертеже следует изображать и обозначать по ГОСТ 2.312-72. На чертежах деталей, подвергаемых термической и другим видам обработки, все требования необходимо записывать в соответствии с ГОСТ 2.310-68\* (СТ СЭВ 367-76). Общие технические требования на чертеже детали записывают по ГОСТ 2.316-68\*. Предельные отклонения размеров наносят на чертеж в соответствии с единой системой допусков и посадок ГОСТ 25346-82 и ГОСТ 25347-82 (ЕСДП по СТ СЭВ 144-75 и СТ СЭВ 145-75). Стандарты СЭВ рекомендуют применять преимущественно посадки в системе отверстия. Это сокращает номенклатуру инструмента и калибров. Для

наиболее употребительных размеров от 1 до 500 мм посадки указаны в ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75). Допуски формы и расположения поверхностей назначают в соответствии с ГОСТ 2.308-79\* (СТ СЭВ 368-76). Шероховатость поверхности нормируется ГОСТ 2.309-73\* (СТ СЭВ 1632-79).

Чертежи оптических деталей должны выпускаться в соответствии с ГОСТ 2.412-81 (СТ СЭВ 139-74) и другими стандартами. Исходными данными для простановки всех размеров, точности изготовления, требований к материалу, покрытию и характеристикам является расчет оптической схемы.

Допуски на нормируемые элементы оптических деталей размещают в таблице, расположенной в правой верхней части чертежа. В соответствии с ГОСТ 2.412-81 таблица состоит из трех частей: верхней, содержащей требования к материалу, средней - с требованиями к изготовлению и нижней, в которой сосредоточены все расчетные данные.

### **3. Методика расчетов в курсовом проектировании**

Любые расчеты могут быть разделены на три основные части. Первая часть содержит исходные данные, их источники и обоснования. Во второй части формулируется задача и рекомендуется методика расчета. Третья часть является решением самой задачи. Для ее выполнения математика имеет как точные, так и приближенные методы.

В процессе учебного проектирования чаще всего выполняют габаритный расчет оптической системы, расчет на точность, кинематические расчеты механизмов и другие специальные расчеты, соответствующие содержанию курсового проекта.

Расчеты позволяют не только создать оптическую и другие схемы прибора, но и оценить правильность выбора его принципа действия. На этапе эскизного проектирования при решении вопросов компоновки прибора расчеты позволяют взаимосвязать оптическую схему с реальной конструкцией, правильно выбрать конструктивные параметры звеньев, решить вопросы базирования и обеспечения заданной точности.

В процессе создания кинематической схемы прибора анализируют технологичность конструкции, выбирают нужные механизмы и рассчитывают требования к их точности. Для создания средств юстировки производят расчет юстировочных механизмов прибора, которые отличаются малыми перемещениями и высокими или сверхвысокими точностями.

После анализа оптической схемы и оценки перечисленных факторов окончательно определяют число необходимых регулировочных перемещений, их величину и точность. Число юстировочных механизмов прибора должно быть наименьшим, так как оно прямым образом влияет на стабильность его работы. То же самое можно отметить и о числе кинематических звеньев и их связей: каждое лишнее звено снижает точность прибора и каждая лишняя связь ухудшает стабильность его характеристик. В связи с этим для оптического прибора расчет на точность, как правило, является обязательным. Но при учебном проектировании он выполняется индивидуально, при непосредственном участии руководителя проекта. Это объясняется сложностью расчета. Простые расчеты механизмов на точность рассмотрены в работе. Для измерительных приборов производят расчет чувствительности, которая характеризует точность устройства только в отношении погрешности отсчета.

Большое внимание необходимо уделять оценке условий работы прибора. Нужно помнить, что в точной механике даже незначительные деформации деталей могут оказать существенное влияние на работу прибора.

Несущие статические конструкции при проектировании оптических приборов, как правило, не рассчитывают. Их точность, прочность и жесткость выбирают из технологических соображений. Расчеты производят только для измерительных приборов и для устройств, испытывающих большие термические или динамические нагрузки.

Кроме вышперечисленных расчетов могут быть сделаны специальные расчеты, зависящие от особых требований к прибору или к условиям его эксплуатации. Например, светотехнический расчет прибора, расчет разгрузки

зеркала, расчет интерьера прибора в соответствии с требованиями инженерной психологии, расчет грузоподъемности и т. п.

В курсовом проекте обязательными являются габаритный расчет оптической схемы и кинематические расчеты используемых механизмов. Остальные расчеты учащиеся выполняют по указанию руководителя курсового проекта.

### 3.1. Расчет проекционной установки.

Проекционные системы служат для получения на экране действительных изображений предметов, освещенных лучами источника света. Проекция прозрачных предметов в проходящем свете называется диапроекцией, а непрозрачных в отраженном — эпипроекцией. Изображение на экране должно иметь достаточную яркость. Из экспериментальных исследований установлено, что яркость экрана  $L$  при диапроекции должна быть от 20 до 50  $кд/м^2$ .

Яркость любого экрана зависит от его отражающей способности и освещенности. Для диффузно отражающего экрана:

$$L = \rho \frac{E}{\pi} \quad (2.1)$$

где  $\rho$  - коэффициент отражения экрана (можно считать 0,8);

$E$  - освещенность экрана.

Следовательно, освещенность экрана должна при диапроекции быть 80÷200лк.

Зная освещенность экрана и его площадь, можно определить световой поток  $\Phi'$  падающий на экран из проекционной системы и, с учетом коэффициента полезного действия всей установки, полный световой поток, который должен иметь источник равен:

$$\Phi_0 = (20 \div 100) \Phi' \quad (2.2)$$

Для того, чтобы использовать этот поток наиболее рационально, используют одну из двух схем:

- осветительная система образует изображение источника света в кадровом окне;
- осветительная система образует изображение источника света во входном зрачке проекционного объектива.

В первом случае на экране одновременно получают изображения диапозитива и источника света, поэтому тело накала в этом случае должно быть равномерно светящимся. Кроме того, в плоскости кадрового окна происходит концентрация энергии, что приводит к быстрому нагреву диапозитива. Все это

ограничивает область применения этой схемы. Рассмотрим подробно вторую схему (рисунок 2.1).

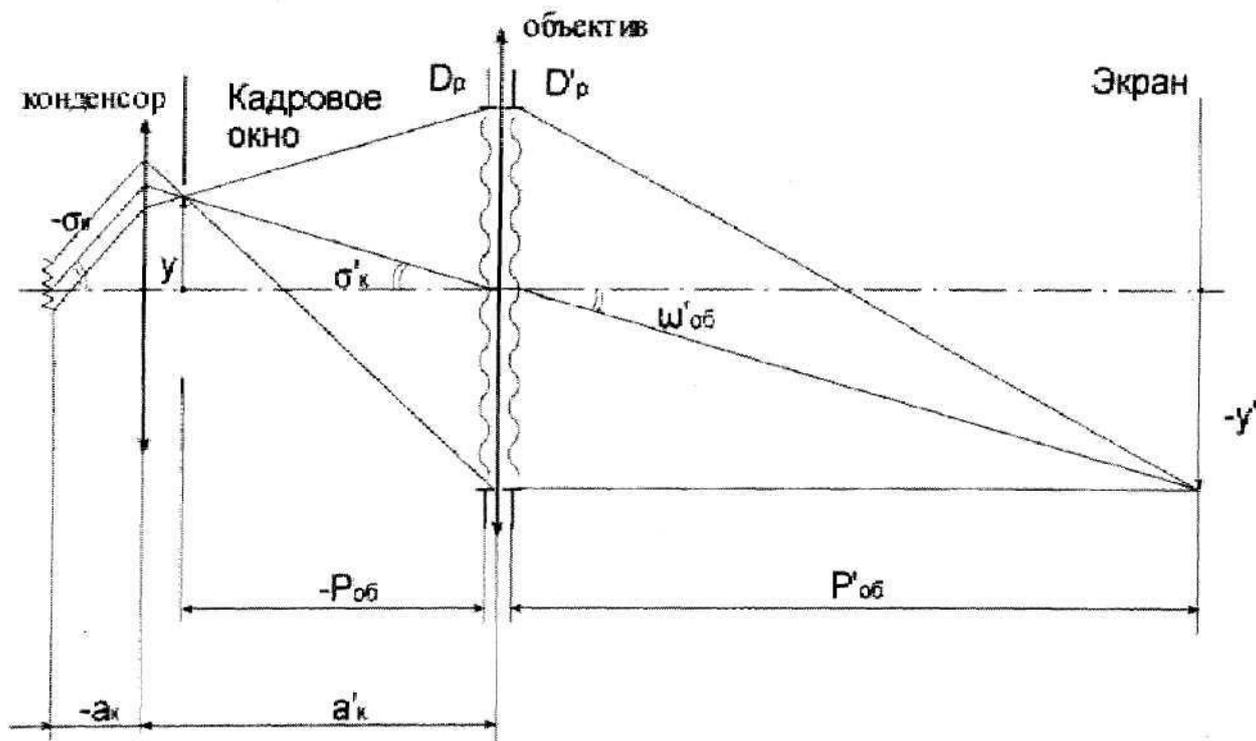


Рисунок 2.1. Принципиальная схема проекционной установки

В этом случае от каждой точки источника, независимо, насколько ярко она светится, свет равномерно освещает кадровое окно и попадает во входной зрачок проекционного объектива, что обеспечивает равномерность освещенности изображения. Методика расчета компонентов этой схемы изложена в указаниях к выполнению работы.

Допустим, нужно рассчитать диапроеctionную установку для демонстрации слайдов  $18\text{мм} \times 24\text{мм}$  на экран  $1000\text{мм} \times 1500\text{мм}$  в помещении

$$l = (5000 \div 6000)\text{мм}.$$

Известно, что при диапроекции необходимо иметь на экране освещенность  $E \approx 200\text{лк}$ .

Такую освещенность обеспечит световой поток:

$$\Phi' = E \cdot S = 200 \cdot 1 \cdot 1,5 = 300\text{лм} \quad (2.3)$$

Следовательно, источник должен иметь полный световой поток:

$$\Phi_0 = (20 \div 100) \Phi' = (6000 \div 30000)\text{лм}. \quad (2.4)$$

Из каталога проекционных ламп [3] находим лампу K12(110в×300вт) с полным световым потоком 6450лм, имеющую тело накала  $8 \times 8,5$  и диаметр колбы 37мм. Габаритная яркость не дана. Рассчитываем ее по формуле:

$$\Phi = 2\pi LdS, \quad (2.5)$$

где  $L$  - габаритная яркость лампы;

$dS$  - площадь тела накала в  $i^2$ .

$$L \approx 15000000 \text{ кд/м}^2 \quad (2.6)$$

При такой яркости источника для обеспечения необходимой освещенности надо иметь выходной зрачок проекционного объектива диаметром:

$$D'_p = 2p' \sqrt{\frac{E}{\tau \pi L}} \quad (2.7)$$

где  $p'$  - расстояние от объектива до экрана;

$E$  - заданная освещенность на экране;

$\tau$  - коэффициент пропускания объектива (принять  $\tau = 0,8$ );

$L$  - яркость источника света.

В нашем случае:

$$D'_p = 2 \cdot 5250 \sqrt{\frac{200}{0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^7}} = 24,1 \text{ мм} \quad (2.8)$$

Исходя из габаритных характеристик:

$$\beta_{об} = \frac{y'}{y} = \frac{1500}{24} = -62,5 \quad (2.9)$$

Но:

$$\beta_{об} = -\frac{z'_{об}}{f'_{об}} = \frac{a'_{об} - f'_{об}}{f'_{об}} \quad (2.10)$$

Следовательно:

$$f'_{об} = -\frac{a'_{об}}{1 - \beta_{об}} = \frac{5250}{1 - (-625)} = 82,68 \quad (2.11)$$

Таким образом, находим объектив с относительным отверстием:

$$D/f' = 24/82,68 = 1/3,5$$

Угловое поле этот объектив должен иметь:

$$\text{tg} \omega' = \frac{l'}{f'} \quad (2.13)$$

где  $l'$  - половина диагонали экрана.

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{\sqrt{1000^2 + 1500^2}}{2 \cdot 5250} = 0,1717 \quad (2.14)$$

$$\omega' = 9^\circ 40', \quad 2\omega' = 19^\circ 20'.$$

Итак, необходим проекционный объектив со следующими характеристиками:

$$f' = 82 \text{ мм}, \quad 2\omega = 20^\circ, \quad D/f' = 1/3,5$$

В библиотеке оптических систем «Опал» находим объектив «Триплет» со следующими характеристиками:

$$f' = 80 \text{ мм}, \quad 2\omega = 40^\circ, \quad D/f' = 1/3,5$$

$S'_{F'}$	$S_F$	$S_P$	$S'_{P'}$
60,52	-58,3	23,2	-15,2

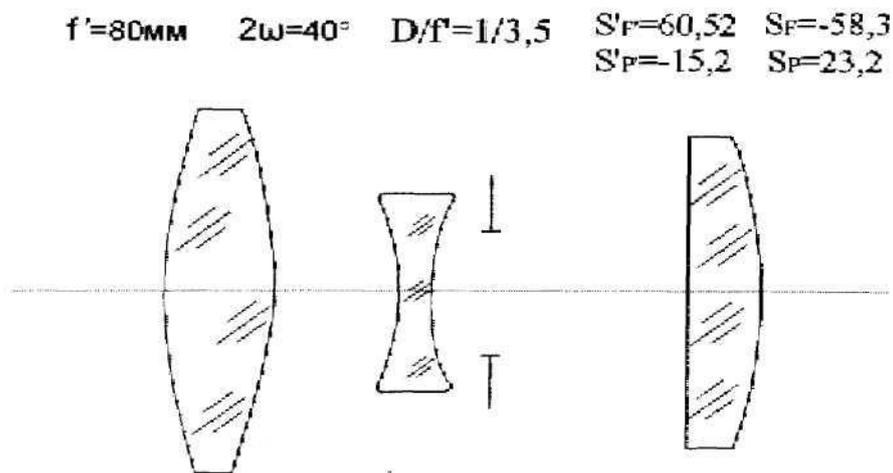


Рисунок 2.2, Объектив.

Теперь можем определить параметры проекционной части (с учетом того, что для проекции объектив необходимо перевернуть):

$$z'_{об} = -\beta f' = -(-62,5) \cdot 80 = 5000, \quad (2.15)$$

$$S' = z' + S'_{F'} = 5000 + 58,3 = 5058,3, \quad (2.16)$$

$$p'_{об} = S' - S'_{P'} = 5058,3 - (-23,2) = 5081,51, \quad (2.17)$$

$$z_{об} = -\frac{f}{\beta} = -\frac{-80}{-62,5} = -1,28 \quad (2.18)$$

$$-S = -S_F. \quad -z = 60,52 + 1,28 = 61,7 \quad (2.19)$$

$$-p_{об} = S + S'_P = 61,7 + 15,2 = 76,9. \quad (2.20)$$

Уточненный:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{l}{p} = \frac{\sqrt{24^2 + 18^2}}{2 \cdot 76,9} = 0,195 \quad (2.21)$$

$$\omega_{об} = 11^\circ.$$

Итак, мы имеем все данные для расчета aberrаций проекционной части установки по программе «Опал» и оформления оптической схемы и можем приступить к расчету осветительной части проекционной установки — конденсора.

Для расчета конденсора мы знаем, что:

$$\sigma_k' = 11^\circ.$$

$$\beta_k = \frac{D_p}{v} \quad (2.22)$$

где  $D_p$  - диаметр входного зрачка проекционного объектива;  $v$  - меньшая сторона тела накала лампы.

$$\beta_k = \frac{24}{v} = -3^\circ \quad (2.23)$$

Следовательно:

$$\sigma_k = \beta_k \cdot \sigma_k' \approx 30^\circ. \quad (2.24)$$

Суммарный угол охвата конденсора:

$$2(|\sigma_k| + |\sigma_k'|) = 82^\circ. \quad (2.25)$$

Известно, что при углах охвата конденсора  $60^\circ \div 90^\circ$  необходим трехлинзовый конденсор. Причем в нашем случае —  $S_k \geq 30 \text{ мм}$  т.к. диаметр лампы  $37 \text{ мм}$ , а  $S_k' \geq 90 \text{ мм}$ , т.к. —  $p_{об} = 76,9$

При расчете конденсора на минимум сферической aberrации принимаем силы линз одинаковыми и каждую линзу рассчитываем на минимум сферической aberrации. Тогда для нечетных углов нулевого луча с осью имеем формулу (при условии нормировки  $\alpha_1 = \beta_k, \alpha' = 1$ ):

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + \frac{1-\beta}{2} \quad (2.26)$$

где  $t$  — порядковый номер линзы конденсора;

$m$  - число линз конденсора;

$\beta$  — увеличение конденсора.

Для четных углов:

$$\alpha_{2t} = \frac{(2n+1)(\alpha_{2t-1} + \alpha_{2t+1})}{2(n+2)} \quad (2.27)$$

где  $n$  - показатель преломления стекла линз ( $n = 1,5$ ).

Определив « $\alpha$ », можно рассчитать радиусы кривизны поверхностей конденсора по известной формуле:

$$r = h \frac{n_{k+1} - n_k}{\alpha} \quad (2.28)$$

где  $h_k$  – высота нулевого луча на главной плоскости соответствующей поверхности рассчитывается по формуле:

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k \quad (2.29)$$

где  $d_k$  – расстояние по оси между поверхностями, а первую высоту определяем из условия:

$$h_1 = S_1 \alpha_1 = -30 \cdot (-3) = 90. \quad (2.30)$$

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
-3	-	1,6	-	-	0,3	1
	2,667	67	1,143	0,333	81	

Принимаем:

$$d_1 = d_3 = d_5 = 6,$$

$$d_2 = d_4 = 0,1$$

Тогда:

$$r_1 = 90 \frac{1,5 - 1}{1,5(-3) - 1(-3)} = -44,978$$

$$h_2 = 90 - (-2,667) \cdot 6 = 106,002,$$

$$r_2 = 106,002 \frac{1,5 - 1}{1(-1,667) - 1,5(-2,667)} = -22,713$$

$$h_3 = 106,002 - (-1,667) \cdot 0,1 = 106,169,$$

$$r_3 = 106,169 \frac{1,5 - 1}{1,5(-1,143) - 1(-1,667)} = -1117,6$$

$$h_4 = 106,169 - (-1,143) \cdot 6 = 113,027,$$

$$r_4 = 113,027 \frac{1,5 - 1}{1(-0,333) - 1,5(-1,143)} = -40,907$$

$$h_5 = 113,027 - (-0,333) \cdot 0,1 = 113,06$$

$$r_5 = 113,06 \frac{1,5 - 1}{1,5 \cdot 0,381 - 1(-0,333)} = 62,499$$

$$h_6 = 113,06 - 0,381 \cdot 6 = 110,774$$

$$r_6 = 110,774 \frac{1,5 - 1}{1 \cdot 1 - 1,5 \cdot 0,381} = 129,258$$

$$S'_k = \frac{h}{\alpha} = \frac{110,774}{1} = 110,774$$

Если бы  $S'_k$  получилось меньше 90мм, необходимо было бы провести расчет в обратном порядке, задав  $h_{носл} = 90$ .

В итоге получаем схему проекционной установки, приведенную на рисунке 2.3.

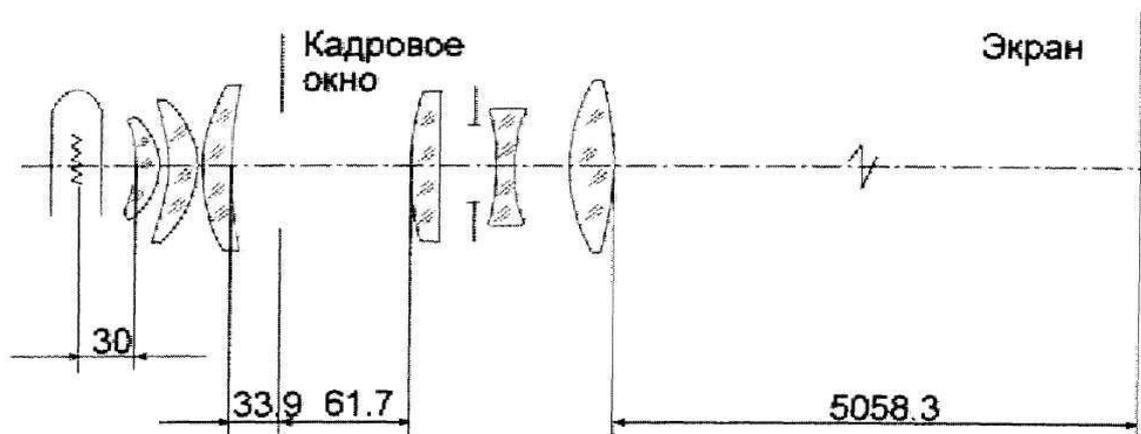


Рисунок 2.3. Схема проекционной установки

### 3.2 Расчет микроскопа

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

Микроскопы различных предназначений 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 3.1.):

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

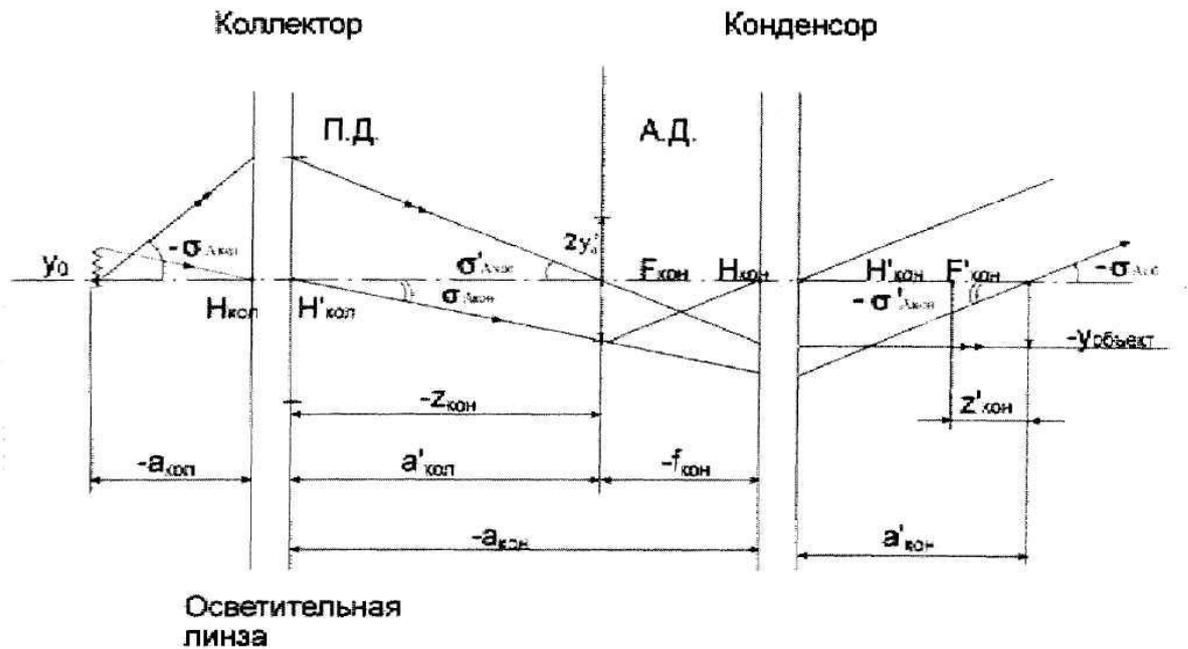


Рисунок 3.1. Ход лучей в осветительной части микроскопа в проходящем свете.

В передней фокальной плоскости конденсора находится вторая ирисовая диафрагма служащая апертурной. Осветительная система микроскопа рассчитывается обычно по методу Кеплера. 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 Кеплера 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:

$$y_0 \cdot A_{кол} = y_{об} \cdot A_{об} = y_{об} \cdot A'_{кон} \quad (3.1)$$

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

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

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

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

$A'_{кон} = n' \cdot \sin \sigma'_{Акон}$  - 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:

$$\beta_{кон} = -\frac{2y_{об}}{r} = -\frac{f_{кон}}{z_{кон}} = -\frac{z_{кон}}{r'} = -\frac{A_{кон}}{A'} = -\frac{A_{кон}}{A} \quad (3.2)$$

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

Определение диаметра апертурной диафрагмы:

$$D_{АД} = -2 z_{кон} A_{кон} = -2 f_{кон} A_{об} = 2y_{об}' \quad (3.3)$$

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

Вычисление числовой апертуры коллектора:

$$A_{кол} = \frac{y_{об} A_{об}}{y_0} \quad (3.4)$$

Определение линейного увеличения коллектора:

$$\beta_{кол} = -\frac{D_{АД}}{2y_0} \quad (3.5)$$

Определение фокусного расстояния коллектора:

$$f'_{кол} = -\frac{a'_{кол}}{1 - \beta_{кол}} \quad (3.6)$$

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

$$z_{кол} = \frac{f'_{кол}}{R} \quad (3.7)$$

Вычисление диаметра полевой диафрагмы коллектора:

$$D_{ПД} = -\frac{2y_{об}}{R} \quad (3.8)$$

Определение положения объекта относительно заднего фокуса конденсора:

$$z_{кон} = -\beta_{кон} f'_{кон} \quad (3.9)$$

Рассмотрим формирование изображения визуальной системой микроскопа, состоящей из объектива и окуляра (рисунок 3.2).

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  $\Delta_0$  называется оптической длиной тубуса микроскопа.

Из рисунка 3.2 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  $\Gamma$ , линейное поле  $2y_{об}$ , числовая апертура  $A_{об}$ . К остальным характеристикам относятся: линейный предел разрешения  $\delta$ , 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:

$$\bar{\Gamma} = \frac{tg\omega'}{tg\omega} \quad (3.10)$$

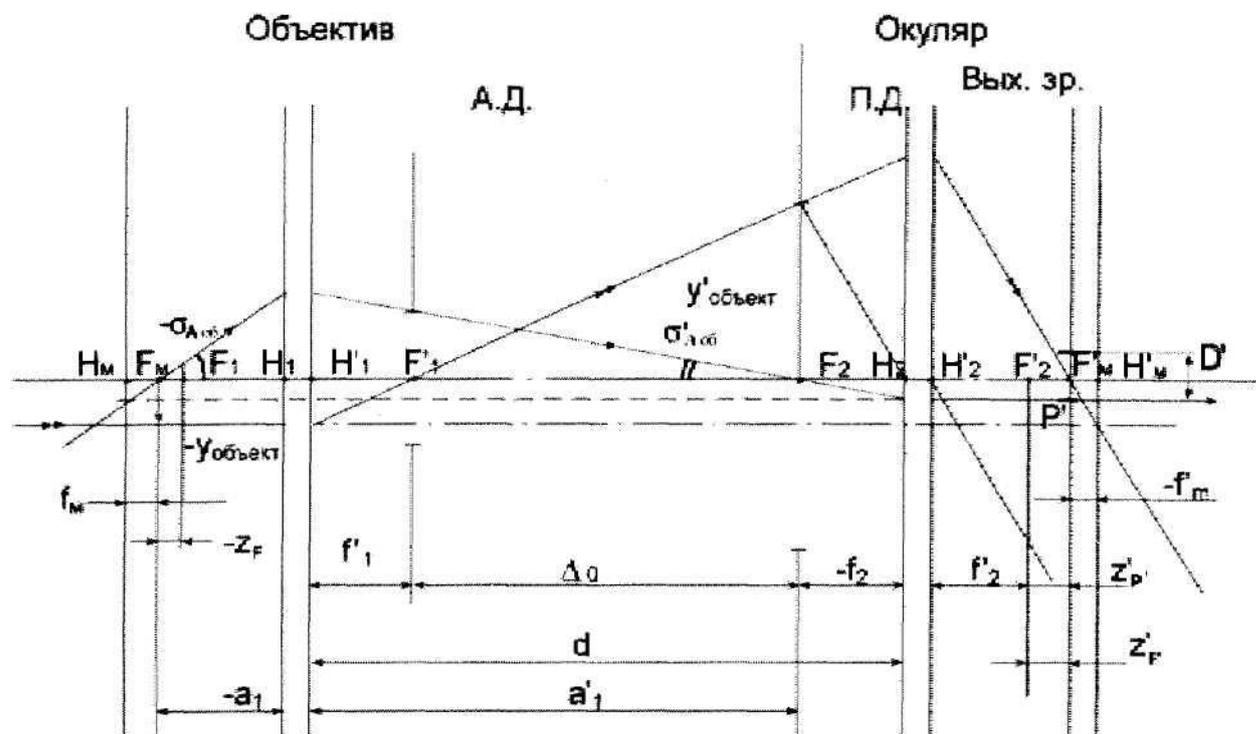


Рисунок 3.2. Ход лучей в наблюдательной системе микроскопа, состоящей из объектива и окуляра

### Основные формулы для расчета

1. Видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'_m} = -\frac{\Delta_0 \cdot 250}{f'_{об} \cdot f'_{ок}} = \beta_{об} \cdot \bar{\Gamma}_{ок} = \frac{500 \cdot A_{об}}{D'} \quad (3.11)$$

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

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

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

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

2. Линейное увеличение объектива:

$$\beta_{об} = -\frac{D_{ПД}}{2y_{об}} = \frac{A_{об}}{A'_{об}} = \frac{n \cdot \sin \sigma_{A_{об}}}{n \cdot \sin \sigma'_{A_{об}}} \quad (3.12)$$

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  $z_F$ .

$$f'_m = -\frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{2} \quad (3.13)$$

$$z'_{F'} = \frac{f'_{ок}}{2} \quad (3.14)$$

$$z_F = \frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{2} \quad (3.15)$$

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

4. Определение размера апертурной диафрагмы микроскопа:

$$D_{АД} = -2\Delta_0 \cdot \operatorname{tg} \sigma'_{A_{об}} \cong 2f'_{об} \cdot A_{об}, \quad (3.16)$$

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

$$\operatorname{tg} \sigma'_{A_{об}} = \frac{D'}{2f'_{ок}} \quad (3.17)$$

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

$$z'_p = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0} \quad (3.18)$$

6. Определение линейного увеличения окуляра в зрачках:

$$\beta_{ок} = -\frac{D'}{D_{АД}} = -\frac{f'_{ок}}{\Delta_0} \quad (3.19)$$

7. Определение числовой апертуры объектива в пространстве изображений:

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

или:

$$A'_{об} = n' \sin(\arctg \frac{D'_{АД}}{\gamma_{\lambda}}) \quad (3.21)$$

8. Определение диаметра полевой диафрагмы микроскопа:

$$D_{ПД} = 2y'_{об} = 2y_{об} \cdot \beta_{об} = 2f'_{ок} \cdot tg\omega', \quad (3.22)$$

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

9. Определение разрешающей способности микроскопа в линейной мере:

$$\delta = \frac{\lambda}{\gamma'} \quad (3.23)$$

где  $\lambda$  - длина волны света в мм.

10. Определение глубины резко изображаемого пространства:

$$T = T_a + T_e = \frac{250}{\Gamma_m^2} + \frac{\lambda}{2A_{об}^2} \quad (3.24)$$

где  $T_a$  - аккомодационная глубина;

$T_e$  - волновая глубина.

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

$$T = T_e = \frac{\lambda}{\gamma'^2} \quad (3.25)$$

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

$$500A_{об} \leq \Gamma_m \leq 1000A_{об}. \quad (3.26)$$

Применение микроскопов с увеличением, больше полезного, не выявляет новых подробностей предмета, но при этом требуется более точная фокусировка, т.к. глубина резко изображаемого пространства уменьшается.

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

$$0,5\text{мм} \leq D'_p \leq 1\text{мм}. \quad (3.27)$$

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

Величина  $\Delta_0$  изменяется от 160мм до 200мм в зависимости от фокусного расстояния объектива. Для того, чтобы выдержать эти значения, положение

объективов при их установке на прибор фиксируется нижним срезом тубуса микроскопа.

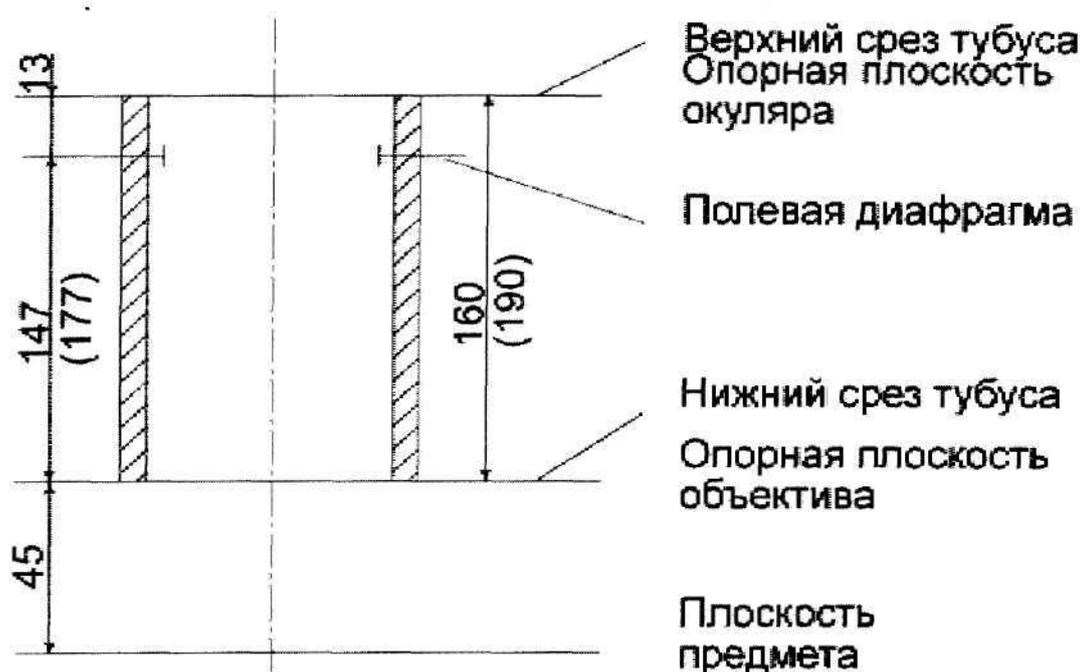


Рисунок 3.3. Схема тубуса упрощенного микроскопа.

Оправа окуляра опирается на верхний срез тубуса (рисунок 3.3). Расстояние от нижнего до верхнего среза тубуса называется механической длиной тубуса, которая стандартизована. Она равна 160мм для микроскопов, работающих в проходящем свете, и 190мм для микроскопов, работающих в отраженном свете. Остальные стандартные величины показаны на рисунке 3.3.

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 3.3), 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 3.4). Изображение расположено в задней фокальной плоскости тубусной линзы.

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

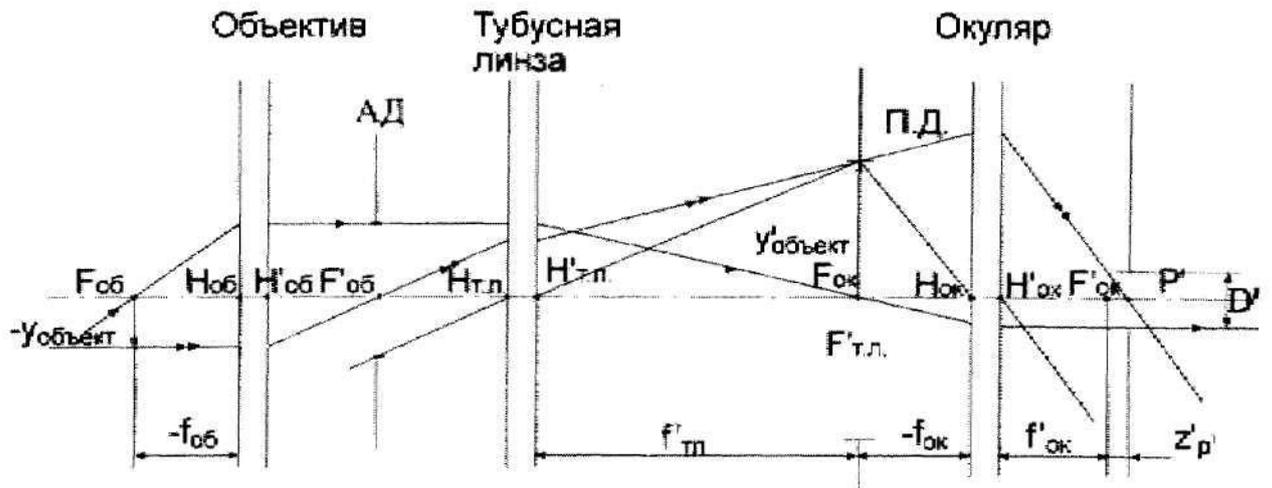


Рисунок 3.4. Ход лучей в наблюдательной части микроскопа, содержащей объектив с тубусом бесконечность.

### Основные формулы для расчета

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

$$\beta_{об+т.л.} = -\frac{f'_{т.л.}}{f'_{об}} = -\frac{D_{ПД}}{z_p} \quad (3.28)$$

2. Видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об+т.л.} \cdot \bar{\Gamma}_{ок} = -\frac{f'_{т.л.}}{f'_{об}} \cdot \bar{\Gamma}_{ок} \quad (3.29)$$

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

$$\bar{\Gamma}_{т.л.+окуляр} = -\frac{f'_{т.л.}}{f'_{ок}} = \frac{D_{АД}}{D'} \quad (3.30)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_p = \frac{z_p \cdot f_{ок}^2}{f_{т.л.}^2} \quad (3.31)$$

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.

### 3.3 Расчет телескопической системы

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:

$$A = n \cdot \sin |\sigma_A| = 0 \quad (5.1)$$

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:

$$A' = n' \cdot \sin |\sigma'_A| = 0 \quad (5.2)$$

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  $\Delta$  - расстояние между точкой  $F'_1$  заднего фокуса

объектива и точкой  $F_2$  переднего фокуса окуляра – равнялся нулю:

$$\Delta = 0 \quad (5.3)$$

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  $\Gamma_T$ , линейное  $\beta$ , угловое  $\gamma$  и продольное  $\alpha$  увеличения являются постоянными величинами, не зависящими от положения предмета и связанными друг с другом следующими зависимостями:

$$\beta = \frac{n}{n' \Gamma_T} = const \quad (5.4)$$

$$\gamma = \Gamma_T = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = const \quad (5.5)$$

$$\alpha = \frac{n}{n' \Gamma_T^2} = const \quad (5.6)$$

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 5.1.

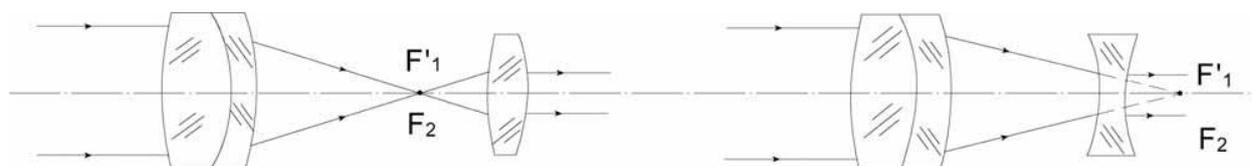


Рис. 5.1. Схема простых телескопических систем. а) Зрительная труба Кеплера. б) Зрительная труба Галилея.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение  $\Gamma_T$ , угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$ , 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  $\phi$ .

### 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 5.2 представлена оптическая схема с ходом лучей трубы Кеплера из тонких компонентов при двух положениях входного зрачка.

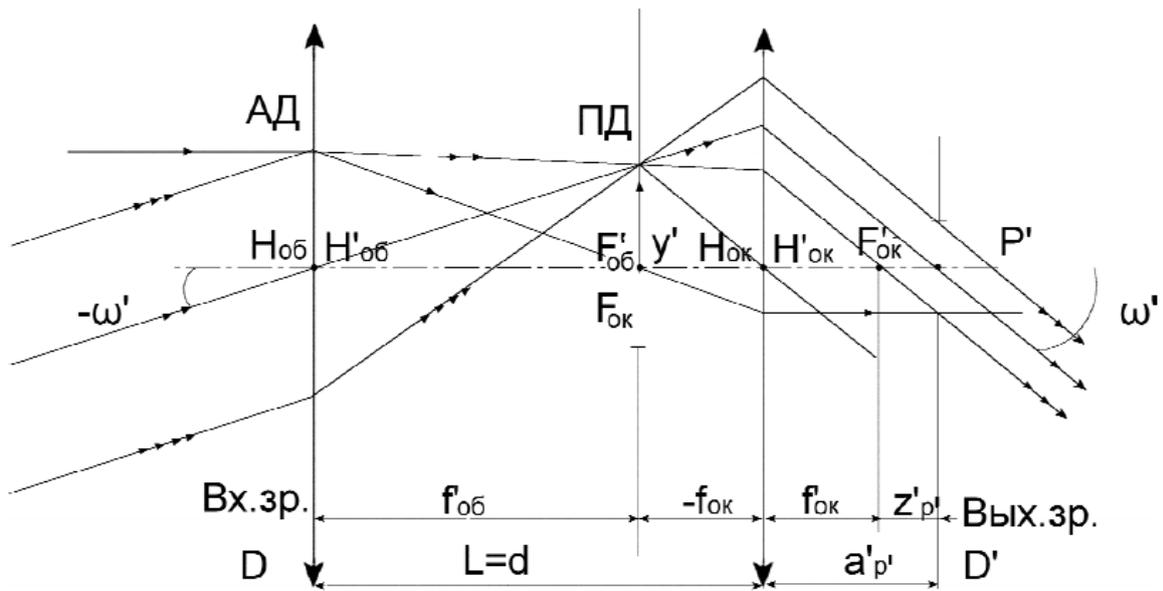


Рис. 5.2. а) Ход лучей в трубе Кеплера при  $a_p = 0$ .

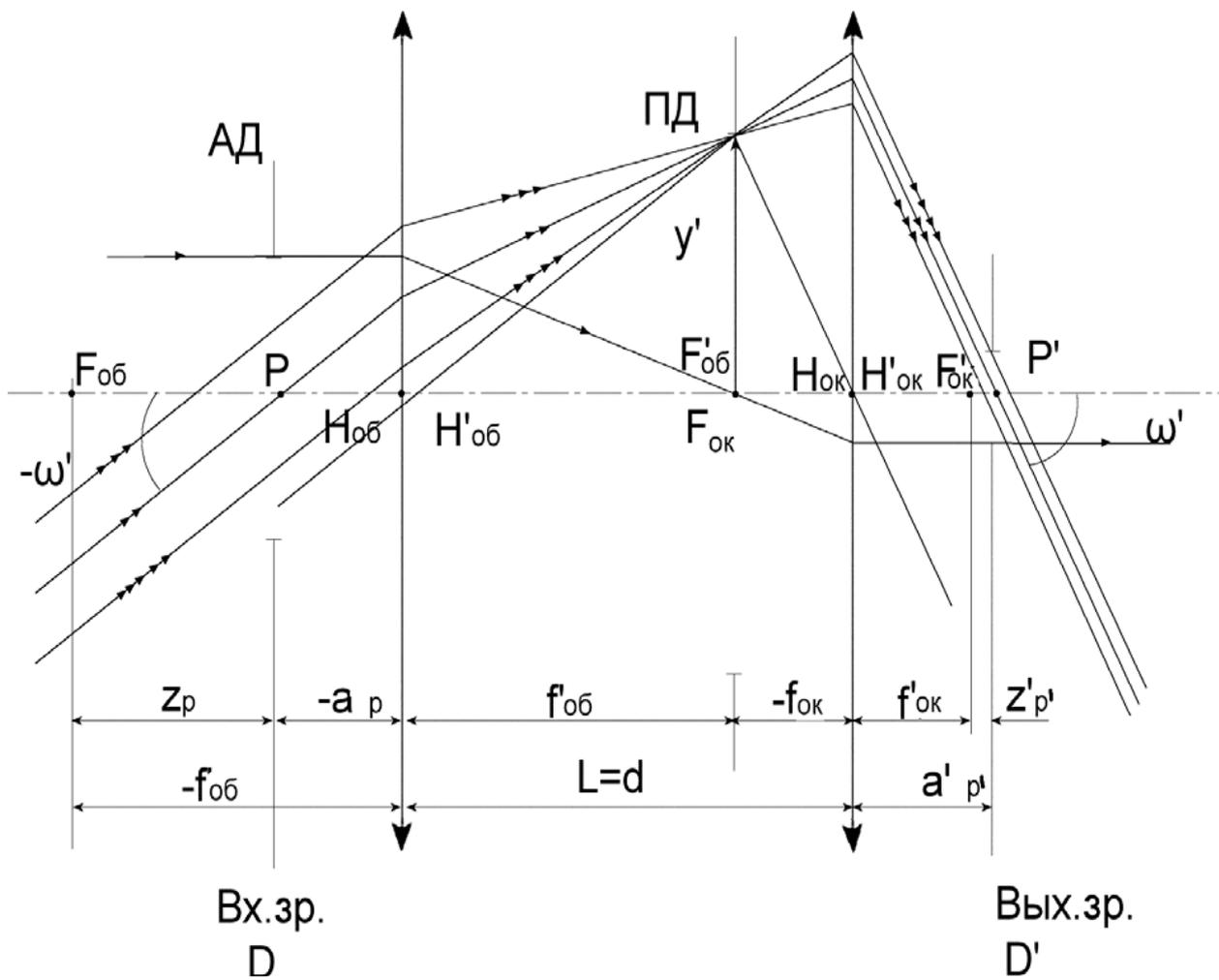


Рис. 5.2. б) Ход лучей в трубе Кеплера при  $a_p \neq 0$  и виньетировании 50% .

## Основные формулы для габаритного расчета трубы Кеплера

1. Видимое увеличение:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg}\omega'}{\operatorname{tg}\omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_1}{f'_2} \quad (5.7)$$

2. Расстояние между компонентами:

$$d = f'_1 + f'_2 \quad (5.8)$$

3. Размер полевой диафрагмы:

$$D_{\text{ПД}} = 2f'_1 \cdot \operatorname{tg}\omega = 2f'_2 \cdot \operatorname{tg}\omega' \quad (5.9)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{z_p}{\Gamma_T^2} \quad (5.10)$$

где  $z$  -расстояние входного зрачка от переднего фокуса объектива.

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

$$a' = f'_2 + z'_{p'} \quad (5.11)$$

5. Определение диаметров объектива и окуляра:

$$D_{об} = 2(a_p \operatorname{tg}\omega + m), \quad (5.12)$$

$$D_{ок} = 2(a'_{p'} \operatorname{tg}\omega' + m'), \quad (5.13)$$

где  $a$  -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:

$$R_V = \frac{D - \bar{D}}{D}, \quad (5.14)$$

где  $D$  -диаметр входного зрачка;

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

$$D = 2m, \quad (5.15)$$

$$|\Gamma_T| = \frac{m}{m'}, \quad (5.16)$$

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

$$\varphi = \frac{1,22\lambda}{D}. \quad (5.17)$$

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

$$\varphi = \left( \frac{140}{D} \right)'' \quad (5.18)$$

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:

$$\varphi = \left( \frac{120}{D} \right)'' \quad (5.19)$$

Последняя формула используется для определения разрешающей способности точных приборов.

7. Угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза:

$$\varphi_{\text{эл}} = \frac{60''}{\Gamma_T} \quad (5.20)$$

8. Необходимое перемещение окуляра для компенсации недостатков зрения:

$$\Delta = \frac{f_2'^2}{\frac{1000}{A_D} + z_{p'}'} \quad (5.21)$$

где  $A_D$  - аметропия глаза в диоптриях;

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

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

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

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.

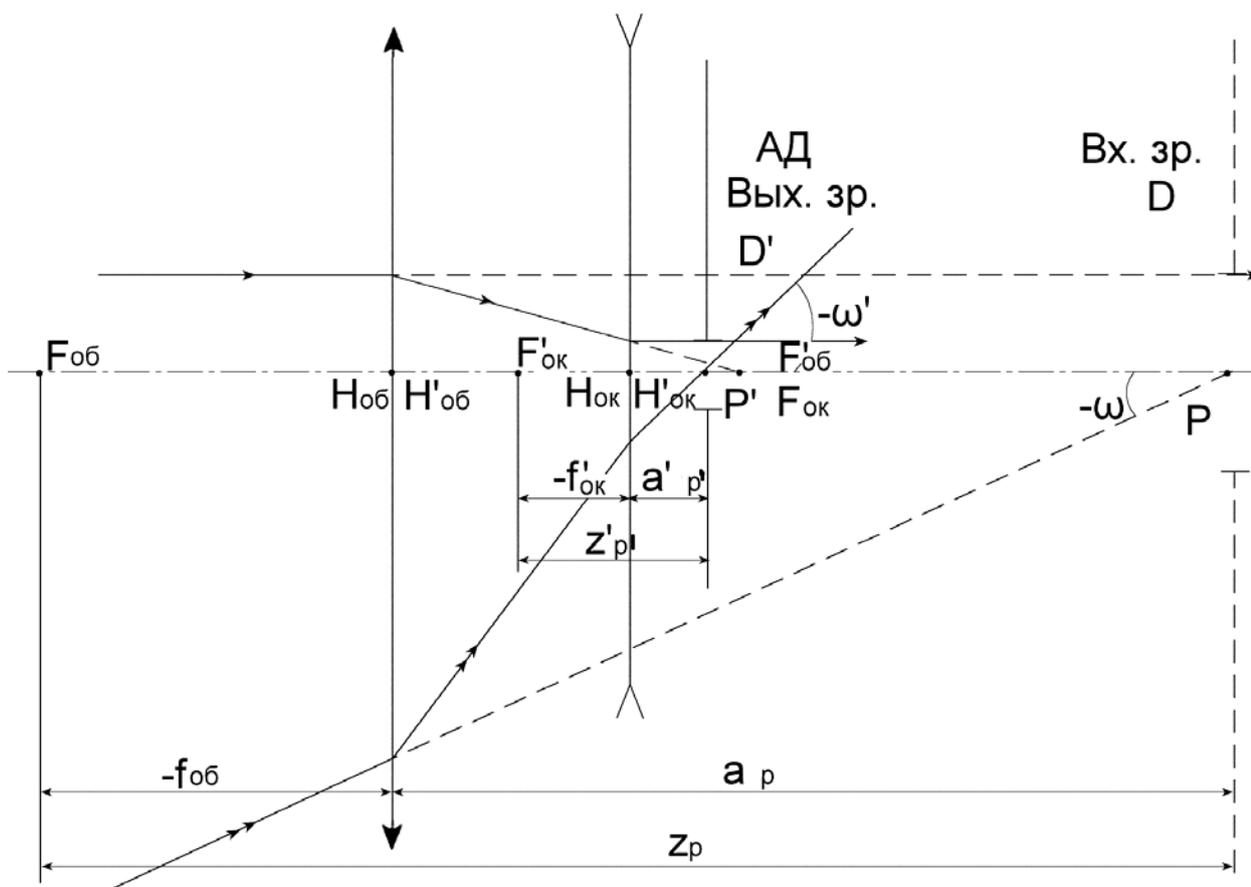


Рис. 5.3. Оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

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  $a$  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 оправка объектива. В зависимости от степени виньетирования угловое поле в пространстве предметов можно рассчитать по следующим формулам:

а) при отсутствии виньетирования:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_{об} - D}{a_p}; \quad (5.23)$$

б) при виньетировании 50%:

$$tg\omega = \frac{D_{об}}{2a_p}; \quad (5.24)$$

в) при виньетировании 100%:

$$tg\omega = \frac{D_{об} + D}{2a_p}. \quad (5.25)$$

При виньетировании 50% диаметры объектива и окуляра определяются выражениями:

$$D_{об} = D_{од} = 2a_p \cdot tg\omega, \quad (5.26)$$

$$D_{ок} = 2a'_p \cdot tg\omega'. \quad (5.27)$$

### 8.1. 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) найти 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:

$$d_{возд} = \frac{d}{n}. \quad (5.34)$$

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:

$$z \geq 0,01f_2' \quad (5.35)$$

Выбрав положение выходной грани, проводят вспомогательную прямую под углом  $\gamma$  к оси до пересечения с краем пучка лучей (рисунок 5.4). Угол  $\gamma$  находим по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{n}{2k}, \quad (5.36)$$

где  $n$  – показатель преломления стекла призмы;

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

Добавляя  $1 \div 2$  мм на крепление и юстировку призмы, проводят прямую, определяющую положение входной грани призмы. Диаметр призмы снимаем с чертежа. Затем определяем длину хода луча в призме:

$$d = d = k \cdot D_{\text{призмы}}. \quad (5.37)$$

Ширина редуцированной воздушной пластины равны:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (5.38)$$

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

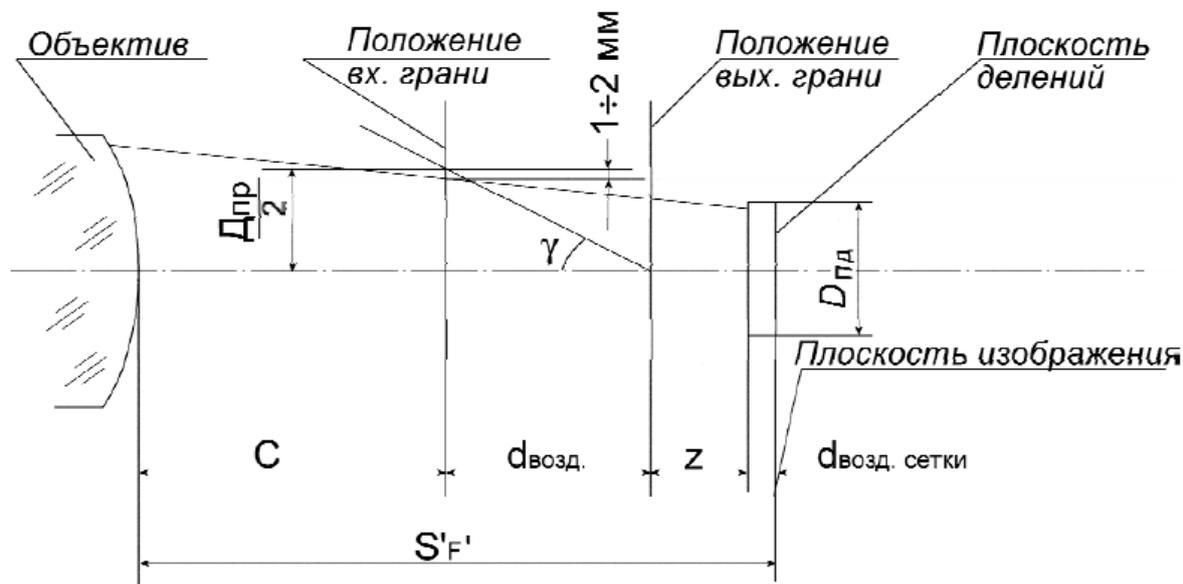


Рисунок 5.4. Определение размеров граней призмы.

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

$$c = S'_{F'_1} - d_{\text{возд.сетка}} - z - d_{\text{возд.}} \quad (5.39)$$

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

$$c = S'_{F'_1} - z - d_{\text{возд.}} \quad (5.40)$$

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

#### 4. Варианты заданий

##### Телескоп

№	$\Gamma m$	$D'$	$2w$	$a_p$	Относительное отверстие объектива и окуляра $D/f'$	$2\omega'$	$D$	До объектива 1 призма	После объектива 2 призма	
1	4	4	8	-25	1:5				Сист. МП 1рода	
2	5	5	7	-20	1:6				Сист. МП 2рода	
3	6	5	6	-15	1:6,5				ВКР-45	
4	7	4	5	-10	1:5,5			АР-90	БП-80	
5	4,5	5	6	-5	1:5			АР-90	АкР-90	
6	5,5	4	5	0	1:6				БКУ-60	
7	6,5	4	6	0	1:6,5				БМ-80-90	
8	4,2		8	0	1:5,5		21	АР-90	БП-90	
9	5,2		10	0	1:5		23,4		БКУ-45	
10	6,2		10	0	1:6		27		БМ-90-90	
11	4,8		8	-10	1:6,5		20		АкР-80	
12	5,8	5		-15	1:5,5	38			БМ-60-90	
13	6,8		5	-20	1:5		34		Бк-90	
14	3,5		14	-25	1:4		16		БкП-90	
15	3,8		12	-30	1:5		20		А-0	
16	4,0		12	-20	1:6		18		ВЛ-0	
17	4,2		10	-10	1:6,5		20	АР-90	ВР-45	
18	4,5		8	0	1:5,5		22		Сист. МП 1рода	
19	4,8	4		0	1:5	40			ВкЛ-0	
20	5,2	5		0	1:6	40			БМ-120-90	
21	5,5	4		0	1:6,5	34			БкМ-100-90	
22	5,8	5		0	1:5,5	34			АкР-60	
23	6,2	4		-10	1:5	30		АР-90	АР-105	
24	6,5	5		-20	1:6	40			Сист. МП 1рода	
25	6,8	4		-30	1:6,5	38			Сист. МП 2рода	
26	4	5		-40	1:5,5	30			АкР-45	
27	5	4		-30	1:6	34		АР-90	Ак-0	
28	6	5		-20	1:5	40		АР-90	БП-90	

##### Микроскоп

№	Числовая апертура $F_j$ ,	Разрешающая способность $\delta$ , мм	Видимое увеличение $\bar{\Gamma}$	Фокусное расстояние тубусной линзы $f'_{TL}$ , мм	
1	0,1				
2	0,2		100		
3	0,3		120		
4	0,5				
5	0,6				
6	1,25				

7			150		
8			200		
9			300		
10			250	250	
11			300	190	
12		0,0011			
13		0,0022			
14			400		

**Проекционная установка**

№	Размер кадра	Линейное увеличение	Расстояние между кадром и экраном, м	Фокусное расстояние объектива,	
1	100*100	-20		150	
2	150*150	-17		200	
3	200*200		10	70	
4	17*14	-45	15		
5	9,45*7,05	-50	5		
6	18*24	-20		50	
7	9*12	-35	3		
8	7*7	-70		100	
9	150*150	-20	8		
10	200*200	-20	10		
11	17*14		5	70	
12	9,45*7,05	-50		60	
13	18*24	-40	4		
14	9*12		6	70	

## Литература

1. [www.aco.ifmo.ru](http://www.aco.ifmo.ru) – сайт кафедры прикладной и компьютерной оптики ЛИТМО
2. Ландсберг, Г.С. Оптика : учеб.пособие для вузов / Г.С.Ландсберг .— 6-е изд.,стер. — М. : Физматлит, 2006 .— 848с. : ил. 10. экз.
3. Погорельский, С.Л. ТулГУ. Прикладная оптика. учеб.пособие для вузов Ч.1:/ С.Л.Погорельский; ТулГУ; Фак. механики и систем управления;Каф."Приборы управления" .— Тула : Гриф и К, 2005 .— 186с. 50экз.
4. Справочник технолога-оптика / И. Я. Бубис [и др.] ; под ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова .— М. : Машиностроение, 1983 .— 413 с. : ил. — Библиогр. : с. 402 .— ISBN /В пер./ : 2.20. 3.экз.
5. Шредер, Г. Техническая оптика / Г.Шредер,Х.Трайбер;пер.с нем.Р.Е.Ильинского .— М. : Техносфера, 2006 .— 424с. : ил. — (Мир физики и техники) .— Библиогр.в конце кн. — ISBN 5-94836-075-X : 397.70. 4экз.
6. Интернет ресурс [http://de.ifmo.ru/bk\\_netra/select.php](http://de.ifmo.ru/bk_netra/select.php) Электронный учебник по дисциплине: "Основы конструирования оптических приборов" Латыев С.М., Егоров Г.В., Митрофанов С.С., Каракулев Ю.А., Тимошук И.Н.Версия: 1, 2005г.
7. [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru) – МГТУ им. Н.Э. Баумана