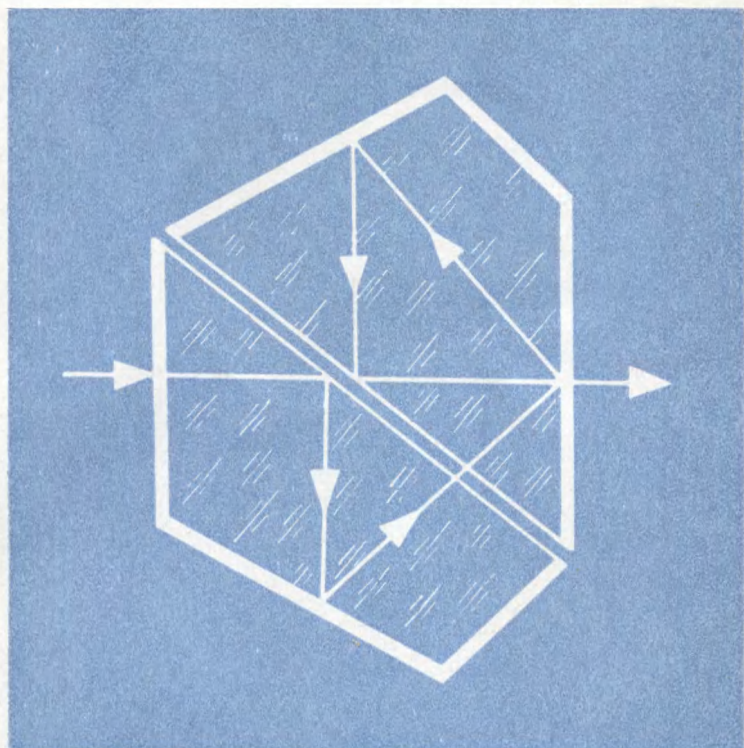




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Ю. Г. КОЖЕВНИКОВ

# ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЗМЫ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ

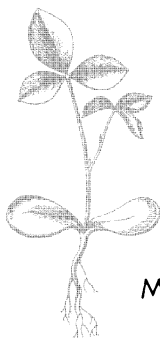


Ю. Г. КОЖЕВНИКОВ

# ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЗМЫ

Проектирование,  
исследование,  
расчет

Второе издание, переработанное  
и дополненное



МОСКВА « МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1984

ББК 34.9  
К58  
УДК 681.4

Рецензент канд. техн. наук **Б. М. Комраков**

**Ю. Г. Кожевников**

**К58**      **Оптические призмы. Проектирование, исследование, расчет. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1984. — 152 с., ил. — (Б-ка приборостроителя).**

50 к.

Обобщен и систематизирован материал по теории, расчету и опыту применения призм и призмённых систем. Изложены методы проектирования, исследования и расчета призм. Рассмотрены конструкции и теория большого числа оригинальных призм и призмённых устройств. Даны рекомендации по их применению.

Для инженерно-технических работников оптического приборостроения.

**К**      **2706000000-187**  
**038(01)-84**      **187-84**

**ББК 34.9**  
**6П5.8**

© Издательство «Машиностроение», 1984 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Призмы и призмённые системы широко применяют в оптическом приборостроении. Они обеспечивают решение ряда конструкторских задач и во многих случаях оказывают существенное влияние на оптические характеристики приборов, их размеры и массу. Методы конструирования, исследования и расчета призм отличны от соответствующих методов для других элементов оптических систем.

С развитием оптического приборостроения и расширением области применения оптических устройств часто возникает необходимость в увеличении угловых полей и светосилы приборов, в уменьшении их размеров и массы. Типовые призмы не всегда обеспечивают решение указанных задач. Применение оригинальных призм затрудняется в большинстве случаев отсутствием теории этих устройств. Важнейшей теоретической задачей является определение формы и размеров призм, обеспечивающих наиболее полное использование их положительных свойств. Решение этой задачи включает три последовательных этапа: конструирование или подбор соответствующей конструкции призмы; определение и исследование зависимостей между размерами призмы и величиной пропускаемого пучка лучей и нахождение оптимальных соотношений; расчет размеров призмы и допусков на ее изготовление.

Соответственно следует различать три направления при разработке призм: конструирование, исследование и расчет.

В литературе большое внимание уделяют исследованиям по выявлению способов юстировки призм. В последнее десятилетие при решении юстировочных задач получили широкое распространение векторный и матричный методы. Существенный вклад в это направление внес Г. В. Погарев [19, 20]. С помощью матричного исчисления зеркально-призмённые системы классифицированы по их оптическому действию на семь групп, найдены матрицы для каждой группы, проведены обширные исследования влияния подвижек призм на положение выходящих лучей.

Успехи матричных методов преобразования лучей обусловили возникновение мнения о неперменном использовании матриц в теории призм и призмённых систем. В связи с этим отметим следующее.

1. Ряд задач удобнее и нагляднее решать, применяя более простой математический аппарат. Например, Г. В. Погарев предложил определять влияние сдвига плоского зеркала на расфокусировку и сдвиг изображения непосредственно из рисунка без промежуточных выкладок [19]. Тот же автор в другой книге [20] эту задачу решил матричным методом с промежуточными вычислениями разности радиус-векторов и произведения матриц. Решение получилось более громоздким.

2. М. М. Русинов излагает способы юстировки зеркально-призмённых систем и убедительно разъясняет физический смысл происходящих при этом явлений, не прибегая к матричному исчислению [24].

3. Б. Л. Пошехонов предложил графоаналитический метод исследования подвижек зеркально-призмённых систем, основанный на использовании начертательной и аналитической геометрии [22].

4. Форму и размеры призм определяют, как правило, с помощью тригонометрии и аналитической геометрии.

Применение в теории призм того или иного математического аппарата определяется характером решаемой задачи и условием получения результата кратчайшим путем при наименьшей математической формализации физических явлений. Настоящая работа в основном посвящена поиску оптимальных формы и размеров призм без применения векторного и матричного исчислений. Затронутые вопросы юстировки призм рассмотрены также без применения этих методов.

Свойства призм, методы их конструирования, исследования и расчета нуждаются в систематизации и развитии. Не установились границы между отдельными группами методов, сведения о них разобщены в различных источниках и приведены не в полном объеме.

Недостаточное внимание уделено поиску общих закономерностей конструирования призм. М. М. Русинов [23] выделяет три конструктивных приема: использование явления полного внутреннего отражения, разделение хода лучей, использование клина, дополняющего развертку призмы до плоскопараллельной пластинки. Автор в книге [13] расширяет число приемов конструирования и углубляет их содержание. Однако и в этой работе остались невыделенными ряд способов, которые могут быть использованы при создании оригинальных призм. Неполные сведения о приемах конструирования сдерживают разработку более совершенных призм и призмённых систем.

Методы исследования не объединены в единую систему, ряд методов не рассматривался. Вследствие этого анализ в большинстве случаев выполнен не в полном объеме.

В работах [23, 24] выделяют три метода: развертку призм, редуцирование развертки к воздуху, приведение призм к эквивалентному зеркалу. Вместе с тем при решении юстировочных и других задач применяют более обширный набор методов. В работе [13] предложено несколько новых направлений исследования, которые получили развитие в настоящей работе.

Недостаточно разработаны методы определения зависимостей между размерами призмы и пропускаемого пучка, а также методы исследования этих зависимостей, направленные на выявление оптимальной формы призмы. Исследования такого рода выполнены для весьма ограниченного числа оригинальных призм.

Некоторые призмы для конического пучка лучей имеют различные характеристики при расположении одной из наружных преломляющих граней в узком или широком месте пучка. Я. Клабазня [33] определил размеры полупентапризмы в двух ее положениях, однако оптимальное положение призмы осталось не выявленным. Автор [7, 9] подвергнул анализу призму Лемана и трехкомпонентную призму, предложенную Русиновым, и нашел оптимальное положение этих призм.

Деформирование призм с целью изменения угла отклонения лучей вызывает изменение их габаритов и углового поля. В литературных источниках это направление исследований не рассматривалось.

Вредные отражения в некоторых призмённых системах рассмотрели Б. Л. Нефедов [3, 18] и М. М. Русинов [23], влияние призм на габаритный ход лучей исследовал Е. Б. Серафимов [25].

Виньетирование светового пучка призмами — куб и составной призмой с углом отклонения  $60^\circ$  отметил М. М. Русинов [23]. Автор в статье [9] определил вредные отражения и характер виньетирования пучка у трехкомпонентной призмы.

В литературе большое внимание уделено изучению влияния подвижек призм и погрешностей их изготовления на смещение и поворот изображения. Это направление исследований получило развитие благодаря трудам А. И. Тудоровского, И. В. Лебедева, В. Н. Чуриловского, М. М. Русинова, Б. Л. Пошехонова, Г. В. Погарева, И. А. Грейма и П. В. Стендера, М. Д. Мальцева. Несколько работ опубликовал автор.

Интересна работа И. П. Поляковой [21], в которой рассмотрен способ использования универсальной программы на БЭСМ-4 для расчета и исследования призмённых систем.

Отсутствие общей системы методов исследований затрудняет всесторонний анализ характеристик призм и выявление в полной мере их возможностей.

Существуют два способа определения геометрических размеров призм. В одном расчет ведут исходя из того, что через призму проходит цилиндрический пучок лучей, в другом — их рассчитывают для конического пучка лучей.

Первый способ значительно проще и позволяет получать призмы сравнительно несложной формы. В большинстве литературных источников [1, 27, 30] рекомендуют по методу цилиндрических пучков рассчитывать также призмы, пропускающие пучки лучей, ограниченные круговым конусом. И. А. Турыгин [27] предложил графо-аналитический метод расчета, у Б. Н. Бегунова [1] приведен аналитический метод, который дополнен автором [13] случаем расположения зрачка внутри призмы.

Призмы, рассчитанные для цилиндрического пучка лучей, имеют большие размеры, чем требуются для пропускания реального пучка, причем различие в размерах быстро увеличивается с увеличением углового поля. Лучшие характеристики по габаритам, массе, полю и некоторым другим параметрам имеют призмы, рассчитанные для конического пучка лучей. В публикациях [17, 23, 26, 33, 34], посвященных этому методу, каждый тип призмы рассчитывали индивидуально. Автор в работах [7—10, 13] рассмотрел и углубил метод расчета призм для конического пучка лучей, предложил общие рекомендации по расчету, выбору типа призмы и марки стекла для ее изготовления.

В книге В. Н. Чуриловского и К. А. Халилулина [31] изложены теория и способы расчета преломляющих призмённых систем, пропускающих параллельные пучки лучей, приведены программы для расчета хода лучей на ЭВМ.

Расчет допусков на углы одинарных призм рассмотрел М. Д. Мальцев [15]. Г. В. Погарев произвел расчет допусков на взаимное расположение компонентов для призмы Пехана и оборачивающей системы Перро второго рода [20]. Такую же задачу применительно к составным призмам прямого зрения решил автор [13]. В целом методы расчета нуждаются в систематизации и дальнейшем развитии.

Попытка обобщить, систематизировать и представить учение о призмах как одно из перспективных научных направлений с большими возможностями в деле повышения технических характеристик оптико-механических приборов предпринята автором в работе [13]. Дальнейшим развитием этого направления является настоящая работа. Спектральные и поляризационные призмы не рассмотрены, так как их теория подробно изложена в литературе по физической оптике.

## ПРИЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

### 1. ПЕРЕЧЕНЬ СВОЙСТВ И ПРИЕМОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИЗМ И ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ

Свойства призм и призмённых систем весьма разнообразны и недостаточно изучены. В литературе приводятся неполные сведения о технических возможностях и свойствах призм, что может стать причиной выбора неоптимального направления разработки оптических приборов и получения у них пониженных параметров. Обобщая и систематизируя сведения о призмах и призмённых системах, получим следующий перечень их свойств.

1. Призмы изменяют направление оптической оси системы. С их помощью решают компоновочные задачи, сокращают габариты приборов, размещают выходной зрачок в наиболее удобном месте для наблюдателя, образуя перископичность, в биноклярных дальномерах создают псевдоскопический эффект.

2. Обеспечивают полное или зеркальное оборачивание изображения (рис. 14; 15).

3. Изменяют габаритный ход лучей. Призмы могут увеличивать, сокращать или оставлять неизменным габаритный ход лучей (рис. 83—85). С помощью призм, увеличивающих габаритный ход лучей, производят излом оптической оси в ограниченном пространстве, где зеркало не позволяет решить эту задачу из-за габаритных ограничений. В клиновых компенсаторах интерферометров габаритный ход лучей изменяют перемещением клиньев относительно друг друга в направлении, перпендикулярном оптической оси (рис. 42).

4. Соединяют и совмещают изображения. Это свойство широко используют в измерительной аппаратуре для соединения по одной границе двух линейных полей (рис. 18).

5. Разделяют пропускаемый пучок лучей. В приборах с одним входным каналом призмённые системы дают возможность осуществить биноклярный выход и улучшить условия наблюдения (рис. 20; 21). В других случаях пучок лучей разделяют, полученные два изображения поворачивают на  $180^\circ$  относительно друг друга и сводят их в поле зрения окуляра (рис. 22, в, г). При перемещении объекта наблюдения его изображения перемещаются в разные стороны, благодаря чему повышается в 2 раза точность их совмещения. Это свойство используют в измерительных приборах. В цветных телевизионных камерах призмы применяют для разделения светового пучка на три цветовые составляющие (рис. 22, а).

6. Умножают изображение. Призмённые системы позволяют получать в однообъективных фотоаппаратах два стереоскопических изображения (рис. 23) или несколько беспараллаксных изображений одного предмета (рис. 55; 56).

7. Отражают падающий пучок лучей строго в обратном направлении независимо от угла падения (рис. 29). Это свойство используют в навигационном оборудовании, для сигнальных целей и для

контроля взаимного положения элементарных зеркал телескопа с составным зеркалом.

8. Вращают изображение. Свойство используют в проекционных аппаратах различного назначения (рис. 26, а).

9. Производят обзор пространства без поворота изображения. Для этих целей применяют монокулярные и бинокулярные оптические шарниры (рис. 16; 17), поворотные прямоугольные призмы, двухкомпонентные и четырехкомпонентные призмы-куб (рис. 26, г; 30, а). Перечисленные устройства применяют в панорамах, прицелах и визирах.

10. Изменяют расстояние между осями окуляров в бинокулярных приборах (рис. 38; 39).

11. Отклоняют пучок лучей на малые углы за счет преломления. Эту задачу решают разнообразные клиновые устройства. С их помощью измеряют малые смещения изображения и малые углы отклонения лучей, повышают точность фокусировки в фотоаппаратах, компенсируют сдвиг изображения, сканируют пространство предметов (рис. 41; 44; 47).

12. Дают увеличение в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях, позволяют создавать анаморфозные и телескопические безлинзовые системы (рис. 50—52).

13. Фокусируют изображение. Этим свойством обладают растровая линза Френеля и просветные экраны с призмёнными растрами (рис. 57—59).

14. Разлагают свет в спектральных приборах.

15. Поляризуют свет.

16. Виньетируют пропускаемый пучок лучей.

17. Вносят aberrации в оптическую систему.

Некоторыми из перечисленных свойств обладают зеркальные системы, однако в большинстве случаев применение призм гораздо выгоднее. Прежде всего призма сохраняет неизменными углы между гранями. В эквивалентной системе зеркал при сборке углы между зеркалами настраивают с большой точностью, однако в процессе эксплуатации происходит их разъюстировка. Вследствие того, что зеркала имеют взаимные подвижки, их крепление конструктивно сложнее, чем крепление призмы.

Потери света у призм на гранях с внутренним отражением отсутствуют, тогда как при отражении от поверхностей зеркал потери света довольно велики. Кроме того, покрытия зеркал с течением времени портятся.

Призмы позволяют применять одну и ту же грань для отражения и пропускания пучков лучей, что дает возможность создавать более компактные отражательные системы, чем при использовании зеркал. Этому способствует также то обстоятельство, что угол конуса пропускаемого пучка лучей в призме меньше, чем на входе и выходе из нее.

Преломляющие свойства призм используют для отклонения лучей на малые углы, а также при создании анаморфозных, телескопических и растровых систем.

Призмы в отличие от зеркал позволяют увеличивать или уменьшать габаритный ход лучей, облегчая этим решение ряда компоновочных задач при проектировании оптических приборов.

Недостатками призм являются: внесение aberrаций в оптическую систему, большая масса и более высокие требования к качеству стекла по сравнению с зеркалами.



Приемы конструирования помогают раскрыть и реализовать свойства призм. Модернизация известных и создание новых конструкций призмённых устройств с улучшенными характеристиками способствуют совершенствованию оптических приборов.

Изучение и анализ конструкций различных типов призм показали, что приемы конструирования могут быть следующие:

- 1) использование явления полного внутреннего отражения;
- 2) компоновка призмённых систем и составных призм;
- 3) разделение хода лучей;
- 4) использование пространственного хода лучей;
- 5) деформирование призм при сохранении угла отклонения лучей;
- 6) деформирование призм с изменением угла отклонения лучей;
- 7) изменение положения призмы относительно падающего светового пучка;
- 8) исключение клина в составных призмах;
- 9) использование различного числа отражений при получении одного изображения;
- 10) использование призм для изменения глазного базиса и внутренней фокусировки изображения;
- 11) использование преломляющих свойств призм при получении изображений.

## 2. БАЗОВЫЕ И ПРОИЗВОДНЫЕ ПРИЗМЫ

По конструктивным признакам призмы удобно разделять на оригинальные по устройству базовые призмы и производные призмы, построенные на основе базовых с помощью тех или иных приемов конструирования. Базовая призма и относящиеся к ней производные призмы образуют группу с одним или несколькими общими конструктивными признаками. Производные призмы, в свою очередь, являясь базовыми для собственной группы призм, сходных по устройству.

Таким образом, деление призм на базовые и производные имеет условный характер и вводится для анализа конструктивных особенностей призм.

Устройство призм определяют следующие конструктивные признаки: форма главного сечения; углы между плоскостью главного сечения и гранями; взаимное расположение призмы и падающего на нее светового пучка.

У многих призм срезают лишние части, выходящие за пределы объема, заполненного световыми пучками, или увеличивают отдельные участки призм для предотвращения виньетирования при пропускании конического светового пучка. Эти изменения формы призм при определении главного сечения не учитываются.

Прямоугольная призма  $AP-90^\circ$  и ее производные (рис. 1) имеют общий конструктивный признак: главное сечение этих призм имеет форму треугольника (срезанные части призм показаны штриховой линией). Основная базовая призма 20 обведена рамкой из сплошных линий, производные призмы, которые служат базовыми для собственной группы призм, обведены штриховой линией. Стрелками показаны связи между базовыми и производными призмами.

Базовая призма 20 и производные призмы 1—3, 7, 8, 15, 21 в главном сечении имеют форму равнобедренного треугольника, а их

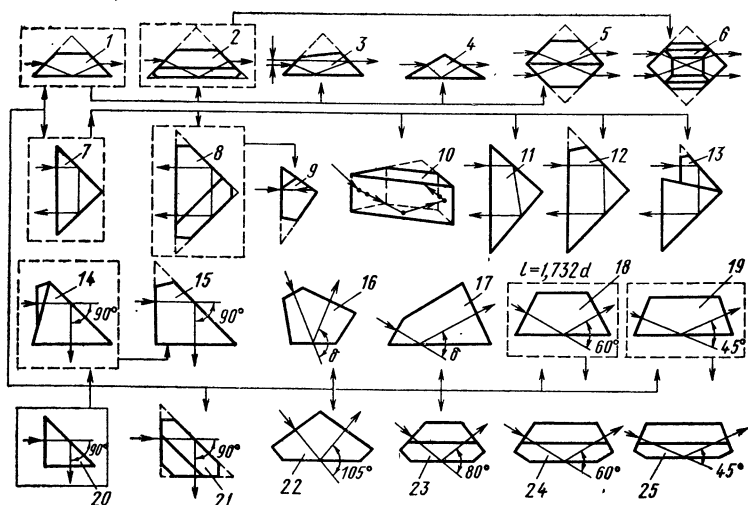


Рис. 1. Прямоугольная призма  $AP-90^\circ$  и ее производные конструкции

конструктивные отличия определяются различным расположением относительно падающего светового пучка и наличием крыши.

Призма Дове 1 получена поворотом базовой призмы относительно падающего светового пучка на угол  $45^\circ$  и в свою очередь является базовой для призм 2—5, которые построены с помощью следующих приемов: призма 2 — разделением хода лучей крышей; 3, 4 — деформированием призмы при сохранении угла отклонения лучей; 5 — компоновкой составной призмы.

Призму Дове 2 с крышей можно рассматривать как базовую для составной призмы 6, содержащей четыре одинаковых призмы 2. Призмы 7, 10 образованы поворотом соответствующих базовых призм относительно падающего светового пучка. Призмы 9, 11—14 построены приемом деформирования при сохранении угла отклонения лучей. Кроме того, при конструировании призм 13, 14, использован прием компоновки составных призм. Призма 15 получена исклужением клина в призме 14, а призмы 16—19, 22 построены деформированием призмы 20 с изменением угла отклонения лучей. Призмы 8, 21, 24, 25 отличаются от базовых наличием крыши, разделяющей ход лучей. Призму 23 можно рассматривать как производную от призмы 21.

Главное сечение призм, образованных на основе полупентапризмы 29 (рис. 2), башмачной призмы 35 (рис. 3), равнобедренной призмы 40 (рис. 4) и призмы Шмидта 44 (рис. 5), также имеет форму треугольника, поэтому для них прямоугольная призма 20 (см. рис. 1) является базовой.

Действительно, призма 31 построена деформированием призмы 20 с изменением угла отклонения лучей, призма 38 — поворотом призмы 20 относительно падающего светового пучка, призмы 40, 46 — деформированием призм 7 и 1 при сохранении угла отклонения

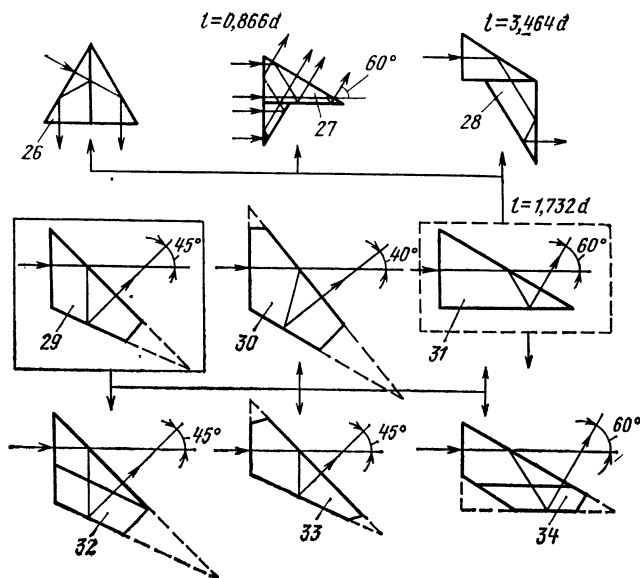


Рис. 2. Полупентапризма Б'-45° и ее производные конструкции

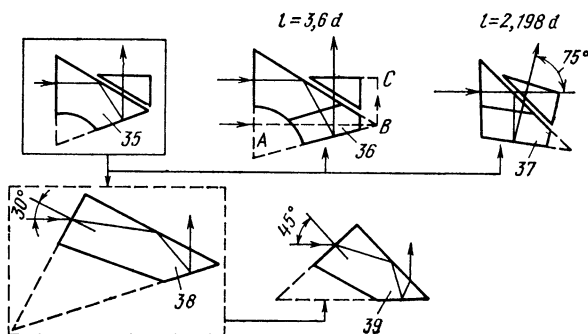


Рис. 3. Башмачная призма Б-90° и ее производные конструкции

лучей. Призмы 31, 38, 46 можно рассматривать как базовые для своих групп призм и как производные от призм 29, 35, 44.

Ромбическая призма 47 (рис. 6), призма Лемана 55 (рис. 7), пентапризма 58 (рис. 8) и производные конструкции этих призм имеют главные сечения четырехугольной формы, причем ромбические призмы в главном сечении образуют параллелограмм, а призма Лемана — трапецию. Нетрудно видеть, что эти призмы мож-

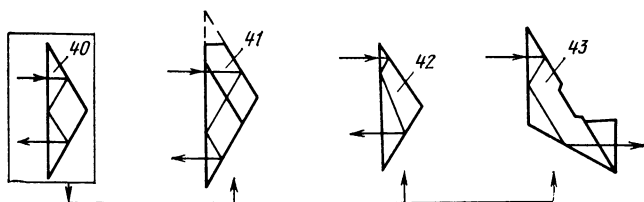


Рис. 4. Равнобедренная призма ВР-180° и ее производные конструкции

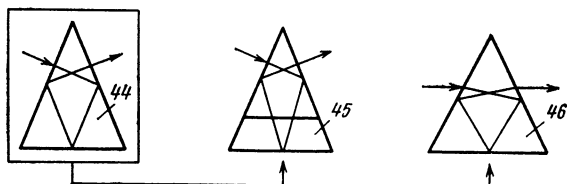


Рис. 5. Призма Шмидта ВР-45° и ее производные конструкции

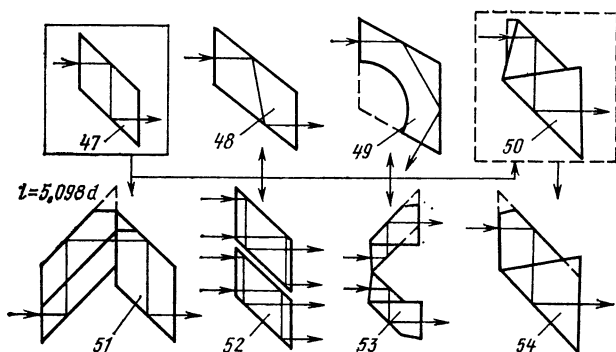


Рис. 6. Ромбическая призма БС-0° и ее производные конструкции

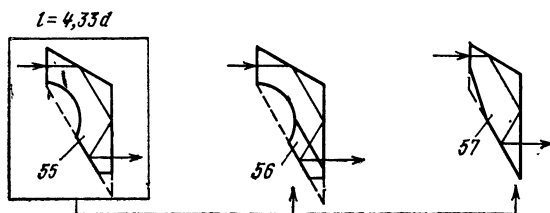


Рис. 7. Призма Лемана ВЛ-0° и ее производные конструкции

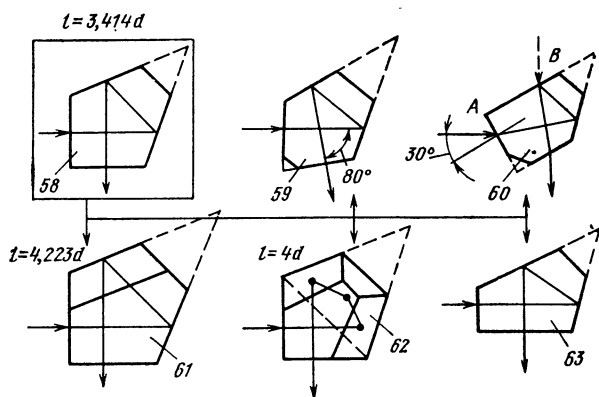


Рис. 8. Пентапризма БП-90° и ее производные конструкции

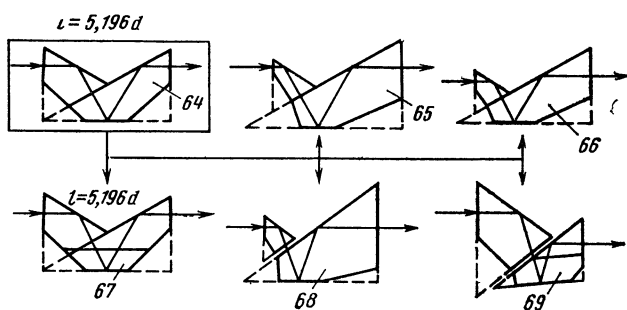


Рис. 9. Призма Аббе А-0° и ее производные конструкции

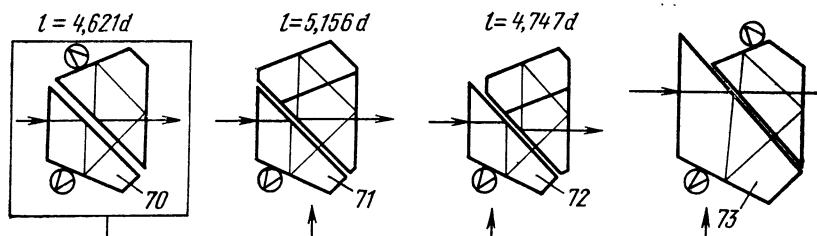


Рис. 10. Призма Пехана П-0° и ее производные конструкции

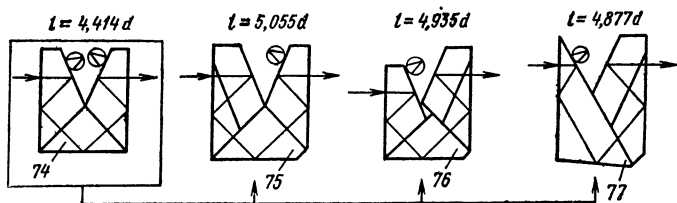


Рис. 11. Призма Уппендаля и ее производные конструкции

но построить на основе базовой ромбической призмы 47 приемом деформирования. Призмы многократного отражения (рис. 36) также строят на основе ромбической призмы методом использования разного числа отражений при получении одного изображения.

Широкое распространение получили составные призмы, которые построены из двух и более базовых одинарных призм различной конструкции. Составные призмы одновременно можно рассматривать как базовые для других призм, сходных по устройству.

Призма Аббе 64 (рис. 9) содержит две одинарные призмы 18, 31 и является базовой для составных призм 65—69.

Аналогичные связи по конструктивным признакам иллюстрируют рис. 10, 11, где показаны призмы Пехана и Уппендаля с их производными конструкциями.

Рассмотренные призмы не исчерпывают все конструктивные решения. Каждая из них может служить базовой для призм другой конструкции.

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

При конструировании призм следует стремиться к тому, чтобы на отражающих гранях пучки лучей претерпевали полное внутреннее отражение. При достижении этой цели сокращаются потери света в призме, отпадает необходимость нанесения зеркальных покрытий и защиты их от воздействия внешней среды. Исключение зеркальных покрытий сокращает трудоемкость и стоимость оптических приборов, повышает их долговечность и надежность.

Полное внутреннее отражение обеспечивается, если углы падения лучей  $\epsilon$  превышают предельный угол полного внутреннего отражения. Это условие выражает неравенство:

$$\sin \epsilon \geq 1/n, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления стекла.

Если для данной призмы неравенство (1) не удовлетворяется, подбирают новое стекло с большим показателем преломления или наносят на отражающую грань зеркальное покрытие. За редким исключением, с увеличением показателя преломления сокращаются габаритные размеры призм вследствие уменьшения редуцированной толщины ее разветки.

Важной особенностью отражательных призм является то, что у них одна и та же грань может быть использована как для преломления лучей, так и для их отражения. В этом случае падающий на грань пучок вначале преломляется, а при повторном падении на

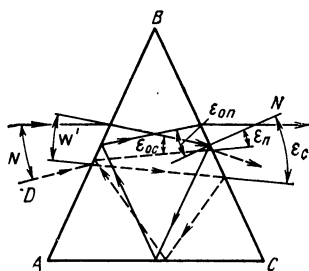


Рис. 12. Равнобедренная призма прямого зрения

грань претерпевает полное внутреннее отражение. Возможна и другая последовательность прохождения пучка. Например, в призме, показанной на рис. 12, пучок лучей преломляется на грани  $AB$ , а затем после двух отражений от граней  $BC$  и  $AC$  снова падает на грань  $AB$  и претерпевает полное внутреннее отражение. При первом падении на грань  $BC$  пучок лучей отражается, а при повторном падении на эту же грань — преломляется.

Использование одной и той же грани для отражения и преломления светового пучка позволяет существенно сократить размеры призмы. Однако при этом накладываются определенные ограничения на показатель преломления стекла и предельный угол наклона пропускаемых лучей. Эти ограничения сказываются в большей степени, если грань не перпендикулярна к преломляемому осевому лучу.

Обозначим  $\epsilon_{ос}$ ,  $\epsilon_{оп}$  углы падения осевого луча на грань со стороны стекла соответственно до отражения луча и до его преломления. Пропустим через призму луч  $D$ , образующий с осевым лучом в воздухе угол  $\omega$  и в стекле — угол  $\omega'$ . При отражении угол падения луча  $D$  на грани  $BC$  и  $AB$   $\epsilon_c = \epsilon_{ос} - \omega'$ .

При преломлении угол падения этого луча на грань  $BC$  равен углу преломления на грани  $AB$  и составляет  $\epsilon_{оп} = \epsilon_{оп} + \omega'$ .

Согласно формуле (1) запишем

$$\sin(\epsilon_{ос} - \omega') \geq 1/n \geq \sin(\epsilon_{оп} + \omega'), \quad (2)$$

где

$$n \sin \omega' = \sin \omega. \quad (3)$$

Левая часть неравенства обеспечивает отражение луча  $D$  от граней  $AB$  и  $BC$ , а правая часть — его преломление на этих гранях. В целом неравенство совместно с формулой (3) ограничивает величину показателя преломления стекла для призмы и предельный угол наклона  $\omega$  пропускаемых лучей.

#### 4. ПРИЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ И СОСТАВНЫЕ ПРИЗМЫ

В отличие от одинарных призм, выполняемых из одного куска стекла, призмённые системы и составные призмы содержат два или большее число компонентов. Многокомпонентные призмённые устройства позволяют решать следующие задачи: 1) приводить клиновидную развертку призмы к плоскопараллельной пластинке с помощью присоединения к призме дополнительного клина; 2) упрощать технологию изготовления призм; 3) осуществлять оборачивание изображения и предотвращать вредные отражения; 4) выполнять оптические шарниры; 5) соединять и совмещать изображения; 6) разделять световой пучок; 7) умножать изображения; 8) разделять ход лучей в призме.

По сравнению с одинарными призмами многокомпонентные призмённые устройства имеют большее число рабочих граней и, соот-

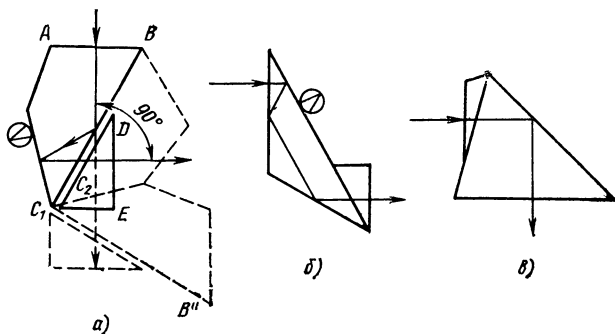


Рис. 13. Составные призмы с клином:  
 а — башмачная призма Б-90°; б — призма ВП-0°; в — прямоугольная призма

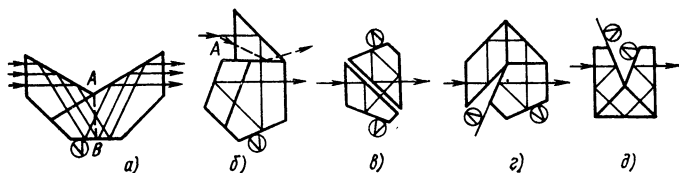


Рис. 14. Составные призмы:  
 а — Аббе; б — Добресса; в — Пехана; г — трехкомпонентная призма; д — Уппендалля

ответственно большую трудоемкость изготовления. Склейка или установка компонентов через воздушные промежутки с высокими точностями, а в ряде случаев и юстировка взаимного положения компонентов также повышает производственные затраты. Устройства с воздушными промежутками увеличивают потери света на отражение и могут служить источниками вредных отражений.

**Призмы с дополнительным клином.** Башмачная призма Б-90° (рис. 13, а) состоит из двух компонентов. Первый компонент  $ABC_1$ , отклоняя осевой луч на 90°, дает прямое изображение, но разворачивается в клиновидную пластинку. Второй компонент, клин  $DEC_2$ , компенсирует клиновидность развертки первого компонента. Между компонентами призмы оставляют воздушный промежуток, чтобы не нарушалось полное внутреннее отражение лучей на грани  $BC_1$ . На той же грани происходит преломление лучей.

В призмах, показанных на рис. 13, б и в, грань, смежная с клином, только преломляет световой пучок, поэтому в этих призмах дополнительный клин устанавливают без воздушного промежутка и склеивают с основной призмой.

Оба компонента призм с клиньями должны быть изготовлены из стекла одной марки для исключения хроматических аберраций.

**Призмы с технологическими плоскостями раздела и оборачивающие системы.** Некоторые призмы трудно или невозможно изготовить из одного куска стекла, хотя они и разворачиваются в плоско-



параллельную пластинку. В этом случае призмы выполняют из отдельных частей с последующей их склейкой (рис. 14, а).

Плоскость раздела частей призмы желательно располагать перпендикулярно осевому лучу или возможно ближе к этому направлению. Необходимо строго придерживаться этого правила, когда показатель преломления  $n$  стекла призмы и показатель преломления  $n'$  клея имеют разные значения.

Если плоскость раздела выполнить под большим углом наклона к осевому лучу, как показано на рис. 14, а, штриховой линией  $AB$ , то она может оказаться непрозрачной из-за полного внутреннего отражения лучей от этой плоскости.

Предельный угол  $\varepsilon_0$  полного внутреннего отражения луча от плоскости раздела вычисляют по формуле

$$\sin \varepsilon_0 = n'/n. \quad (4)$$

Составные призмы, склеенные или с воздушными промежутками между компонентами, широко применяют для полного и зеркального оборачивания изображения. В некоторых случаях используют конструктивные особенности этих призм для предотвращения вредных отражений.

Призма Добресса (рис. 14, б) склеена из пентапризмы с крышкой БкП-90° и прямоугольной призмы АР-90°. В результате совместного действия двух компонентов призма дает полное оборачивание изображения.

Каждая часть призмы разворачивается в плоскопараллельную пластинку. Следовательно, эти части можно изготовить из стекла с различными показателями преломления, благодаря чему плоскость склеивания будет отражать вредные наклонные лучи  $A$ , которые могут вызвать появление дополнительных изображений и бликов.

Чтобы еще больше ограничить прохождение через призму вредных лучей, в плоскости склеивания устанавливают диафрагму.

Призма Пехана (рис. 14, в) образована из полупентапризмы БУ-45° и призмы Шмидта, которая по сравнению с типовой призмой ВР-45° имеет увеличенные размеры для сохранения соосности входящего и выходящего пучков лучей. Соединенные вместе через малый воздушный промежуток призмы дают полное или зеркальное оборачивание изображения в зависимости от наличия крышки на основании призмы Шмидта.

Четыре преломляющие грани, три из которых являются одновременно отражательными, создают увеличение световые потери и могут оказаться источником вредных отражений. Для ограничения вредных лучей в воздушный промежуток следует ставить диафрагму.

Призмы прямого зрения, приведенные на рис. 14, г и д, склеены из типовых призм БС-0°, АР-90°, БП-90° и БУ-45°, АР-90°. Эти составные призмы дают такое число зеркальных и полных внутренних отражений, как призма Пехана П-0°, но в отличие от нее они имеют только две преломляющие грани, что сводит к минимуму потери света на отражение.

При проектировании призм следует учитывать, что с увеличением длины хода  $l$  осевого луча возрастают размеры призмы, уменьшается ее угловое поле и возрастают потери света на поглощение. Сравниваемые призмы имеют следующие длины хода луча: призма Пехана имеет  $l=4,621 d$ , призмы, показанные на рис. 3, г и д, имеют  $l=6,416 d$  и  $l=4,414 d$ , где  $d$  — диаметр пропускаемого пучка лучей.

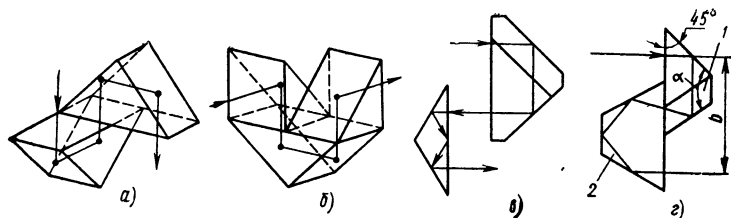


Рис. 15. Оборачивающие системы:

*а* — Порро первого рода (Малофеева); *б* — Порро второго рода; *в* — система из двух типовых призм БКР-180° и ВР-180°; *г* — система из призмы с крышей и трапецидальной призмы

Оборачивающая система Малофеева, известная под названием системы Порро первого рода, используется в призмённых биноклях и состоит из двух прямоугольных призм, каждая с двумя отражениями (рис. 15, *а*). Для уменьшения длины прибора призмы могут быть раздвинуты.

Система Порро второго рода (рис. 15, *б*) состоит из трех призм: прямоугольной с двумя отражениями и двух прямоугольных с одним отражением. Призмы можно раздвигать, изменяя длину и форму прибора применительно к требованиям каждого отдельного случая. Систему используют в инструментальных микроскопах.

Система из двух типовых призм БКР-180° и ВР-180° [23] интересна тем, что оба ее компонента могут быть развернуты относительно друг друга на любой угол (рис. 15, *в*). При этом в отличие от системы Малофеева не будет возникать поворот изображения.

Оборачивающая система (патент ФРГ № 603839) склеена из призмы с крышей 1 и трапецидальной призмы 2, каждая с тремя отражениями (рис. 15, *г*). Угол  $\alpha$  крышеобразной призмы может принимать значения от 70 до 95°, что дает возможность изменять величину базиса  $b$ . Углы между гранями в трапецидальной призме определяются в зависимости от величины угла  $\alpha$ .

**Оптические шарниры.** Оптические призмённые шарниры позволяют изменять в приборах углы между оптическими осями без вращения изображения.

Панорамический шарнир используется в артиллерийской панораме и позволяет при неподвижном окуляре производить круговой обзор (рис. 16, *а*). Визирная прямоугольная призма 1 шарнира вращается вокруг вертикальной оси. Возникающий при этом поворот изображения компенсируется вращением призмы Дове 2 в ту же сторону с меньшей в 2 раза скоростью. Ограниченный обзор в вертикальной плоскости осуществляется качанием визирной призмы вокруг горизонтальной оси.

Оптический шарнир для обзора всего пространства выполнен на основе панорамического шарнира, в который дополнительно введена вторая прямоугольная призма 1 с горизонтальной осью вращения, обеспечивающая круговой обзор в вертикальной плоскости (рис. 16, *б*). Круговой обзор в горизонтальной плоскости осуществляется одновременным вращением призм 1 и

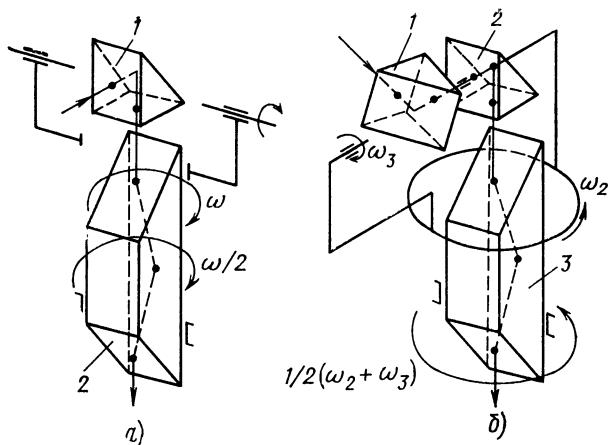


Рис. 16. Оптические шарниры:  
 а — панорамический; б — для обзора всего пространства

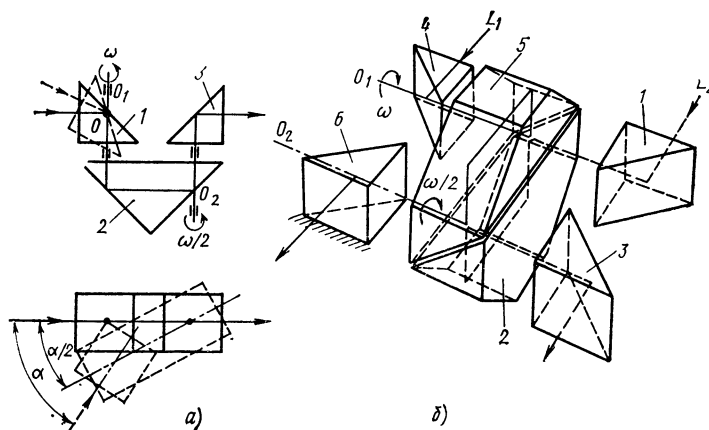


Рис. 17. Оптические шарниры:  
 а — четырехзеркальный; б — бинокулярный

2 вокруг вертикальной оси. Компенсирующая призма 3 вращается посредством дифференциала от обеих визирных призм 1 и 2 с угловой скоростью, равной полусумме скоростей вращения визирных призм.

Четырехзеркальный шарнир (рис. 17, а) образован из трех прямоугольных призм. Визирная призма 1 вращается вокруг вертикальной оси  $O_1$  и качается относительно горизонтальной оси  $O$ .

Поворот изображения, вызываемый вращением призмы 1 вокруг вертикальной оси с угловой скоростью  $\omega$ , компенсируется вращением призмы 2 вместе с призмой 1 относительно второй вертикальной оси  $O_2$  со скоростью  $\omega/2$ . Скорость вращения визирной призмы относительно компенсирующей равна разности абсолютных угловых скоростей этих призм, т. е.  $\omega/2$ . Призма 3 крепится неподвижно.

Бинокулярный шарнир (патент ФРГ № 850079) состоит из четырех прямоугольных призм 1, 3, 4, 6 и двух одинаковых трапециевидальных призм 2, 5, соединенных основаниями через воздушный промежуток (рис. 17, б). Ход осевых лучей  $L_1$  и  $L_2$  в двух каналах шарнира показан на рис. 17, б.

Призмы 3, 6 крепятся неподвижно, а визирование осуществляется вращением призм 1, 4 вокруг оси  $O_1$ . Возникающий при этом поворот изображения компенсируется вращением блока призм 2, 5 вокруг оси  $O_2$  со скоростью, в 2 раза меньшей, чем скорость визирующих призм.

Шарнир в исполнении, показанном на рис. 17, б, не дает оборачивания изображения. Если каждую пару прямоугольных призм повернем вокруг осей  $O_1$  и  $O_2$  в одну сторону на  $90^\circ$ , то получим вторую разновидность шарнира, обеспечивающую оборачивание изображения.

**Призмы для соединения и совмещения полей.** Ряд измерений удобно выполнять при соединении по одной границе двух различных линейных полей. Граница, по которой соединяются поля, должна быть либо невидимой, либо очень тонкой, чтобы не влиять на точность измерений. Линией раздела двух соединяемых полей может служить ребро между полированными гранями призмы, на котором допускается притупление не более 0,02—0,03 мм. Во избежание выколов на раздельном ребре угол между гранями не рекомендуется брать меньше  $90^\circ$ . Хорошо очерченную, тонкую линию раздела можно получить также на границе отражающего покрытия.

Пентапризма со смещенной частью применяется в тех случаях, когда необходимо сблизить до соприкосновения два рядом расположенных линейных поля. На рис. 18, а показаны осевые лучи  $L_1$  и  $L_2$  двух пучков, дающих изображение в плоскости  $P$ . Призма сближает поля на расстояние  $a$  и соединяет их по ребру  $C$ . Для уменьшения рассеянного света можно срезать нерабочие части призмы по плоскостям  $GE$  и  $CF$  с последующей окраской в черный цвет плоскостей среза и участка  $BG$ .

Величину смещения  $b$  частей призмы определяют по формуле

$$b = a/\sqrt{2}. \quad (5)$$

Система из двух прямоугольных призм (рис. 18, б) дает возможность перемещать линию раздела  $A$  полей  $F_1$  и  $F_2$  и переходить на одно любое поле путем смещения призм перпендикулярно линии раздела. Недостатком системы является видимость боковых граней призмы на границе раздела при смещении глаза в поперечном направлении по стрелкам  $B$ . При этом линия раздела становится шире, и один ее край виден нерезко.

Призмный мостик (рис. 18, в), часто применяемый в дальномерах, состоит из призмы 1 с тремя отражениями в одной ветви мостика, и призмы 2 с одним отражением во второй ветви. На гипотенузную грань призмы 1 нанесено зеркальное покрытие, за

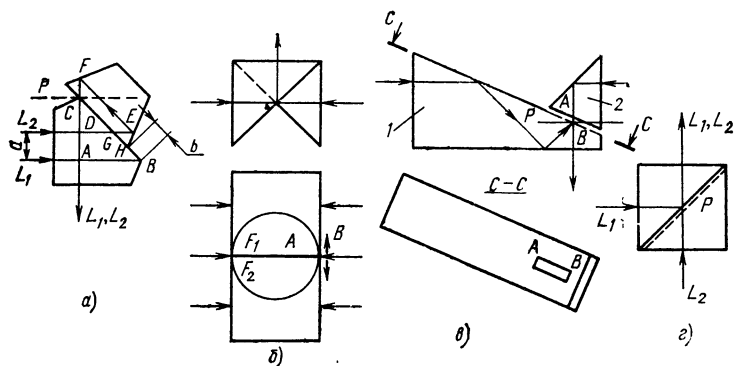


Рис. 18. Призмы для ссоединения и совмещения изображений:  
 а — пентапризма со смещенной частью; б — система из двух прямоугольных призм; в — призмный мостик; г — призма — куб

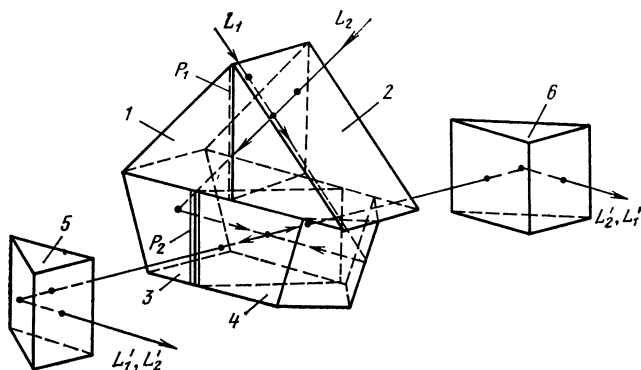


Рис. 19. Система для совмещения двух полей и бинокулярного наблюдения совмещенных изображений

исключением участка  $AB$ , имеющего прямоугольную форму. Соединение двух полей происходит по контуру этого участка, плоскость которого пересекает плоскость изображений  $P$ . Вследствие этого при недостаточной глубине изображаемого пространства может появиться размытость границы раздела полей.

Призму-куб применяют для совмещения полей, а также используют для разделения пучков лучей (рис. 18, г). На гипотенузную грань призмы нанесено светоделительное покрытие  $P$ , коэффициенты отражения и пропускания которого выбирают в зависимости от требуемого отношения яркостей совмещаемых полей или отношения световых потоков в разделенных пучках лучей. Совмещение полей происходит по всей их площади. Если на гипотенузную грань нанести зеркальное покрытие, оставляя прозрачным прямоугольный участок, то призма будет соединять поля по контуру этого участка, как в призмном мостике.

При использовании призмы-куб для разделения пучков следует принять обратный ход лучей по сравнению с показанным на рис. 18, г.

Призменная система (рис. 19) совмещает два световых пучка  $L_1$ ,  $L_2$  и одновременно разделяет совмещенные пучки на две части, обеспечивая этим бинокулярное наблюдение совмещенных полей (патент ФРГ № 944223).

Система состоит из четырех 1, 2, 3, 4 и дополнена призмами 5, 6, которые направляют пучки лучей в окуляры. На поверхность соединения прямоугольных призм 1, 2 нанесено светоделительное покрытие  $P_1$ , а на поверхность соединения призм 3, 4 — зеркальное покрытие  $P_2$ .

Световой пучок, идущий по направлению луча  $L_1$ , разделяет поверхность  $P_1$  на две части. Одна из них проходит через поверхность  $P_1$ , отражается от крышки призмы 4, меняет свое направление на зеркальной поверхности  $P_2$  и падает на призму 5. Вторая часть пучка отражается от поверхности  $P_1$ , падает на грань призмы 3 и направляется зеркальной поверхностью  $P_2$  на призму 6.

Световой пучок, идущий по направлению луча  $L_2$ , проходит через систему в том же порядке. После разделения пучка его части совмещаются с соответствующими частями первого пучка.

Крышка призмы 4 обеспечивает одинаковое положение изображений перед окулярами.

**Призмы для разделения светового пучка.** Составная призма, приведенная в патенте ФРГ № 1185395, склеена из двух прямоугольных вытянутых призм 1, 2 разной длины с одним отражением и двух одинаковых прямоугольных призм 3, 4 с двумя отражениями (рис. 20). На половину гипотенузной грани призмы 2 нанесено светоделительное покрытие  $P$ . Падающий световой пучок  $L$  разделяется поверхностью  $P$  на две части:  $L_1$ ,  $L_2$ , которые разводятся в разные стороны призмами 3, 4 и направляются в окуляры.

Система для разделения светового пучка и обративания изображения (патент ФРГ № 861027) показана на рис. 21, а с разнесенными компонентами для наглядности принципа действия, а на рис. 21, б представлена склеенной в один блок. Призмы 1, 2 и 4, 5 образуют две системы Порро второго рода. На одну грань призмы 1 нанесено светоделительное покрытие  $P$ , разделяющее световой пучок на две части. Призма 3 служит для соединения систем Порро в общую систему. Плоскопараллельная пластинка 6 выравнивает длины хода осевых лучей в разделенных частях пучка.

Расстояние между выходящими пучками можно увеличить, оставляя между призмами 1, 2 и 4, 5 воздушные зазоры или помещая в зазоры плоскопараллельные пластинки. Можно также компоненты системы склеивать в два блока, один из которых содержит призмы 4, 5, а второй — призмы 1, 2, 3 и пластинку 6. В таком исполнении система позволяет устанавливать расстояние между осевыми лу-

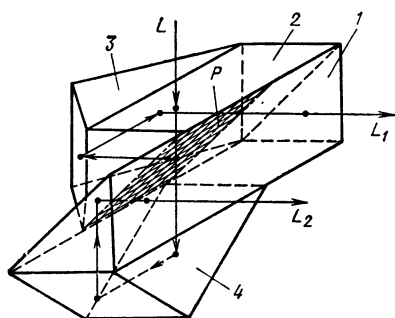


Рис. 20. Система для разделения светового пучка

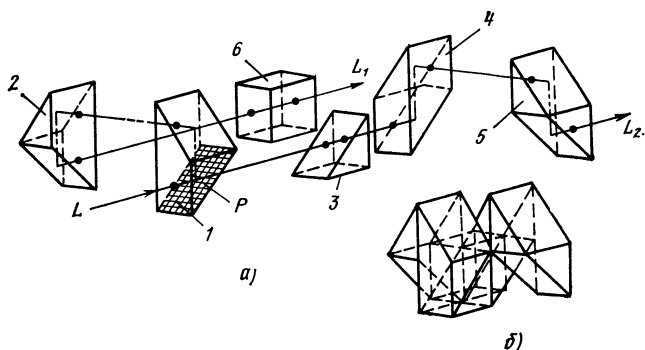


Рис. 21. Система для разделения светового пучка и оборачивания изображения

чами  $L_1$ ,  $L_2$  выходящих пучков в соответствии с базой между глазами наблюдателя. Для этого блоки призм поворачивают в разные стороны вокруг оси  $L$  падающего пучка.

Цветоделительная призмная система (патент Англии № 1251482) разделяет пропускаемый световой пучок  $L$  на три цветовые составляющие и предназначена для использования в цветных телевизионных камерах. Система собрана из двух призм 1, 2 и клина 3, на смежные грани которых нанесены интерференционные фильтры  $F_1$ ,  $F_2$  и светоделительные покрытия  $P_1$ ,  $P_2$  (рис. 22, а).

Голубая составляющая  $L_{\Gamma}$  падающего света  $L$  отражается фильтром  $F_1$  и после полного внутреннего отражения на входной грани призмы 1 направляется в телекамеру. Красная  $L_K$  и зеленая  $L_3$  составляющие света проходят через фильтр  $F_1$  и падают на светоделительное покрытие  $P_1$ . Отраженная часть света идет по пути голубой составляющей, а большая часть света, прошедшего через покрытие  $P_1$ , падает на фильтр  $F_2$ . Красная составляющая  $L_K$  отражается от фильтра  $F_2$  и направляется призмой 2 в телекамеру. Зеленая составляющая  $L_3$  проходит через фильтр  $F_2$  и, частично отразившись от покрытия  $P_2$ , соединяется с красной составляющей. Большая же часть зеленой составляющей проходит через покрытие  $P_2$  и попадает в телекамеру.

Светоделительные покрытия служат для выравнивания спектрального состава и световых потоков в каналах призмной системы.

Призма Кестерса (рис. 22, б) используется преимущественно в интерферометрах для получения двух когерентных световых пучков и создания интерференционной картины. Призма склеена из двух компонентов, один из которых имеет на соприкасающейся грани светоделительное покрытие  $P$ . Падающий световой пучок с осевыми лучом  $L$  разделяется поверхностью  $P$  на две части (осевые лучи  $L_1$ ,  $L_2$ ). После отражения от исследуемого объекта пучки направляются в призму повторно, соединяются и интерферируют.

Призмная система двойного изображения используется в окулярной головке ОГУ-22 инструментального микро-

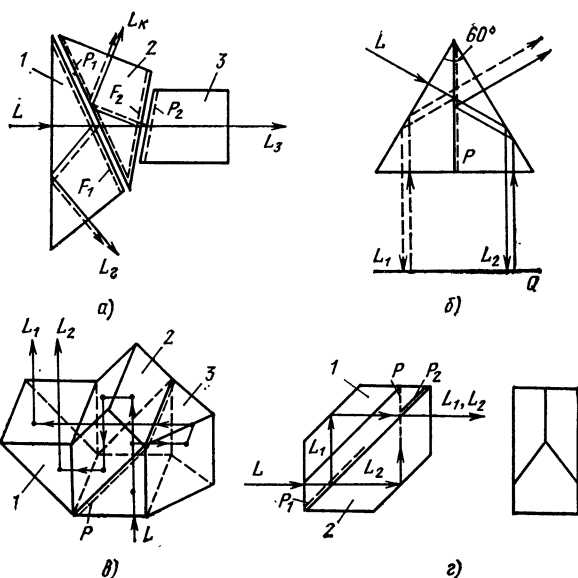


Рис. 22. Призмы для разделения светового пучка:

а — цветоделительная призмная система; б — призма Кестерса; в — призмная система двойного изображения; г — призма нониального визирования

скопа. Система склеена из трех призм 1, 2 и 3. На поверхность соединения призм 2, 3 нанесено светоделительное покрытие  $P$ , разделяющее пучок лучей  $L$ , идущий из объектива, на два пучка:  $L_1$ ,  $L_2$  (рис. 22, в). В призме 2 пучки соединяются и направляются призмой 1 в окуляр. Благодаря наличию двух крыш, угол между ребрами которых составляет  $90^\circ$ , система зеркально оборачивает изображение, образуемое пучком  $L_1$ , относительно изображения, создаваемого пучком  $L_2$ . В результате этого в поле окуляра видны два изображения наблюдаемого объекта, повернутые относительно друг друга на  $180^\circ$ .

При перемещении наблюдаемого объекта его изображения перемещаются в разные стороны, благодаря чему повышается в 2 раза точность совмещения изображений.

Призма нониального визирования [14] действует подобно призмной системе двойного изображения и состоит из призмы 1 с крышкой и призмы 2 (рис. 22, г). В плоскости их склейки нанесены светоделительное  $P_1$  и зеркальное  $P_2$

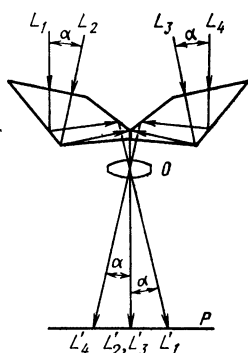


Рис. 23. Призмная стереонасадка



покрытия. Световой пучок  $L$  разделяется поверхностью  $P_1$  на две части  $L_1, L_2$ , которые вновь соединяются в плоскости изображения  $P$ . Край зеркального покрытия  $P_2$  служит границей раздела линейного поля. Благодаря наличию крыши в призме 1 изображения в двух частях поля взаимно повернуты на  $180^\circ$  вокруг нормали к границе раздела и при движении наблюдаемого объекта перемещаются в разные стороны.

**Призменная система для умножения изображений.** Призменная стереонасадка, выполненная из двух одинаковых призм с двумя отражениями каждая (рис. 23), применяется в однообъективных фотоаппаратах для одновременного получения пары стереоскопических снимков одного предмета. Стереонасадка выделяет из светового потока, идущего от объекта съемки, два пучка лучей  $L_1L_2, L_3L_4$  и направляет их в объектив фотоаппарата  $O$ , который строит в фокальной плоскости  $P$  два изображения предмета.

## 5. РАЗДЕЛЕНИЕ ХОДА ЛУЧЕЙ

При разделении хода лучей достигают следующих целей:

1) эффективно сокращают размеры призм и увеличивают их угловое поле;

2) осуществляют обзор пространства без поворота изображения в пределах угла до  $220^\circ$  в одном или двух направлениях;

3) оборачивают изображение в направлении, перпендикулярном главному сечению, и увеличивают число отражений;

4) осуществляют отражение пучков лучей строго в обратном направлении по отношению к падающим на призму пучкам независимо от их углов падения.

Призмы с разделением хода лучей делят пропускаемый световой

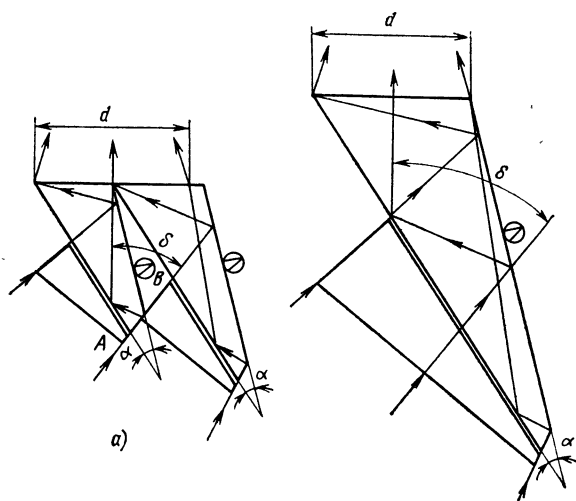


Рис. 24. Составные призмы:

$a$  — с разделением хода лучей;  $b$  — без разделения хода лучей

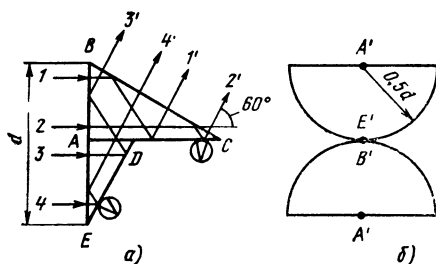


Рис. 25. Призма с углом отклонения  $60^\circ$  и разделением хода лучей

пучок на две или более частей, а затем соединяют их в один пучок. Части пучка должны иметь равные длины ходов лучей и одинаковые преобразования: оборачивание, отклонение, поступательное смещение.

В призмах, проектируемых для работы в параллельных пучках лучей, части пучка могут иметь разные длины ходов лучей.

Из-за неизбежных погрешностей в совмещении пучков лучей и вследствие рассеяния света на разделяющих ребрах призмы с разделением хода лучей ухудшают качество изображения оптической системы и вносят искажения изображения. Эти призмы требуют повышенной точности изготовления углов между гранями, превышающей более чем на порядок точность выполнения углов в других типах призм, а также нуждаются в особо точной взаимной установке компонентов. Некоторые призмы с разделением хода лучей виньетируют пропускаемые пучки лучей и вносят дополнительную неравномерность освещенности изображения.

Можно выделить два способа разделения хода лучей:

1) соединение двух или большего числа призм в единую систему, образующую составную призму;

2) замена одной отражающей грани на крышу.

**Составные призмы с разделением хода лучей.** Призма (рис. 24, а) состоит из двух полупентапризм с равными углами между гранями и двух клиньев, установленных с воздушными промежутками. Клинья приводят развертку каждой полупентапризмы к плоскопараллельной пластинке. Отражающие грани образуют два угловых зеркала, поэтому угол  $\alpha$  между гранями равен половине угла  $\delta$  отклонения осевого луча.

Падающий пучок лучей разделяется на входе на две части, которые при выходе из призмы соединяются в единый пучок. Длина хода лучей в каждой половине призмы разная, следовательно призму можно устанавливать только в параллельных пучках лучей.

Для исключения вредных отражений участок АВ должен поглощать падающие на него лучи света. Вследствие этого происходят виньетирование пропускаемого пучка в диаметральной зоне.

Для сравнения на рис. 24, б показана призма без разделения хода лучей, построенная для таких же пучка, угла отклонения и места расположения выходной грани, как у призмы, показанной на рис. 24, а. Как видно, использование приема разделения хода лучей дает значительный выигрыш в габаритах и массе призмного устройства.

Призма с углом отклонения  $60^\circ$  [23] (рис. 25, а) склеивается из двух частей  $ABC$  и  $ADE$ , на грани  $ED$  и  $DC$  нанесено зеркальное покрытие.

В призме неудачно расположена плоскость склеивания  $AD$ , которая проходит параллельно осевому лучу. Чтобы избежать вредных отражений от этой плоскости и виньетирования пучка, стекло призмы и клей должны иметь одинаковые показатели преломления.

Длина хода светового луча в каждой части разделенного пучка одинакова и равна

$$l = 0,866d. \quad (6)$$

Особенностью призмы является то, что верхняя часть пучка при отсутствии оборачивания переходит вниз, а нижняя часть пучка переходит вверх, т. е. происходит перестройка пучка. Следовательно, призма может устанавливаться только в параллельных пучках лучей.

Если падающий пучок имеет форму кругового цилиндра диаметром  $d$ , то на выходе из призмы сечение пучка примет вид, представленный на рис. 25, б. Лучи, проходящие через точки  $A$ ,  $B$  и  $E$  входной грани, выйдут из призмы соответственно в точках  $A'$ ,  $B'$ ,  $E'$ . Поэтому при размещении призмы внутри оптической системы неизбежно виньетирование. выходящего пучка при пропускании его через круглое отверстие диаметром  $d$ .

Призма-куб (рис. 26, а) выполнена из двух одинаковых призм Дове, склеенных гипотенузными гранями. Предварительно на отражающие грани наносят зеркальное покрытие. Между двумя частями призмы можно оставить воздушный зазор, и тогда необходимость в зеркальном покрытии отпадает.

Призма-куб в 2 раза короче призмы Дове, но требует повышенной точности изготовления углов между гранями для предотвращения двоения изображения. Пучок лучей, имеющий до входа в призму форму кругового цилиндра, выйдет перестроенным и в сечении примет форму, показанную на рис. 26, б. Таким образом происходит такое же виньетирование светового пучка, как и в призме, показанной на рис. 25.

Для поворота изображения на угол  $\alpha$  призму вращают вокруг оси, совпадающей с осевым лучом 3 пучка, на угол  $0,5\alpha$ .

Призму-куб применяют также в зрительных трубах для просмотра всего пространства над головой наблюдателя без подвижки трубы. В этом случае призму вращают вокруг оси  $O$ , перпендикулярной оптической оси  $O_1$  зрительной трубы. При положении призмы,

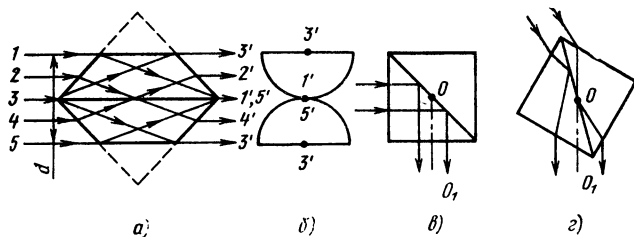


Рис. 26. Призма-куб

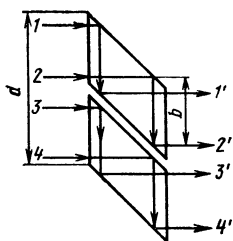


Рис. 27. Сдвоенная ромбическая призма

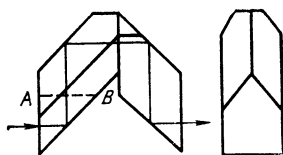


Рис. 28. Призма прямого зрения

показанном на рис. 26, в, работает только одна ее половина. По мере поворачивания призмы для визирования в зенит (рис. 26, г) начинает включаться вторая ее половина, и при визировании в зенит одинаково работают обе половины. При дальнейшем вращении части призмы меняются ролями.

Это свойство дает возможность просматривать последовательно все пространство перед зрительной трубой в пределах угла  $210-220^\circ$  без пропусков при переходе через зенит.

Сдвоенная ромбическая призма [23] (рис. 27) состоит из двух одинаковых частей, разделенных воздушным промежутком. По сравнению с ромбической призмой БС-0<sup>2</sup> сдвоенная призма имеет в 2 раза меньшие длину хода луча  $l=d$  и величину базиса  $b=0,5d$ .

Две дополнительные оптические поверхности и необходимость изготовления с повышенной точностью углов между гранями увеличивают стоимость призмы.

Призма не перестраивает пропускаемый пучок лучей и разворачивается в плоскопараллельную пластинку, перпендикулярную осевому лучу, поэтому она может быть установлена как в параллельных, так и в сходящихся пучках лучей.

**Призмы с крышами.** В типовых призмах АкР-90°, Бк-180°, Ак-0° и в призмах, приведенных на рис. 14, б; 15, в; 15, г, крыша разделяет ход лучей и оборачивает изображение в направлении, перпендикулярном главному сечению.

В призме прямого зрения, предложенной А. А. Степановым (рис. 28), крыша введена с целью получения нечетного числа отражений, благодаря чему призма приобретает способность при повороте вращать изображение. Особенностью призмы является то, что она не требует нанесения зеркальных покрытий и при сравнительно малых размерах не виньетует пропускаемый пучок лучей. Потери света сведены к минимальной величине, повышены надежность и долговечность призмы.

Призма состоит из двух компонентов, первый из которых по ходу луча делится плоскостью АВ на две типовые призмы АР-90° и Ак-90°, а вторым компонентом является ромбическая призма с увеличенным базисом. Призма, несмотря на пять отражений, имеет меньшую

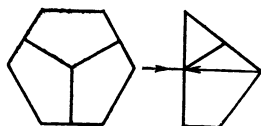


Рис. 29. Трипельпризма

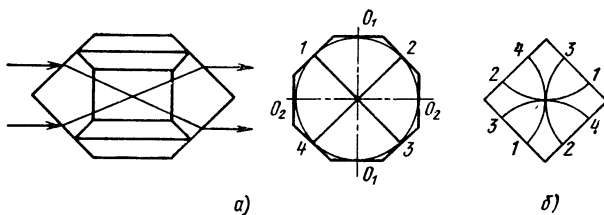


Рис. 30. Четырехкомпонентная призма прямого зрения с разделением хода лучей

длину хода осевого луча  $l=5,098 d$  по сравнению с призмой Аббе А-0\* ( $l=5,196 d$ ) с тремя отражениями.

Трипельпризма (рис. 29) имеет три пространственно расположенные крышки, которые делят пропускаемый пучок лучей на шесть частей и соединяют их вновь в единый световой пучок. Призма обладает уникальными свойствами: отражает лучи в строго обратном направлении независимо от угла их падения.

Призма прямого зрения (рис. 30, а) склеена из четырех одинаковых призм Дове, отражающие грани которых выполнены в виде крышки и покрыты зеркальным слоем. Призма разделяет световой пучок на восемь частей и при их соединении перестраивает исходную структуру пучка (рис. 30, б), вследствие чего может устанавливаться только в параллельных пучках лучей.

Призма полностью оборачивает изображение, а при вращении вокруг двух взаимно перпендикулярных осей  $O_1O_1$  и  $O_2O_2$  дает возможность неподвижному наблюдателю обозревать пространство в пределах полусферы без вращения изображения. В этом случае призма работает как оптический шарнир. Ее действие при обзоре пространства аналогично действию призмы-куб, используемой для той же цели.

## 6. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ХОД ЛУЧЕЙ

Пространственный ход лучей используют при конструировании оборачивающих систем; призм, изменяющих направление оптической оси в двух плоскостях; двухканальных призм бинокулярных приборов.

Этот метод позволяет осуществлять оборачивание изображения в направлении, перпендикулярном главному сечению призмы, без разделения хода лучей крышеобразными гранями. Повышается качество изображения, так как исключаются двоение изображения и рассеяние света на ребре крышки, свойственные призмам с крышами. Снижается более чем на порядок точность выполнения углов между гранями призмы. Не требуют тщательного изготовления ребра двугранных углов, на которых допускаются при пространственном ходе лучей необходимые технологические фаски, предотвращающие выколки.

Призма Аббе с пространственным ходом лучей [35] (рис. 31) используется вместо призмы Аббе с крышей Ак-0. Падающий на призму осевой луч  $O$  после первого отражения в

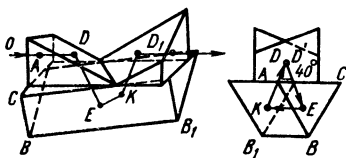


Рис. 31. Призма Аббе с пространственным ходом лучей

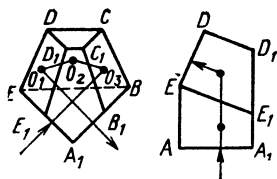


Рис. 32. Пентапризма с пространственным ходом лучей

точке  $D$  направляется в точку  $E$  первой грани крыши  $BC$ , идет в плоскости, параллельной грани  $AC$  и отражается в точке  $K$  от второй грани крыши  $AB$ . Затем, претерпев четвертое отражение в точке  $D_1$ , луч выходит из призмы, совпадая с продолжением падающего луча.

Угол между гранями  $AB$  и  $BC$  крыши равен  $60^\circ$ , а лучи  $DE$  и  $KD_1$  лежат в плоскостях, образующих двугранный угол  $40^\circ$ .

Пентапризма [32] (рис. 32) имеет меньшую длину хода луча, чем одинаковая с ней по числу отражений, характеру оборачивания изображения и отклонению лучей пентапризма с крышей Бк- $90^\circ$ . Пропускаемые призмой световые лучи претерпевают первое отражение от грани  $BCC_1B_1$  и направляются на грань  $BCDE$ . После второго отражения лучи падают на грань  $DEE_1D_1$ , отражаются и выходят из призмы повернутыми на  $90^\circ$  относительно первоначального направления; лучи  $O_1O_2$ ,  $O_2O_3$  проходят в плоскости, перпендикулярной грани  $BCDE$ , и образуют угол  $90^\circ$ . Призма разворачивается в плоскопараллельную пластинку.

Призмы БМ- $60^\circ-90^\circ$ , БМ- $80^\circ-90^\circ$ , БМ- $90^\circ-90^\circ$ , БМ- $100^\circ-90^\circ$ , БМ- $120^\circ-90^\circ$  (рис. 33) изменяют направление оптической оси в двух плоскостях. Каждая из них образована из двух призм с одним отражением, изготовленных из одного куска стекла. Призма БкМ- $100^\circ-90^\circ$  снабжена крышей.

В этих призмах по сравнению с составными призмами сокращены две преломляющие грани и соответственно уменьшены поте-

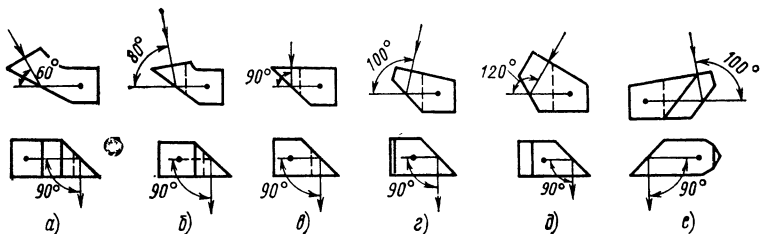


Рис. 33. Призмы, изменяющие направление оптической оси в двух плоскостях:

$a$  — БМ —  $60^\circ-90^\circ$ ;  $b$  — БМ —  $80^\circ-90^\circ$ ;  $c$  — БМ —  $90^\circ-90^\circ$ ;  $d$  — БМ —  $100^\circ-90^\circ$ ;  $e$  — БкМ —  $100^\circ-90^\circ$

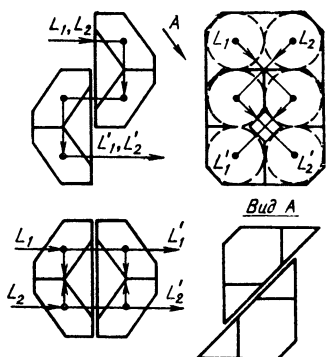


Рис. 34. Двухканальная оборачивающая система

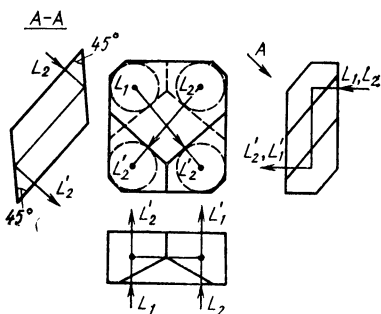


Рис. 35. Двухканальная призма для создания псевдоскопического эффекта

ри света, обеспечена повышенная точность взаимного расположения отражающих граней.

Двухканальные призмы с пространственным ходом лучей имеют меньшие размеры и массу, чем аналогичные по назначению спаренные призмные системы.

Двухканальная оборачивающая система [29] (рис. 34) по действию аналогична спаренной оборачивающей системе Порро. Каждая из двух призм системы имеет форму четырехгранной усеченной пирамиды, углы основания которой срезаны по касательным к поверхностям пропускаемых пучков. Через систему проходят одновременно и независимо относительно друг друга два световых пучка с осевыми лучами  $L_1$  и  $L_2$ .

Двухканальная призма для создания псевдоскопического эффекта в стереоскопических дальномерах (патент ФРГ № 1214018) представляет собой две скрещенные ромбические призмы, выполненные из одного куска стекла (рис. 35). Световой пучок  $L_1$ , падающий на призму из левой ветви дальномера, направляется призмой в правый окуляр, а пучок лучей  $L_2$  из правой ветви поступает в левый окуляр. Благодаря этому наблюдатель будет видеть псевдоскопическое изображение предмета.

## 7. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИЗМ ПРИ СОХРАНЕНИИ УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧЕЙ

Большинство призм, в том числе и типовые, строят для цилиндрического пучка лучей, а применяют их для пропускания конического светового пучка. Объем призмы используется не полностью, что приводит к ее излишним размерам, массе и уменьшенному полю зрения. В целях получения оптимальных значений этих параметров исходную форму призмы для цилиндрического пучка лучей изменяют в зависимости от размеров реального конического пучка лучей. С увеличением угла конуса светового пучка увеличивается и различие в размерах исходной и деформированной призм.

Положительный эффект достигается также при построении деформированных призм для цилиндрического пучка лучей.

Деформирование призм осуществляют двумя способами:

1) в исходной призме поступательно смещают отражающие и преломляющие грани и изменяют их величину, сохраняя углы между гранями;

2) смещают грани, изменяя величину граней и углов.

Первым способом построены призмы 12 [26], 13 [7], 33 [33], 50, 54 [7], 65 для конического пучка лучей (рис. 1, 2, 6, 9). При их проектировании исходными призмами служили прямоугольная с двумя отражениями 7, полупентапризма 29, ромбическая 47, и призма Аббе 64.

Вторым способом получены призмы 11 [17], 63, 73 для конического пучка лучей (рис. 1, 8, 10) и призмы 4 [18], 48 (патент ФРГ № 1285198) для цилиндрического светового пучка (рис. 1, 6). Эти призмы разработаны на основе прямоугольной призмы 7, пентапризмы 58, призм Пехана 70, Дове 1 и ромбической 47.

Призма 4 имеет в полтора раза меньшую массу, чем призма 1.

Ромбическая призма 48 благодаря соответствующему выбору угла  $\alpha$  между гранями обладает ценным свойством: при небольших углах наклона вокруг оси, перпендикулярной падающему осевому лучу и плоскости главного сечения, не смещает выходящий световой пучок.

Деформирование призм прямого зрения при поступательном смещении выходящего светового пучка является частным случаем рассматриваемого приема. В результате такого деформирования достигаются значительное сокращение размеров призм и увеличение их угловых полей.

Этот прием использовал Клабазня [34] в призмах Дове 3, Аббе 66 для конического пучка лучей (см. рис. 1, 9) и Либманн [35] в призмах Аббе 69, Пехана 72 и в трехкомпонентных 76, построенных для цилиндрического пучка (см. рис. 9, 11).

В призмах 69, 72 длина хода луча  $l=3,699 d$  и  $l=4,747 d$ . Соответствующие типовые призмы 64, 70 имеют  $l=5,196 d$  и  $l=5,156 d$ .

## **8. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИЗМ С ИЗМЕНЕНИЕМ УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧЕЙ**

В ряде случаев на базе исходной призмы можно спроектировать призму с другим углом отклонения лучей, сохраняя положение входной грани. Для этого изменяют наклон отражающих граней и находят новые положения выходной преломляющей грани, при котором призма разворачивается в плоскопараллельную пластинку.

В зависимости от заданных условий призма с требуемым отклонением лучей может оказаться по габаритам и угловому полю больше или меньше исходной призмы.

Рассматриваемый метод широко использован при создании набора типовых призм.

На основе прямоугольной призмы 20 (АР-90°) получены призмы с одним отражением 18, 19, 22 (АР-60°, АР-45°, АР-105°) (рис. 1).

Полупентапризма 29 (БУ-45°) и пентапризма 58 (БП-90°) послужили прототипами призм 30, 31, 59 (БУ-40°, БУ-60°, БУ-80°) (рис. 2, 8).

Башмачная призма 35 является базовой для призмы 37 по па-



тенту Швеции № 314534 (рис. 3) с углом отклонения лучей  $75^\circ$ . Новая призма имеет уменьшенные размеры и увеличенное угловое поле: у нее длина хода осевого луча  $l=2,198 d$ , в то время как у аналогичной типовой призмы Бк-90°  $l=2,980 d$ .

Призма 49 (см. рис. 6) образована из ромбической призмы 47, у которой изменены наклон первой отражающей грани и положение выходной преломляющей грани.

## **9. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИЗМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПАДАЮЩЕГО СВЕТОВОГО ПУЧКА**

При установке некоторых призм в разные положения относительно падающего светового пучка можно изменить угол отклонения лучей и число отражений. В ряде случаев для получения оптимальных параметров одновременно с изменением положения призмы изменяют углы между отражающими и преломляющими гранями.

Поворачивая прямоугольную призму 20 с одним отражением вокруг оси, перпендикулярной главному сечению, на угол  $45^\circ$ , получим призму прямого зрения Дове 1, а при повороте на  $135^\circ$  образуем призму 7 с двумя отражениями (см. рис. 1).

Поворотом призмы 7 вокруг оси, параллельной плоскости главного сечения и гипотенузой грани, достигается третье отражение. Призма 10 такой конструкции, предложенная Е. Н. Гончаренко [4], обладает новым свойством: при небольших ее наклонах вокруг любой оси направление отраженных лучей не изменяется, что позволяет избежать юстировки призмы при пропускании параллельных пучков лучей.

Аналогично действует прямоугольная призма 8 с крышей, но она имеет более сложную форму, дает худшее качество изображения, требует тщательного выполнения ребра крыши и повышенной точности изготовления прямого угла между гранями крыши.

Призма 40, установленная катетной гранью перпендикулярно падающему световому пучку и дополненная клином, образует призму 43 с нулевым углом отклонения лучей (см. рис. 4).

Призма Шмидта 44 (см. рис. 5) при расположении ее основания параллельно осевому лучу падающего светового пучка и выборе оптимального угла при вершине превращается в одну из самых компактных призм прямого зрения 46, конструкция которой предложена Г. А. Можаровым и В. С. Филатовым [16]. Длина хода осевого луча в призме зависит от сорта стекла и лежит в пределах  $(2,56—2,66)d$ .

Призма 60 [А.с. № 158104 (СССР)] (см. рис. 8) построена на базе пентапризмы 58, повернутой на угол  $30^\circ$  относительно падающего светового пучка. При этом угол отклонения лучей  $90^\circ$  остался неизменным.

Призма имеет простую форму, что облегчает ее изготовление. Призму можно использовать для совмещения изображений. Для этого на грань  $AB$  вместо зеркального наносят светоделительное покрытие и пропускают через нее второй пучок лучей, показанный штриховой линией. Оба пучка совмещаются на выходе из призмы.

## **10. ИСКЛЮЧЕНИЕ КЛИНА В СОСТАВНЫХ ПРИЗМАХ**

Конструкция составных призм с клином значительно упрощается при исключении клина из состава ее компонентов. Сокращается число рабочих граней, исключается одна склейка или воздушный про-

межуток. В последнем случае новая призма имеет меньшие потери света при преломлении и меньшее рассеяние света. Вместе с этим возрастают габаритные размеры призмы и уменьшается ее угловое поле.

Клин исключают двумя способами:

переносят его с одной преломляющей грани на другую и в новом положении изготавливают совместно с основной призмой из одного куска стекла;

увеличивают размеры клина и объединяют его с призмой.

Призма для цилиндрического светового пучка 38 (см. рис. 3) выполнена первым способом на базе башмачной призмы 35. Клин перенесен с выходной грани на входную и объединен с призмой.

Наименьшие размеры новая призма будет иметь при ее построении для лучей с углом падения  $\vartheta = 45^\circ$  (обозначена цифрой 39) [23]. На габаритные размеры призмы оказывает влияние также показатель преломления стекла  $n$ , но в отличие от большинства других призм возрастание показателя вызывает увеличение габаритных размеров.

Призмы для конического светового пучка 15, 54 построены вторым способом на базе призм с клиньями 14, 50 [7, 23] (см. рис. 1, 6).

## 11. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОГО ЧИСЛА ОТРАЖЕНИЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот прием применяют для расширения углового поля призм, работающих в параллельных пучках лучей. В частности, призмы с разным числом отражений позволяют увеличить угловое поле приборов наблюдения. Чтобы призма давала одно изображение, количество отражений для разных лучей, проходящих в пределах углового поля, должно отличаться на четное число. В противном случае отдельные участки изображения получатся зеркальными. Призмы, которые дают одно изображение при различном числе отражений, называют призмами многократного отражения [23].

Призма Сеннова (рис. 36, а) в главном сечении имеет форму параллелограмма. На отражающие грани нанесено зеркальное покрытие, так как с возрастанием числа отражений угол падения лучей на эти грани уменьшается и принимает значения меньшие, чем угол полного внутреннего отражения.

На рис. 36, б показана другая конструкция призмы, которая имеет большую перископичность [23]. Призмы многократного отражения проектируют на основе ромбической призмы. При этом исходную призму поворачивают относительно падающего пучка лучей (рис. 36, а) или изменяют у нее углы между гранями (рис. 36, б).

Действие призмы Сеннова рассмотрим с помощью развертки, которая построена для шести отражений (рис. 37). Углы  $\omega_2$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_6$  определяют угловые поля для пучков, испытывающих соответственно два, четыре и шесть отражений. Перекрывая друг друга, эти углы образуют общее угловое поле призм  $\omega$ .

Ширина параллельных пучков лучей, пропускаемых призмой, изменяется в пределах каждого угла  $\omega_2$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_6$  в зависимости от направления пучков — возрастает от нулевого значения до максимальной ширины, после чего уменьшается до нуля. Пучки с наибольшей шириной обозначены буквами с индексами:  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_6$ .

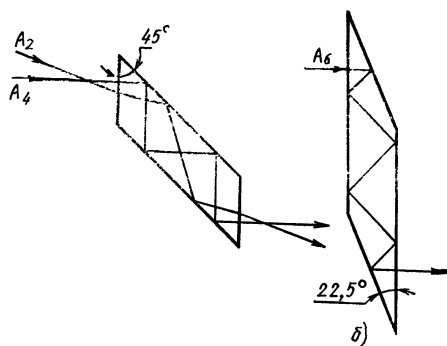


Рис. 36. Призмы многократного отражения.  
 а — призма Сеннова; б — призма с увеличенной перископичностью

При возрастании числа отражений ширина пропускаемых пучков лучей сокращается.

Часть лучей, падающих в пределах углов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$ , отражается соответственно один и три раза и не проходит через призму вследствие полного внутреннего отражения на выходной грани.

Призма виньетировывает пучки лучей, причем виньетирование имеет переменную величину как в пределах углов  $\omega_2$ ,  $\omega_4$  и  $\omega_6$ , так и по всему угловому полю. С увеличением числа отражений возрастают виньетирование пропускаемых пучков и потери света на отражение.

Продолжая развертку призмы, можно определить пучки лучей, испытывающих восемь и более отражений. При использовании этих пучков для получения изображения будет увеличиваться угловое поле призмы и возрастать виньетирование крайних пучков лучей.

Недостатками призм многократного отражения являются виньетирование пучков лучей, большие потери света на отражение и увеличенное рассеяние света.

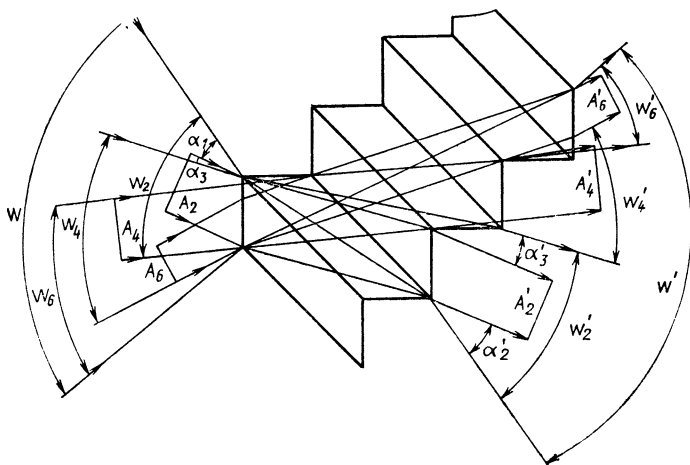


Рис. 37. Развертка призмы Сеннова

## 12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЗМ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛАЗНОГО БАЗИСА И ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В бинокулярных приборах раздвижку окуляров по расстоянию между глазами наблюдателя осуществляют с помощью подвижных призм, которые изменяют расстояние между световыми пучками, проходящими в двух каналах.

Ромбические призмы (рис. 38) являются наиболее распространенным устройством для этой цели. Поворачивая их в разные стороны вокруг осевых лучей первого и второго каналов, изменяют расстояние между выходящими пучками в пределах от  $b_1$  до  $b_2$ . При этом ориентация изображения и направление пучков, падающих на призму, остаются неизменными.

Прямоугольные призмы (рис. 39) смещают выходящие световые пучки при поступательном перемещении в противоположные стороны. Изменение расстояния между световыми пучками равно удвоенной величине относительного перемещения призм, т. е.

$$b_1 - b_2 = 2(a_1 - a_2). \quad (7)$$

Если диаметр расчетного цилиндрического пучка равен  $d$ , то ширина призмы

$$c = d + (b_1 - b_2)/2. \quad (8)$$

Перемещения призм не оказывают влияния на длину хода осевого луча. С целью упрощения механизма устройства можно одну из призм оставить неподвижной и смещать только вторую призму.

В оптических приборах применяют фокусировку изображения по глазу наблюдателя при неподвижных окулярах и объективах, которую называют внутренней фокусировкой. Наиболее просто внутренняя фокусировка осуществляется поступательным смещением некоторых типов призм вдоль их оси симметрии [28]. На рис. 40 показаны три призмы, каждая в двух положениях. При смещении призм на расстояние  $a$  взаимное расположение входных и выходных осевых лучей и длина хода луча в призме остаются неизменными, а рабочие отрезки, отделяющие призму от других оптических элементов, изменяются: у призм БП-90° — на  $\sqrt{2}a$ .

Смещения призм БР-180° и ВР-180° не вызывают увеличения их

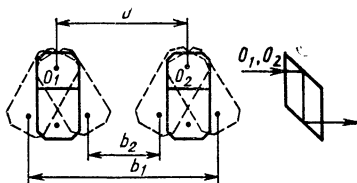


Рис. 38. Ромбические призмы для изменения глазного базиса

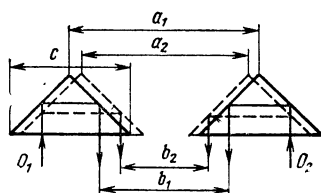


Рис. 39. Прямоугольные призмы для изменения глазного базиса

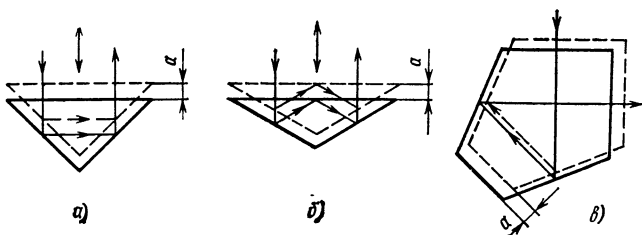


Рис. 40. Использование призм для внутренней фокусировки изображения:  
а; б; в — призмы БР-180°; БР-180°; БП-90°

первоначальных габаритных размеров. В случае применения для фокусировки пентапризмы БП-90° размеры ее преломляющих граней в главном сечении возрастают на величину  $a/\sqrt{2}$ .

### 13. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ПРИЗМ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Преломляющие свойства призм используют при конструировании клиньев; аноморфозных систем; телескопических систем; призм для соединения двух полей зрения; призм для компенсации сдвига изображения; растровых устройств.

**Клинья.** В оптических приборах для отклонения лучей на сравнительно небольшие углы применяют призмы с малыми преломляющими углами, называемые клиньями. По конструкции клинья делят на три группы: однокомпонентные, ахроматические, апохроматические.

Ахроматический клин состоит из двух ориентированных в разные стороны клиньев, выполненных из разных сортов стекол. Угол преломления и стекло компонентов клина определяют из условия исправления хроматических aberrаций для двух спектральных линий.

Апохроматический клин содержит три компонента, за счет чего у него осуществлена ахроматизация для трех спектральных линий.

Величина преломляющего угла клина ограничивается допустимыми хроматическими aberrациями и обычно не превышает 6°. При

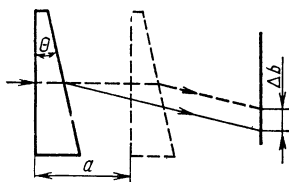


Рис. 41. Клин, перемещающий изображение вдоль оптической оси

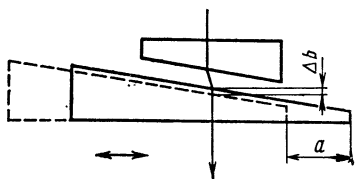


Рис. 42. Клиновидный компенсатор интерферометра

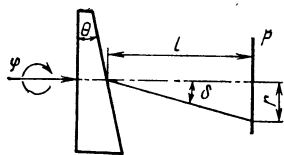


Рис. 43. Клин, вращающийся вокруг оптической оси

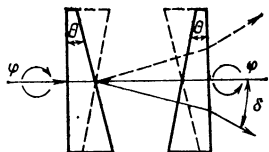


Рис. 44. Два клина, вращающиеся в противоположные стороны

работе клина в узком спектральном диапазоне преломляющий угол может достигать  $20^\circ$ .

С помощью клиньев решают следующие задачи: измеряют малые смещения изображения и углы отклонения лучей; изменяют разность хода лучей в интерферометрах; производят юстировку; компенсируют сдвиг изображения в аэрофотоаппаратах; сканируют пространство предметов; обеспечивают наводку на резкое изображение в фотоаппаратах; разделяют изображения.

Рассмотрим некоторые устройства с использованием клиньев.

Клин, перемещающийся вдоль оптической оси на расстояние  $a$  (рис. 41), вызывает смещение изображения

$$\Delta b = a(n - 1)\theta, \quad (9)$$

где  $n$  — показатель преломления стекла,  $\theta$  — преломляющий угол клина.

Так как угол  $\theta$  мал, то из формулы (9) следует, что большому перемещению клина соответствует малое смещение изображения. Этот эффект используется для измерения малых величин в микрометрах и дальномерах. Наклоны и повороты клина при перемещении вызывают ошибки в измерениях и поэтому недопустимы.

Два клина, один из которых перемещается перпендикулярно оптической оси, а второй неподвижен (рис. 42), имеют одинаковые преломляющие углы и эквивалентны плоскопараллельной пластинке. При смещении клина на расстояние  $a$  ход осевого луча изменяется на величину

$$\Delta b = a\theta. \quad (10)$$

Клинья этого типа применяют в клиновых компенсаторах интерферометров.

Вращающийся клин (рис. 43) устанавливают в дальномерах фотоаппаратов для выверки оптических осей по высоте. Угол отклонения луча  $\delta$  определяют по формуле

$$\delta = (n - 1)\theta. \quad (11)$$

При повороте клина на угол  $\varphi$  изображение движется по окружности с радиусом

$$r = l\delta = l(n - 1)\theta \quad (12)$$

и смещается на расстояние

$$\Delta b = 2r \sin \frac{\varphi}{2}, \quad (13)$$

где  $l$  — расстояние между клином и плоскостью изображения  $P$ .

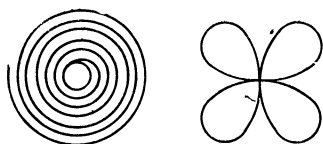


Рис. 45. Траектории сканирования, формируемые двумя клиньями с разными скоростями вращения

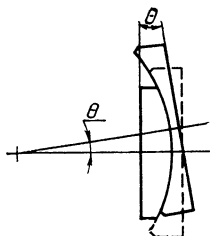


Рис. 46. Клинь с переменным углом

Вследствие круговой траектории движения изображения угол поворота клина ограничивают углом  $\pm 60^\circ$  от плоскости его главного сечения.

Два клина, вращающиеся в противоположные стороны с одинаковыми скоростями (рис. 44), применяют в компенсаторах дальномеров и для компенсации сдвига изображения в аэрофотоаппаратах. Клинья обеспечивают прямолинейное смещение изображения, величина которого в угловой мере

$$\delta = 2(n - 1)\theta \cos \varphi, \quad (14)$$

где  $\varphi$  — угол поворота каждого клина.

Эта формула является приближенной и пригодна только для клиньев с малыми преломляющими углами. Если углы измеряются градусами, отклоненный клиньями луч не остается в одной плоскости, получает добавочное боковое смещение, величина которого зависит от угла поворота клиньев [19].

Два клина, вращающиеся в противоположные стороны с разными скоростями, используют в сканирующих устройствах. В зависимости от соотношения угловых скоростей клиньев формируется спиральная или розеточная («цветок жасмина») траектории сканирования (рис. 45).

Клин с переменным преломляющим углом (рис. 46) выполнен из плосковыпуклой и плосковогнутой линз с одинаковыми радиусами кривизны. Линзы могут быть как сферическими, так и цилиндрическими. Одна из линз качается вокруг центра сферической или цилиндрической поверхности, изменяя тем самым преломляющий угол клина, величина которого равна углу поворота линзы  $\theta$  от ее среднего положения.

Фокусирующие клинья (рис. 47) применяют в зеркальных фотоаппаратах для повышения точности наводки на резкое изображение. Клинья  $K_1$  и  $K_2$  ориентированы преломляющими углами в разные стороны, а точка  $O$  соответствует положению пленки в фотоаппарате.

Если объектив дает изображение  $A$  (линия, перпендикулярная плоскости рисунка) на расстоянии  $\Delta a$  от точки  $O$ , то при рассмотрении его через клинья наблюдатель увидит раздвоенное изображение  $A'$  и  $A''$ .

При уменьшении расфокусировки  $\Delta a$  изображения  $A'$ ,  $A''$  сбли-

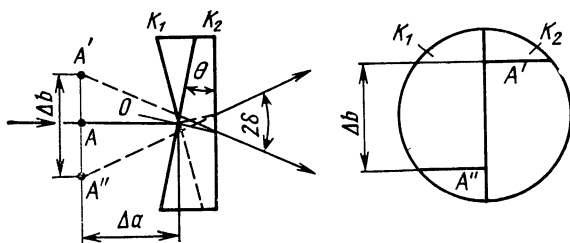


Рис. 47. Фокусирующие клинья

жаются и при  $\Delta a = 0$  видны без разрыва. Та же картина будет наблюдаться в случае расположения изображения  $A$  за клиньями.

Угол отклонения  $\delta$  осевого луча каждым клином вычисляется по приближенной формуле (11). Взаимный сдвиг изображений  $A'$  и  $A''$

$$\Delta b = 2\Delta a \delta = 2\Delta a (n - 1) \theta. \quad (15)$$

Обозначим через  $\Delta a_d$  допустимую расфокусировку изображения, а через  $\Delta b_{\max}$  — наибольшее расстояние между двумя изображениями  $A'$ ,  $A''$ , при котором глаз не различает их смещения вследствие ограниченной разрешающей способности. Тогда, согласно формуле (15), преломляющий угол клиньев будет определяться выражением

$$\theta = \frac{\Delta b_{\max}}{2\Delta a_d (n - 1)}. \quad (16)$$

Бипризма Френеля (рис. 48) содержит два клина, изготовленных из одной стеклянной пластинки. В интерференционных приборах бипризма дает два мнимых изображения источника света, которые испускают когерентные колебания, способные интерферировать. В зрительных трубах бипризму используют для разделения изображений и срезания диаметральной части изображения [2, 23].

**Анаморфозные и телескопические призмные системы.** Преломляющие призмы изменяют ширину падающего пучка лучей в плоско-

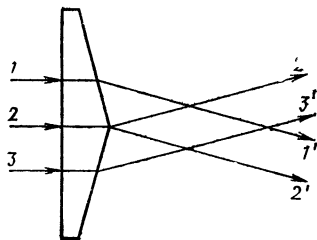


Рис. 48. Бипризма Френеля

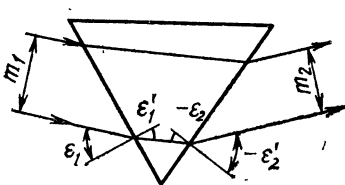


Рис. 49. Влияние преломляющей призмы на изменение сечения пучка



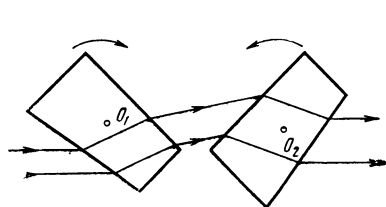


Рис. 50. Двухпризменная анаморфозная панкратическая система

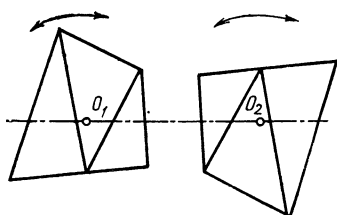


Рис. 51. Шестипризменная анаморфозная панкратическая система

сти главного сечения и пропускают пучок неизменной ширины в плоскости, перпендикулярной главному сечению, т. е. трансформируют изображение. Влияние призмы на размеры пучка лучей характеризует коэффициент анаморфозы

$$A = \frac{m_1}{m_2},$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  — ширина пучка в главном сечении до призмы и после прохождения через призму.

Из рис. 49 следует, что

$$A = \frac{\cos \varepsilon'_1 \cos \varepsilon'_2}{\cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2}$$

или для системы призм, расположенных в воздухе

$$A = \prod_{k=1}^{k=m} \frac{\cos \varepsilon'_k}{\cos \varepsilon_k}. \quad (17)$$

Анаморфозные призмённые системы содержат до четырех одинарных или составных призм, разделенных воздушными промежутками, и обеспечивают параллельность падающего и выходящего пучков лучей. Хроматические aberrации исправляют, используя разные сорта стекол для компонентов и подбирая у них определенные преломляющие углы.

Наибольшее распространение получили двухгрупповые панкратические анаморфозные системы (рис. 50). Непрерывное изменение коэффициента анаморфозы в определенных пределах достигается

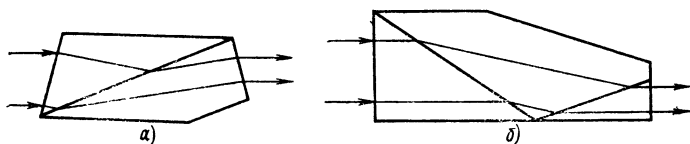


Рис. 52. Телескопические призмы:  
а — двухкомпонентная; б — трехкомпонентная

вращением призм в разные стороны. Для получения наименьших габаритов систем оси вращения  $O_1$ ,  $O_2$ , располагают в средней части каждой призмы.

Системы позволяют изменять коэффициент анаморфозы в пределах 0,5—2. Их угловое поле не превышает  $12^\circ$ , так как ограничивается хроматической аберрацией и габаритами призмы. Поэтому призмённые анаморфозные системы используют лишь для проектирования и репродуцирования.

Примером панкратической анаморфозной системы с хорошим исправлением хроматической аберрации является двухгрупповая шестипризменная система [2], представленная на рис. 51. Ее аберрации имеют меньшую величину, чем аберрации анаморфозной системы с цилиндрическими линзами.

Телескопические призмённые системы содержат две анаморфозные системы с равными коэффициентами анаморфозы, установленные последовательно вдоль оптической оси и развернутые относительно друг друга на  $90^\circ$ . Такие системы обладают увеличением и по своему действию подобны линзовым телескопическим системам.

Принцип построения призмённой телескопической системы впервые предложил Брюстер в 1831 г. Методы расчета элементов системы разработал В. Н. Чуриловский и предложил новые конструкции призмённых систем, которые назвал телескопическими призмами (рис. 52). Дальнейшее развитие теории и расчет телескопических призмённых систем получили в работе [31].

**Преломляющие призмы для соединения полей и для компенсации сдвига изображения.** Призма для соединения двух полей, образованных пучками лучей  $L_1$  и  $L_2$ , показана на рис. 53. Она используется в калориметрах, в которых сравнивается цветность обоих полей, не имеющих отдельных деталей. В этом случае не предъявляются требования к исправлению аберраций. Призма не имеет отражений и действует как две наклонные плоскопараллельные пластинки, установленные по одной в каждом канале.

Для обеспечения тонкого стыка двух полей необходимо, чтобы сравниваемые пучки перекрывали ребро  $A$ . Как следует из рис. 53, это условие выполняется, если угол преломления  $\epsilon' \geq 90^\circ - 2\alpha$ , где  $2\alpha$  — острый угол между гранями призмы.

Принимая во внимание, что угол падения  $\epsilon = 90^\circ - \alpha$ , и применяя закон преломления (3), получим  $\cos \alpha \geq n \cos 2\alpha$ , или  $2n \cos^2 \alpha - \cos \alpha - n \leq 0$ ,  
откуда

$$\cos \alpha \geq \frac{1}{4n} (1 \pm \sqrt{1 + 8n^2}). \quad (18)$$

По этой формуле вычисляют углы между гранями призмы.

Призма для компенсации сдвига изображения (рис. 54) применяется в скоростных киносъемочных камерах, производящих съемку на непрерывно движущуюся пленку. Призму 2 устанавливают между объективом 1 и кадровой рамкой 4, в рабочей плоскости которой движется пленка с линейной скоростью  $v$ . Призма вращается с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси  $O$  и, действуя как плоскопараллельная пластинка, перемещает изображение в направлении движения пленки. Полная компенсация сдвига изображения достигается при равенстве скоростей изображения и пленки.

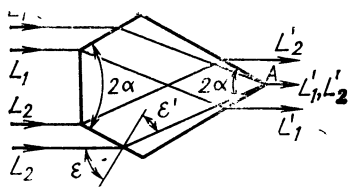


Рис. 53. Преломляющая призма для соединения двух полей зрения

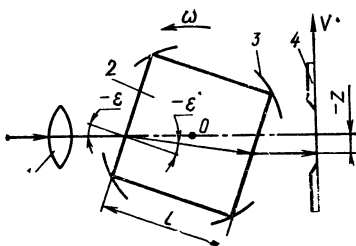


Рис. 54. Преломляющая призма для компенсации сдвига изображения

Однако при постоянном значении  $\omega$  скорость изображения получается неравномерной, поэтому расчет системы компенсации производят по допустимой величине сдвига изображения.

Призму помещают внутрь цилиндра 3 с вырезами, число которых равно числу граней. При перекрывании пучка лучей лопастями цилиндра происходит смена кадра.

**Растровые призмные устройства.** Эти устройства позволяют: повышать точность наводки на резкость в фотоаппаратах; осуществлять беспараллаксное умножение изображений; заменять толстые и тяжелые линзы с малыми радиусами сферических поверхностей на легкие линзы Френеля; получать заданную направленность действия просветных экранов.

Устройство наводки на резкое изображение предмета для зеркальных малоформатных фотоаппаратов состоит из растровой системы преломляющих микропризм, имеющих форму четырехгранных пирамид (рис. 55). Растр выполнен на одной стороне прозрачной пластинки.

Если объектив дает изображение в точке  $A$ , не совпадающей с плоскостью, проходящей через вершины пирамид, то пирамидальная призма дает четыре изображения этой точки, два из которых  $A_1$  и  $A_2$  будут расположены в плоскости рисунка, а вторая пара — в плоскости, перпендикулярной рисунку. Следовательно, все изображение, рассматриваемое через растровую пластинку, будет нерезким. По мере приближения изображения к вершинам пирамид его резкость

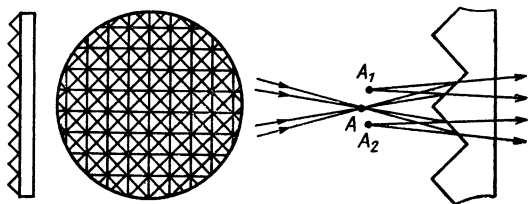


Рис. 55. Устройство наводки на резкость

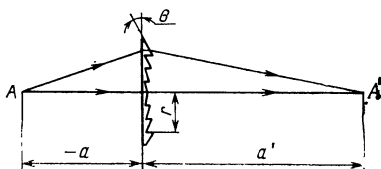
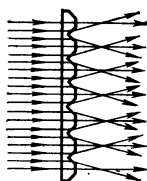
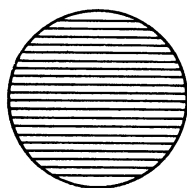


Рис. 56. Устройство для беспараллаксного умножения оптических изображений

Рис. 57. Растровая линза Френеля

начнет возрастать и достигает наивысшего значения в момент совмещения с вершинами пирамид.

Растровая пластинка дает изображение более яркое, чем на матовом стекле, поэтому точность наводки на резкость повышается.

Устройство для беспараллаксного умножения оптических изображений представляет собой растровую призмленную прозрачную пластинку, которую устанавливают перед объективом (рис. 56). Падающий на нее пучок лучей вследствие преломления на растровой поверхности разделяется на несколько пучков, число которых равно числу граней элемента раstra. В плоскости изображений появляется такое же число симметрично расположенных изображений предмета, находящегося перед объективом. Пластинка, приведенная на рис. 56, совместно с объективом дает три расположенных по одной линии изображения. Объектив с пластинкой, растровые элементы которой имеют форму четырехгранных пирамид (см. рис. 55), будет строить четыре изображения, смещенных относительно друг друга по диагоналям четырехугольника.

Растровая линза Френеля применяется в видеоискателях фотоаппаратов, где она выполняет роль коллектива. Линза образована из концентрических кольцевых микропризм, расположенных на одной стороне пластинки (рис. 57). Преломляющие углы призм определяют по приближенной формуле

$$\theta = \frac{r}{n-1} \left( \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \right), \quad (19)$$

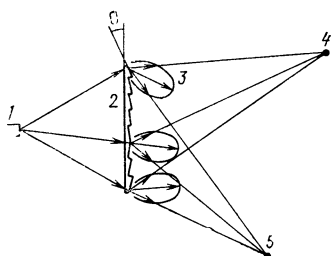


Рис. 58. Просветный экран с одним растром

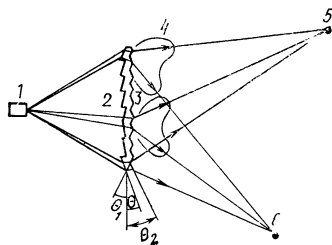


Рис. 59. Просветный экран с двумя растрами

где  $r$  — радиус кольцевой микропризмы;  $a, a'$  — расстояния между линзой и сопряженными точками  $A, A'$ ;  $n$  — показатель преломления пластинки.

Иногда в центральной зоне линзы Френеля располагают растровое призмённое устройство наводки на резкость. Растровую поверхность выполняют на пластинке из органического стекла методом горячего прессования.

Просветный экран с одним призмённым растром [6] по сравнению с диффузным имеет лучшую равномерность яркости изображения. Экран состоит из рассеивающего слоя, на одной поверхности которого выполнен растр из вытянутых преломляющих микропризм (рис. 58). Материалом рассеивающего слоя служит молочное светотехническое органическое стекло или пластикатная пленка. В плоскости экрана элементы раstra могут располагаться по параллельным прямым линиям, концентрическим окружностям или по спирали.

Экран 2, освещаемый через проекционный объектив 1, рассчитан для двух точек наблюдения 4, 5, из которых он рассматривается под наибольшими углами. Направленность действия экрана определяют углы  $\theta$  преломления микропризм.

Растр обеспечивает симметричное относительно наблюдателей расположение индикатрис 3 коэффициентов яркостей, чем достигается равномерное распределение светового потока между наблюдателями и удовлетворительная равномерность яркости изображения для каждого из них.

Экран с двумя призмёнными растрами [А. с. 242447 (СССР)] (рис. 59) имеет более острую направленность действия по сравнению с однорастровым экраном. Устройство и назначение первого раstra 2 и рассеивающего слоя такие же, как в однорастровом экране. Второй растр 3 выполнен из вертикальных прямолинейных двугранных призмённых элементов. Благодаря этому индикатрисы коэффициентов яркости 4 во всех зонах изображения имеют два максимума, направленных в сторону наблюдателей 5, 6. Направленность действия раstra 3 определяют преломляющие углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  его призмённых элементов.

Так как между растрами расположен рассеивающий слой, муаровая картина от наложения растров не наблюдается. Особенность действия экрана позволяет значительно повысить яркость изображения за счет использования рассеивающего слоя с острой направленностью.

## Глава II

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЗМ И ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ

Исследование и расчет призм и призмённых систем являются единым процессом оптимизации характеристик прибора. Для призм выбранной конструкции прежде всего находят зависимости между ее размерами и размерами пропускаемого пучка. Исследуя эти зависимости, определяют оптимальные соотношения рассматриваемых величин, на основе которых вычисляют размеры призм.

В ряде случаев требуется выявить вредные отражения, исследовать виньетирование пучков лучей и влияние призм на габаритный

ход лучей. Для определения способов юстировки и вычисления допустимых погрешностей изготовления исследуют влияние погрешностей в углах между гранями и действие подвижек призм на отклонение лучей и качество изображения.

К настоящему времени накоплен обширный материал по теории призм и методам их исследования. Однако в работах этого направления подвергают анализу только отдельные свойства призм, а комплексные исследования и теория в полном объеме не рассматриваются. Методы исследования не обобщены и не систематизированы, что сдерживает развитие теории, особенно теории призм новых конструкций.

Выделим следующие методы исследования призм и призмённых систем:

- 1) использование лучей, не пропускаемых реальной призмой;
- 2) развертка призмы;
- 3) приведение или редуцирование развертки призмы к воздуху;
- 4) определение размеров призм с крышами;
- 5) определение оптимальных углов между гранями;
- 6) выявление оптимального расположения призмы относительно конического пучка лучей;
- 7) исследование влияния углов отклонения лучей на габариты призмы и предельные значения этих углов;
- 8) выявление вредных отражений;
- 9) исследование влияния призм на виньетирование пропускаемых пучков лучей;
- 10) исследование влияния призм на габаритный ход лучей;
- 11) приведение призм к эквивалентному зеркалу;
- 12) исследование влияния погрешностей изготовления углов призм на отклонение лучей и качество изображения;
- 13) исследование действия подвижек призм и их компонентов.

С помощью методов 1—7 определяют зависимости размеров призмы и длины хода осевого луча от величины пропускаемого пучка лучей. Методы 2 и 3 используют также при расчете призм (см. гл. III). Зависимости, полученные при заданных углах между гранями, определяют оптимальные размеры призм. Иногда характеристики призм можно значительно улучшить, выбирая более выгодные углы между гранями, а также изменяя угол отклонения лучей. В этом случае зависимости выводят из условия, что углы между гранями и угол отклонения лучей являются переменными величинами. Оптимальные размеры призм находят при аналитическом исследовании полученных соотношений.

Производя анализ призм для конического пучка лучей, следует учитывать, что некоторые из них имеют разные параметры при расположении одной из наружных преломляющих граней в узком или широком месте пучка.

Назначение методов 8—10 определяют из названия.

Методы 11—13 служат для получения зависимостей, необходимых при вычислении допустимых погрешностей изготовления призм и для определения способов их юстировки.

## 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛУЧЕЙ, НЕ ПРОПУСКАЕМЫХ РЕАЛЬНОЙ ПРИЗМОЙ

Для предотвращения выколов на ребрах призм делают технологические фаски, которые уменьшают световой размер граней. В ряде случаев элементы крепления призм дополнительно сокращают этот размер.

Таким образом, на габариты призмы оказывают влияние размеры пропускаемого светового пучка и припуски на фаски и крепление. С целью сокращения числа независимых переменных в искомым зависимостях фактический световой пучок увеличивают на величину припусков и производят расчет, используя размеры условного пучка.

Иногда для получения зависимостей используют лучи, которые находятся за пределами условного светового пучка и не пропускаются реальной призмой. Например, длину хода осевого луча,  $l$  в башмачной призме с крышей определяют по лучу  $ABC$  [23] (рис. 3, призма 36):  $l = AB + BC$ . На основании этого равенства получают  $l = 3,6d$ , где  $d$  — диаметр цилиндрического светового пучка, включающий величину припусков на фаски и крепление.

Здесь и в дальнейшем пренебрегают величиной малого воздушного промежутка между частями призмы.

Ребра призмы располагают так, чтобы они пересекали крайние лучи пучка. Построение выполняют, принимая допущение, что крайние лучи проходят через призму в той же последовательности, как осевой луч, независимо от наличия фасок на ребрах.

Призма [13] (рис. 60) действует как призма Лемана ВЛ-0°, но по сравнению с последней имеет уменьшенные габаритные размеры и длину хода луча. Призма склеена из двух частей  $ABC$  и  $CDE$ . На грань  $ED$  нанесено зеркальное покрытие.

Крайние лучи светового пучка пропустим через ребра  $A$ ,  $B$ . Используя построение на рис. 60, найдем

$$BC = CD = 2d; \quad (20)$$

$$EC = 1,155d; \quad (21)$$

$$AC = 1,732d; \quad (22)$$

$$b = 2d; \quad (23)$$

$$l = BD = 3,464d. \quad (24)$$

Призма Уппендаля [35] (рис. 61) с разделением хода лучей и шестью отражениями полностью оборачивает изображение. Она склеена из трех типовых призм: полупентапризмы с крышей БКУ-45°, прямоугольной призмы АР-90°, у которой срезан один угол, и полупентапризмы БУ-45°. На грань  $DE$  нанесено зеркальное покрытие.

Используя табличные значения размеров частей призмы [13], найдем

$$AB = d + AD \sin 45^\circ = 1,875d; \quad (25)$$

$$a = (AD + DG) \sin 45^\circ = 1,582d; \quad (26)$$

$$m = AD - DG = 0,237d; \quad (27)$$

$$l = 5,055d. \quad (28)$$

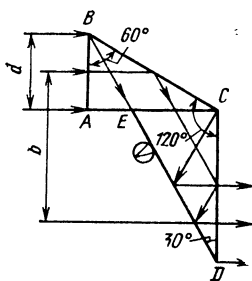


Рис. 80. Составная призма с тремя отражениями

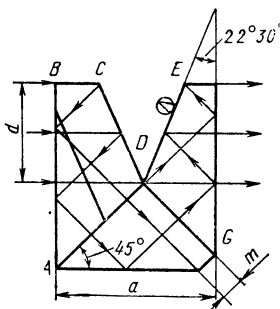


Рис. 61. Призма Уппендаля

Призма имеет меньшие размеры и длину хода луча, но большие потери света на отражающих гранях, чем сходная по действию призма Аббе с крышей  $\text{Ак-}0^\circ$ .

## 2. РАЗВЕРТКА ПРИЗМ

Отражательные призмы эквиваленты по своему преломляющему действию плоскопараллельной пластинке. Развертка призмы представляет собой плоскопараллельную пластинку, у которой длина хода лучей такая же, как в исходной призме.

Для нахождения развертки следует последовательно построить изображение призмы и отраженных лучей во всех отражающих гранях. Каждое последующее изображение строится путем поворота предыдущего изображения вокруг проекции отражающей грани на плоскость главного сечения призмы. Все лучи, проходящие через призму, при развертке спрямляются, и явление отражения не рассматривается. Развертка облегчает поиск зависимостей размеров

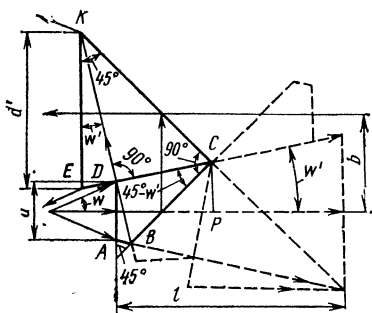


Рис. 62. Прямоугольная призма с двумя отражениями

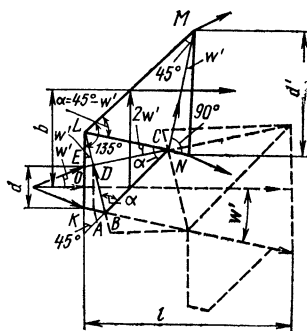


Рис. 63. Ромбическая призма



призмы и длины хода луча от величины пропускаемого светового пучка.

Призма [7] (рис. 62) построена для конического пучка лучей и склеена из двух частей:  $ABCD$  и  $CEK$ . По своему действию она идентична прямоугольной призме с двумя отражениями, но отличается меньшими размерами.

Обозначим угол конуса пропускаемого пучка лучей в воздухе буквой  $\omega$ , а в стекле —  $\omega'$ . Согласно закону преломления эти углы связаны зависимостью  $\sin \omega = n \sin \omega'$ .

Пользуясь разверткой призмы и треугольниками  $ABD$ ,  $BCD$ ,  $CDK$ ,  $CEK$ , определим

$$CD = \frac{\cos \omega'}{1 - \sin 2\omega'} d; \quad (29)$$

$$CK = \frac{2d}{\sqrt{2} \cos^2 \omega' (1 - \operatorname{tg} \omega')^3}; \quad (30)$$

$$d' = \frac{(1 + \operatorname{tg} \omega')}{\cos^2 \omega' (1 - \operatorname{tg} \omega')^3} d; \quad (31)$$

$$l = \frac{(\operatorname{tg}^2 \omega' - \operatorname{tg} \omega' + 2)}{(1 - \operatorname{tg} \omega')^3} d. \quad (32)$$

Очевидно, что

$$b = 2CP = d + 2CD \sin \omega';$$

откуда

$$b = \frac{d}{1 - \sin 2\omega'}. \quad (33)$$

Призма [7], представленная на рис. 63, действует как ромбическая призма. Из рис. 63 следует, что  $KL = d + EL$ ,  $BL = CL$ . Используя эти равенства и решая треугольники  $BKL$  и  $ECL$ , после подстановки и преобразования получим

$$KL = \frac{d}{1 - \operatorname{tg} 2\omega'}. \quad (34)$$

$$CL = \frac{KL}{(1 - \operatorname{tg}^2 \omega') \cos \omega'}. \quad (35)$$

Из треугольников  $CLM$  и  $LMN$  найдем

$$LM = \frac{2KL}{\sqrt{2} (1 + \operatorname{tg} \omega') (1 - \sin 2\omega')}; \quad (36)$$

$$d' = \frac{KL}{1 - \sin 2\omega'}. \quad (37)$$

Рассматривая развертку призмы, запишем

$$l = \frac{d' - d}{2 \operatorname{tg} \omega'},$$

или

$$l = \frac{2KL}{(1 + \operatorname{tg} \omega') (1 - \operatorname{tg} \omega')^2}. \quad (38)$$

Для определения базиса призмы составим равенство

$$b = KL + LM \cos 45^\circ - \frac{d}{2} - \frac{d'}{2}.$$

После преобразования получим

$$b = \frac{KL}{1 - \lg \omega'}. \quad (39)$$

Усложняя конструкцию призмы, можно еще больше сократить длину хода осевого луча. Для этого призму, показанную на рис. 63, следует выполнить по контуру  $ADLMNCB$  и принять  $AD=d$ . Тогда, рассматривая треугольники  $ABD$ ,  $BCD$  и  $CDL$ , получим

$$CL = BL = \frac{\cos \omega'}{\cos 2\omega' (1 - \sin 2\omega')} d. \quad (40)$$

Остальные размеры найдем по аналогии с выполненными выше расчетами:

$$LM = \frac{2d}{\sqrt{2} (1 - \sin 2\omega')^2 (1 + \operatorname{tg} \omega')}; \quad (41)$$

$$d' = \frac{d}{(1 - \sin 2\omega')^2}; \quad (42)$$

$$l = \frac{\cos^2 \omega' (2 - \sin 2\omega')}{(1 - \sin 2\omega')^2} d; \quad (43)$$

$$b = \frac{d}{(1 - \sin 2\omega') (1 - \operatorname{tg} \omega')}. \quad (44)$$

### 3. ПРИВЕДЕНИЕ ИЛИ РЕДУЦИРОВАНИЕ РАЗВЕРТКИ ПРИЗМЫ К ВОЗДУХУ

Этот прием используют в тех случаях, когда входная и выходная грани призмы перпендикулярны осевому лучу. Пусть в результате развертки получена плоскопараллельная пластинка, толщина которой  $l$  и показатель преломления стекла  $n$  (рис. 64, а). Произвольный луч  $ABCD$  после прохождения пластинки дает изображение предмета  $A$  в точке  $A'$ .

Процесс редуцирования сводится к совмещению точек предмета  $A$  и изображения  $A'$  передвижением выходной грани  $СК$  вместе с лучом  $CD$  вдоль осевого луча  $AO$  на расстояние  $\Delta s'$ . В результате получим пластинку (см. рис. 64, б) толщиной  $l' = l - \Delta s'$ , через которую луч  $ABC'D'$  проходит без преломления.

Величина смещения изображения  $\Delta s'$  для лучей различного наклона имеет различные значения, поэтому гомоцентрический пучок лучей  $ABE$  после преломления через плоскопараллельную пластинку становится астигматическим. Величину  $\Delta s'$  находят по приближен-

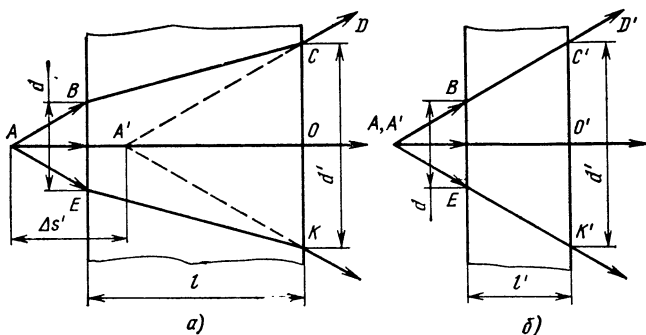


Рис. 64. Схема редуцирования плоскопараллельной пластинки к воздуху:  
а — до редуцирования; б — после редуцирования

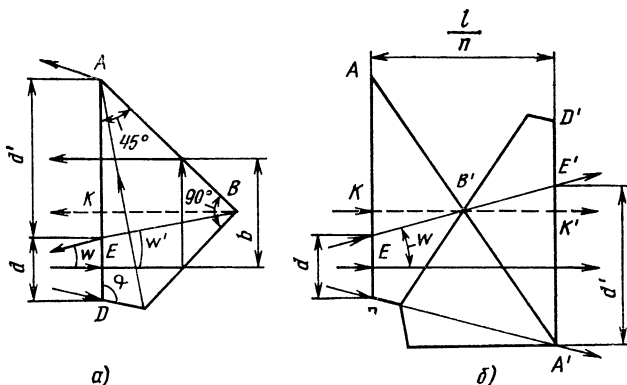


Рис. 65. Прямоугольная призма с двумя отражениями:  
а — ход лучей в призме; б — редуцированная развертка призмы

ной формуле

$$\Delta s' = l \frac{n-1}{n}. \quad (45)$$

Тогда

$$l' = l/n. \quad (46)$$

В отличие от метода развертки, являющегося точным, метод редуцирования к воздуху — приближенный. Определим с помощью редуцирования зависимости размеров призмы и длины хода 'севого луча от размеров пропускаемого пучка лучей.

Прямоугольная призма с двумя отражениями [26] (рис. 65, а) построена для конического пучка лучей. Прове-

дем штриховой линией вспомогательный луч  $BK$  и запишем очевидное равенство

$$l = 2BK = 2AK.$$

По редуцированной развертке призмы (рис. 65, б) найдем

$$d' = AK + EK = \frac{l}{l} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \omega}{n} \right); \quad (47)$$

$$d' = d + 4EK = d + \frac{2l \operatorname{tg} \omega}{n}. \quad (48)$$

Приравнивая правые части выражений (47), (48), получим

$$l = \frac{2d}{1 - \frac{3 \operatorname{tg} \omega}{n}}. \quad (49)$$

Из рис. 65, а следует:

$$AD = d + d'; \quad (50)$$

$$\angle AB = AK \sin 45^\circ = 0,354l; \quad (51)$$

$$\alpha = 90^\circ + \omega; \quad (52)$$

$$b = \frac{d + d'}{2}. \quad (53)$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПРИЗМ С КРЫШАМИ

При исследовании призм с крышами требуются следующие данные: угол крыши в плоскости, пересекающей крышу; в той же плоскости расстояние от вершины следа крыши до центра сечения светового пучка; размеры проекции сечения светового пучка гранью крыши на координатной плоскости.

Определение этих величин и порядок их использования при нахождении размеров призм покажем на ряде примеров.

**Угол крыши в плоскости, пересекающей крышу.** Устройство пентапризмы с пространственным ходом лучей [32] (рис. 66) рассмотрено в гл. I, п. 6. Ее удобно изготавливать из заготовки (показана штриховой линией), две грани которой образуют крышу с углом  $2\gamma_0 = 60^\circ$ . У заготовки срезают лишнее стекло по плоскостям, совпадающими с гранями  $B_1C_1D_1E_1$ ,  $ABE$ ,  $BCDE$ ,  $CDD_1C_1$ . Последней операцией является изготовление преломляющих граней  $AA_1B_1B$  и  $AA_1E_1E$ .

Определим половинный угол крыши  $\gamma$  в плоскости  $GHO_1$ , расположенный под углом  $\beta$  к плоскости  $GFO_1$ , перпендикулярной ребру крыши. На рисунке внизу справа показана часть заготовки призмы, вырезанная плоскостью  $GHF$  и перпендикулярными ей плоскостями  $GHO_1$  и  $GFO_1$ .

Очевидно, что

$$\frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma_0} = \frac{FG}{HG}$$

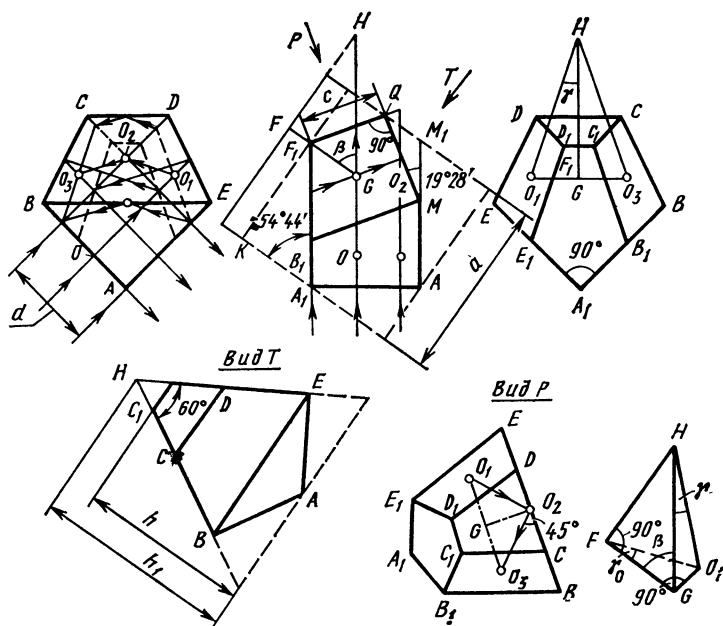


Рис. 66. Пентапризма с пространственным ходом лучей

или

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_0 \cos \beta. \quad (54)$$

Принимая во внимание, что углы  $\gamma_0 = 30^\circ$ ,  $\beta = 54^\circ 44'$ , найдем  $\operatorname{tg} \gamma = 0,333$ .

Из рис. 66 следует

$$\begin{aligned} GO_2 &= \frac{d}{2 \cos 19^\circ 28'} = 0,530d; \\ O_1O_3 &= 2GO_2 = 1,061d; \\ OO_1 &= \frac{1}{2} \left( d + \frac{O_1O_3}{\sin 45^\circ} \right) = 1,250d; \\ HG &= \frac{O_1O_3}{2 \operatorname{tg} \gamma} = 1,591d; \\ A_1K &= GF = HG \cos 54^\circ 44' = 0,919d; \\ GF_1 &= 2GO_2 \cos 54^\circ 44' = 0,612d; \\ MM_1 &= \frac{d \sin 35^\circ 16'}{\sin 125^\circ 16'} = 0,707d. \end{aligned}$$

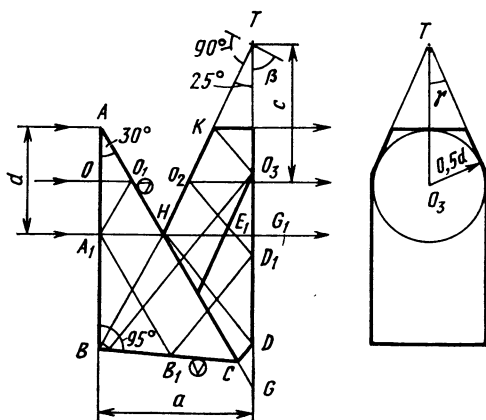


Рис. 67. Двухкомпонентная оборачивающая призма

Найдем размеры призмы и заготовки, а затем длину  $l$  хода луча:

$$AA_1 = d(1 + 0,5 \sin 19^\circ 28') = 1,167d; \quad (55)$$

$$c = GO_2(2 - \sin 19^\circ 28') = 0,884d; \quad (56)$$

$$a = A_1K \operatorname{tg} 54^\circ 44' + c \cos 35^\circ 16' = 2,021d; \quad (57)$$

$$h_1 = HG \cos 54^\circ 44' + AA_1 \cos 35^\circ 16' = 1,871d; \quad (58)$$

$$h = h_1 - GF + GF_1 = 2,178d; \quad (59)$$

$$AM_1 = \frac{a - AA_1 \cos 54^\circ 44'}{\cos 35^\circ 16'} = 1,650d;$$

$$BE = 2AM = 2(AM_1 - MM_1) = 1,887d; \quad (60)$$

$$l = 2 \left( OO_1 + \frac{GO_2}{\sin 45^\circ} \right) = 4d. \quad (61)$$

Расстояние от вершины следа крыши до центра сечения светового пучка в плоскости грани, пересекающей крышу. При определении этого расстояния рассмотрим два случая: световой пучок падает на грань, пересекающую крышу, по нормали (рис. 67) и под углом к нормали (рис. 68). Соответственно сечение пучка будет иметь форму круга или эллипса.

Призма [патент Японии № 23400 (рис. 67)] с разделением хода лучей и шестью отражениями в отличие от призмы Уппендаля (рис. 61) склеена только из двух частей, имеет меньшую длину хода луча и меньшее число рабочих граней (семь вместо десяти). Две грани  $AH$  и  $BC$  покрыты зеркальным слоем, поэтому призма имеет увеличенные потери света на отражающих гранях. Выходная грань  $DE$  расположена перпендикулярно падающему пучку лучей и пересекает крышу под углом  $25^\circ$ .

Определим расстояние  $s$  от вершины крыши  $T$  до центра  $O_3$  сечения светового пучка, при котором обеспечиваются наименьшие

размеры призмы и прохождение светового пучка без виньетирования гранями крыши. Эти условия выполняются, если угол  $\gamma$ , образованный следом крыши на грани  $DE$ , будет описан относительно контура сечения пучка, имеющего форму круга диаметром  $d$ .

Следовательно,

$$c = \frac{d}{2 \sin \gamma}. \quad (62)$$

Подставляя в формулу (54) значения половинного угла крыши  $\gamma_0 = 45^\circ$  и угла  $\beta = 65^\circ$ , получаем

$$\begin{aligned} \gamma &= 22^\circ 54' 35''; \\ c &= 1,284d. \end{aligned} \quad (63)$$

Из рис. 67 найдем

$$a = d \operatorname{tg} 30^\circ + (c + 0,5d) \operatorname{tg} 25^\circ = 1,409d; \quad (64)$$

$$DE = HE_1 \operatorname{tg} 50^\circ + d = 1,992d; \quad (65)$$

$$EK = (c - 0,5d) \operatorname{tg} 25^\circ = 0,366d. \quad (66)$$

Вычислим ряд вспомогательных размеров:

$$O_2O_3 = \operatorname{ctg} 25^\circ;$$

$$D_1O_2 = \frac{O_2O_3}{\sin 40^\circ};$$

$$D_1E_1 = O_2O_3 \operatorname{tg} 50^\circ - 0,5d;$$

$$OO_1 = 0,5d \operatorname{tg} 30^\circ;$$

$$O_1A_1 = \frac{OO_1}{\sin 30^\circ};$$

$$A_1G_1 = a + D_1E_1 \operatorname{tg} 40^\circ;$$

$$A_1B_1 = A_1G_1 \frac{\sin 50^\circ}{\sin 70^\circ};$$

$$B_1C_1 = A_1G_1 \frac{\sin 60^\circ}{\sin 70^\circ};$$

$$B_1D_1 = B_1G_1 - \frac{D_1E_1}{\sin 50^\circ};$$

$$A_1B = A_1B_1 \frac{\sin 55^\circ}{\sin 95^\circ}.$$

Используя полученные результаты, находим

$$AB = d + A_1B = 2,065d; \quad (67)$$

$$BC = AB \frac{\sin 30^\circ}{\sin 55^\circ} = 1,260d; \quad (68)$$

$$l = OO_1 + O_1A_1 + A_1B_1 + B_1D_1 + D_1O_2 + O_2O_3 = 4,877d. \quad (69)$$

Трехкомпонентная оборачивающая призма [35] (рис. 68) по своему действию одинакова с призмами, показан-

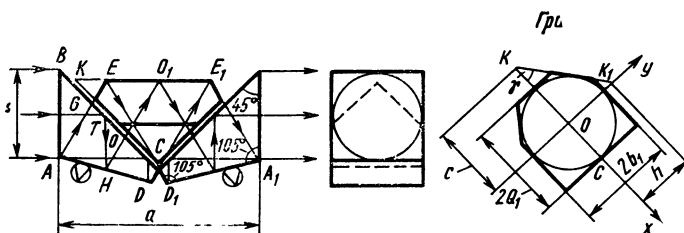


Рис. 68. Трехкомпонентная оборачивающая призма

ными на рис. 61, 67, и отличается от них меньшей длиной хода луча и меньшими поперечными размерами, что в некоторых случаях имеет решающее значение.

Призма состоит из двух полупентапризм с углом отклонения лучей  $60^\circ$  и прямоугольной призмы с крышей, разделенных двумя воздушными промежутками. На гранях  $AD$  и  $A_1D_1$  нанесено зеркальное покрытие. Воздушные промежутки и зеркальное покрытие снижают эксплуатационные качества призмы.

Световой пучок диаметром  $d$  падает на грань  $CG$ , пересекающую крышу, под углом  $15^\circ$  к нормали. Сечение пучка этой гранью имеет форму эллипса, малая полуось которого  $b_1 = 0,5d$ , а большая полуось

$$a_1 = \frac{1}{2} CG = \frac{d}{2 \cos 15^\circ} = 0,518d.$$

Расстояние  $c$  от вершины крыши  $K$  до центра сечения пучка  $O$  вычислим, как и в рассмотренной выше призме (см. рис. 67), из условия получения наименьших габаритных размеров призмы при отсутствии виньетирования светового пучка гранями крыши. Для достижения этого контур грани  $CG$  должен быть описан относительно контура сечения пучка.

Очевидно

$$c = h/\operatorname{tg} \gamma. \quad (70)$$

По формуле (54) найдем половинный угол крыши  $\gamma$  в плоскости  $CG$  при заданных углах  $\gamma_0 = 45^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ :  $\operatorname{tg} \gamma = 0,707$ .

Совместим с центром  $O$  сечения пучка начало прямоугольной системы координат и направим оси  $x$ ,  $y$ , соответственно по большой и малой осям эллипса. Запишем уравнения эллипса и следа  $KK_1$  грани крыши на плоскости  $CG$ :

$$\frac{x^2}{(0,518d)^2} + \frac{y^2}{(0,5d)^2} = 1;$$

$$y = x \operatorname{tg} \gamma + h,$$

где величина  $h$  неизвестна.

В результате совместного решения уравнений относительно аргумента  $x$  получим в общем случае при произвольном значении  $h$  две координаты точек пересечения эллипса следом  $KK_1$ :

$$x_{1,2} = -0,493h \pm \sqrt{0,716d^2 - 1,866h^2}.$$



Если след является касательным к эллипсу, то  $x_1 = x_2$ , что возможно только при равенстве нулю подкоренного выражения. В этом случае

$$h = \sqrt{\frac{0,716}{1,866} d^2} = 0,620d.$$

Подставляя в уравнение (70) значения  $\operatorname{tg} \gamma$  и  $h$ , получим

$$c = 0,877d. \quad (71)$$

Найдем остальные размеры:

$$CK = c + \frac{d}{2 \cos 15^\circ} = 1,394d; \quad (72)$$

$$AD = \frac{d}{\cos 15^\circ} = 1,035d; \quad (73)$$

$$EE_1 = \frac{d}{\cos 30^\circ} = 1,153d. \quad (74)$$

Длину хода луча определим, суммируя отрезки:

$$l = 2(0,5d + TH + HO + OO_1) = 4,628d. \quad (75)$$

Призмы, у которых крышу пересекают две грани (рис. 69). В этом случае размеры призмы определяют следующим образом.

В плоскости одной из граней, пересекающих крышу, вычисляют расстояние  $c_1$  от вершины следа крыши до центра сечения пучка по формулам (62) или (70) в зависимости от угла падения пучка.

Затем вычисляют двумя способами аналогичное расстояние в плоскости второй грани, пересекающей крышу. Первым способом определяют расстояние  $c_2$ , используя найденную величину  $c_1$ . При

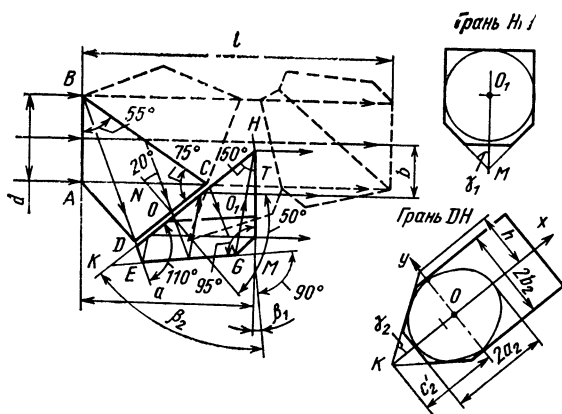


Рис. 69. Призма Аббе с поступательным смещением лучей

втором способе расчета находят расстояние  $c'_2$  по формулам (62) или (70), полагая, что след крыши в плоскости грани является описанным относительно контура сечения пучка.

Если расстояние  $c_2 \geq c'_2$ , то пучок не виньетируется, и вычисленные размеры призмы производят по расстояниям  $c_1$ ,  $c_2$ , а расстояние  $c'_2$  не используют.

При  $c_2 < c'_2$  пучок лучей виньетируется в плоскости второй грани. Тогда размеры призмы определяют по расстоянию  $c'_2$  и не используют расстояния  $c_1$ ,  $c_2$ .

В призме [35] (см. рис. 69) грань  $HM$  расположена под углом  $\beta_1 = 5^\circ$ , а грань  $DH$  — под углом  $\beta_2 = 55^\circ$  к плоскости, перпендикулярной ребру крыши.

Призма дает полное оборачивание изображения и поступательно смещает пропускаемый пучок лучей. По сравнению с похожей по конструкции призмой Аббе с крышей  $AК-0^\circ$  имеет значительно меньшие размеры и длину хода луча.

Уменьшение размеров достигнуто введением воздушного зазора между двумя частями призмы, поступательным смещением пучка лучей и использованием грани  $DH$  одновременно для преломления и отражения лучей. С той же целью грань  $DH$  наклонена к преломляемому осевому лучу, а ребро крыши  $EG$  наклонено к выходящему осевому лучу. Соответственно деформированы углы  $B$  и  $H$ .

Использование грани  $DH$  одновременно для отражения и преломления и наклон ее нормали  $N$  к преломляемому осевому лучу ограничивают величину показателя преломления и предельный угол наклона  $\varphi$  лучей в соответствии с выражениями (2) и (3), в которых принимается  $e_{oc} = 50^\circ$ ,  $e_{on} = 20^\circ$ .

Цилиндрический пучок лучей диаметром  $d$  падает на грань  $HM$  перпендикулярно. Расстояние  $c_1$  между точками  $M$  и  $O_1$  найдем по формулам (54), (62), полагая, что контур грани  $HM$  является описанным относительно сечения пучка:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} 45^\circ \cos 5^\circ = 0,99593;$$

$$\gamma_1 = 44^\circ 53';$$

$$c_1 = \frac{d}{2 \sin \gamma_1} = 0,708d.$$

Пользуясь величиной  $c_1$ , определим необходимые вспомогательные размеры и с их помощью найдем расстояние  $c_2$  между точками  $K$  и  $O$  в плоскости грани  $DH$ . В результате получим  $c_2 = 0,903d$ .

Вычислим расстояние  $c'_2$  между теми же точками вторым способом по формуле (70). Сечение пучка гранью  $DH$  имеет форму эллипса, полуоси которого

$$a_2 = 0,5CD = \frac{d}{2 \cos 20^\circ} = 0,538d;$$

$$b_2 = 0,5d.$$

Угол крыши  $\gamma_2$  найдем по формуле (54):

$$\operatorname{tg} \gamma^2 = \operatorname{tg} 45^\circ \cos \beta_2 = 0,57358.$$

Составим уравнения эллипса и следа грани крыши  $KK_1$ :

$$\frac{x^2}{(0,532d)^2} + \frac{y^2}{(0,5d)^2} = 1;$$

$$y = x \operatorname{tg} \gamma_2 + h.$$

В результате совместного решения уравнений и вычислений по формуле (70) получим

$$x_{1,2} = -0,473h \pm 0,103 \sqrt{19,397d^2 - 56,532h^2};$$

$$h = \sqrt{\frac{19,397}{56,532} d^2} = 0,586d;$$

$$c'_2 = \frac{h}{\operatorname{tg} \gamma_2} = 1,021d.$$

Следовательно,  $c_2 < c'_2$ , т. е. при найденной величине  $c_1$  грань  $DH$  виньетировать световой пучок. Поэтому в дальнейших расчетах значения  $c_1$  и  $c_2$  не используют.

Определим размеры призмы и длину хода осевого луча:

$$BC = \frac{d}{\cos 55^\circ} = 1,743d; \quad (76)$$

$$CD = 2a_2 = 1,064d; \quad (77)$$

$$CK = c'_2 + 0,5CD = 1,553d;$$

$$CG = CK \frac{\sin 35^\circ}{\sin 75^\circ} = 0,922d;$$

$$CH = CG \frac{\sin 30^\circ}{\sin 40^\circ} = 0,717d;$$

$$GH = CG \frac{\sin 110^\circ}{\sin 40^\circ} = 1,348d;$$

$$DH = CD + CH = 1,781d; \quad (78)$$

$$HM = GH \frac{\sin 75^\circ}{\sin 95^\circ} = 1,307d; \quad (79)$$

$$GM = GH \frac{\sin 10^\circ}{\sin 95^\circ} = 0,235d. \quad (80)$$

Величину смещения лучей  $b$ , размер  $a$  и длину хода луча  $l$  определим из равенств

$$b = 0,5d + 0,5d - HT;$$

$$a = AC + CT;$$

$$l = AC + CG + GH.$$

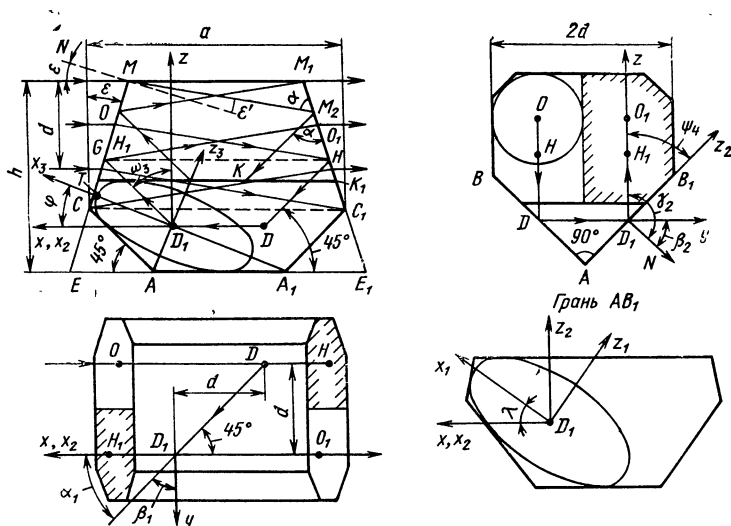


Рис. 70. Призма с четырьмя отражениями и пространственным ходом лучей

Выполняя подстановки, получаем

$$b = dCH \cos 50^\circ = 0,539d; \quad (81)$$

$$a = d \operatorname{tg} 55^\circ + CH \sin 50^\circ = 1,978d; \quad (82)$$

$$l = d \operatorname{tg} 55^\circ + 0,922d + 1,348d = 3,699d. \quad (83)$$

**Проекция сечения светового пучка гранью крыши на координатной плоскости.** Размеры призмы с четырьмя отражениями [патент ФРГ № 838833] (рис. 70) находят с помощью проекции сечения светового пучка гранью крыши  $AB_1$  на плоскости  $x_3z_3$ . Призма имеет пространственный ход осевого луча и поступательно смещает его на расстояние  $d$ . На отражающие части граней  $CM$ ,  $C_1M_1$  нанесено зеркальное покрытие. Последовательность прохождения лучей через призму показана на рис. 70.

Угол крыши не требует высокой точности выполнения, допускает отклонения в угловых минутах, а ребро крыши располагается вне светового пучка, поэтому фаска на ребре не оказывает влияния на качество изображения. Наличие двух поверхностей с зеркальным покрытием и большая длина хода луча  $l \approx 8,2d$  приводят к увеличению потерь света при отражении и вследствие поглощения в стекле.

Сечение светового пучка гранью  $AB_1$  имеет форму эллипса, уравнение которого в системе координат  $x_3z_3$  найдем, используя системы  $x_1z_1$ ,  $x_2z_2$ ,  $xz$ .

Большая и малая полуоси эллипса в системе  $x_1z_1$  имеют значения

$$a_1 = \frac{2}{2 \cos \varepsilon_1};$$

$$b_1 = 0,5d;$$

где  $\varepsilon_1$  — угол падения осевого луча  $DD_1$  светового пучка на грань крыши  $AB_1$ .

Положение луча  $DD_1$  и нормали  $N$  грани  $AB_1$  в системе координат  $xuz$  определяет углы  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  и  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ , которые условимся брать в диапазоне от 0 до  $180^\circ$  и считать их всегда положительными. Из рис. 70 имеем  $\alpha_1 = \beta_1 = \beta_2 = 45^\circ; \gamma_1 = \alpha_2 = 90^\circ; \gamma_2 = 135^\circ$ .

Угол падения  $\varepsilon_1$  найдем по формуле, определяющей угол между двумя прямыми [22]:  $\cos \varepsilon_1 = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \cos \gamma_2$ ;  $\cos \varepsilon_1 = 0,5; \varepsilon_1 = 60^\circ$ .

Следовательно,

$$a_1 = \frac{d}{2 \cos 60^\circ} = d.$$

Имея значения  $a_1, b_1$ , запишем уравнение эллипса в системе координат  $x_1z_1$ :

$$\frac{x_1^2}{d^2} + \frac{4z_1^2}{d^2} = 1.$$

или в другом виде:

$$x_1^2 + 4z_1^2 - d^2 = 0. \quad (84)$$

Найдем угол  $\lambda$  между осями систем координат  $x_1z_1, x_2z_2$ . Большая ось эллипса (84), совпадающая с осью  $x_1$ , проходит по линии пересечения плоскости  $P$  грани  $AB_1$  и плоскости  $Q$ , в которой лежат лучи  $DD_1, D_1H_1$  и нормаль  $N$ . В системе координат  $xuz$  плоскость  $P$  проходит через ось  $x$  под углом  $45^\circ$  к плоскости  $xz$ . Плоскость  $Q$  пересекает плоскость  $xu$  по линии  $DD_1$ , плоскость  $xz$  — по линии  $D_1H_1$ , а плоскость  $yz$  по линии, проходящей через начало координат  $D_1$  под углом  $45^\circ$  к оси  $z$ .

Введем следующие обозначения:  $\psi_3, \omega_3$  — углы между осью  $z$  и следами плоскостей  $P, Q$  в плоскости  $xz$ ;  $\psi_4, \omega_4$  — такие же углы в плоскости  $yz$ .

Чтобы определить знак углов  $\psi_i$  и  $\omega_i$ , надо мысленно повернуть ось  $z$  до совпадения с направлением соответствующего следа. Если ось  $z$  поворачиваем по часовой стрелке, то углы считаем положительными.

По рис. 70 находим  $\psi_3 = 90^\circ; \psi_4 = \omega_3 = 45^\circ; \omega_4 = -45^\circ$ .

Запишем уравнения плоскостей  $P, Q$  [22]:

$$z - x \operatorname{ctg} \psi_3 - y \operatorname{ctg} \psi_4 - z_P = 0;$$

$$z - x \operatorname{ctg} \omega_3 - y \operatorname{ctg} \omega_4 - z_Q = 0,$$

где  $z_P, z_Q$  — координаты пересечения следов плоскостей  $P, Q$  с осью  $z$ .

После подстановки получим

$$\begin{aligned}x - y &= 0; \\ z - x + y &= 0.\end{aligned}$$

Решая эти уравнения совместно, найдем угловые коэффициенты  $\operatorname{tg} \lambda_1$ ,  $\operatorname{tg} \lambda_2$  горизонтальной и фронтальной проекции линии пересечения плоскостей  $P$ ,  $Q$ , а затем по известной формуле [22] угол  $\lambda$ :

$$\begin{aligned}x &= 2y = 2z; \\ \operatorname{tg} \lambda_1 &= \frac{y}{x} = 0,5; \\ \operatorname{tg} \lambda_2 &= \frac{z}{x} = 0,5; \\ \cos \lambda &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda_1 + \operatorname{tg}^2 \lambda_2}} = 0,81646; \\ \lambda &= 35^\circ 15' 50''.\end{aligned}$$

Используя формулы преобразования координат

$$\begin{aligned}x_1 &= z_2 \sin \lambda + x_2 \cos \lambda; \\ z_1 &= z_2 \cos \lambda - x_2 \sin \lambda; \\ x_2 &= x; \quad z_2 = \frac{z}{\cos 45^\circ},\end{aligned}$$

выполним последовательные подстановки в уравнении (84) и получим два уравнения эллипса в системах координат  $x_2 z_2$  и  $xz$ :

$$A_2 x_2^2 + 2B_2 x_2 z_2 + C_2 z_2^2 + F_2 = 0; \quad (85)$$

$$Ax^2 + 2Bxz + Cz^2 + F = 0,$$

где

$$A = A_2 = 1 + 3 \sin^2 \lambda = 2;$$

$$B = \frac{B_2}{\cos 45^\circ} = \frac{3 \sin \lambda \cos \lambda}{\cos 45^\circ} = -2;$$

$$C = \frac{C_2}{\cos 45^\circ} = \frac{1 + \cos^2 \lambda}{\cos 45^\circ} = 6;$$

$$F = F_2 = -d^2.$$

Система координат  $x_3 z_3$  образована поворотом системы  $xz$  вокруг ее начала до совпадения оси  $x_3$  с большой осью эллипса. Поэтому уравнение эллипса в системе  $x_3 z_3$  будет иметь коэффициент  $F$  такой же величины, как в уравнении (85), и не будет содержать член с произведением переменных.

Искомое уравнение примет вид

$$A_3 x_3^2 + C_3 z_3^2 + F = 0.$$

Введем обозначения  $A_3 = k_1$ ;  $C_3 = k_2$ ;  $B_3 = 0$ .

Запишем инварианты уравнения линии второго порядка [27]:

$$k_1 + k_2 = A + C; \quad k_1 k_2 = AC - B^2,$$

т. е.  $k_1$  и  $k_2$  являются корнями квадратного уравнения

$$k^2 - (A + C)k + (AC - B^2) = 0.$$

Решая уравнение, получим

$$k_1 = 4 - \sqrt{8};$$

$$k_2 = 4 + \sqrt{8}.$$

Составим каноническое уравнение эллипса, образованного проекцией сечения светового пучка гранью крыши, и вычислим длину его большой полуоси  $D_1 T$ :

$$D_1 T = \sqrt{\frac{\frac{x_3^2}{-F}}{\frac{A_3}{C_3}}} = \sqrt{\frac{\frac{z_3^2}{-F}}{\frac{C_3}{A_3}}} = 1;$$

$$D_1 T = \sqrt{\frac{-F}{A_3}} = \sqrt{\frac{d^2}{4 - \sqrt{8}}} = 0,924d. \quad (86)$$

По известной формуле найдем угол  $\varphi$  между осями систем координат  $xz$ ,  $x_3 z_3$ :

$$\operatorname{ctg} 2\varphi = \frac{A - C}{2B} = 1; \quad \varphi = 22^\circ 30'. \quad (87)$$

Чтобы выдержать заданное направление осевого луча, следует выбирать угол наклона  $\varepsilon$  преломляющих граней в зависимости от показателя преломления стекла  $n$ . Из треугольников  $MM_1 M_2$  и  $KK_1 M_2$  получим

$$\alpha = 90^\circ - 2\varepsilon + \varepsilon' = 45^\circ + \varepsilon,$$

где

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

Выполнив подстановку, найдем

$$\sin \varepsilon - n \sin (3\varepsilon - 45^\circ) = 0. \quad (88)$$

Для исключения виньетирования светового пучка грань  $CM$  должна располагаться в плоскости, касательной к проекции сечения пучка. Но так как угол  $\varepsilon$  изменяется в небольших пределах и составляет  $\approx 19^\circ$  (см. рис. 71), проведем грань  $CM$  через точку  $T$ , что практически не окажет влияния на виньетирование пучка.

Запишем:

$$AA_1 = \frac{d}{2} (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi) = 1,414d; \quad (89)$$

$$AE = A_1E - AA_1;$$

$$A_1E = A_1T \frac{\sin(67^\circ 30' + \varepsilon)}{\cos \varepsilon};$$

$$A_1T = A_1D_1 + D_1T;$$

$$A_1D_1 = \frac{d}{2 \sin 22^\circ 30'}.$$

В результате подстановок и преобразований найдем

$$AE = \left[ \frac{\cos(22^\circ 30' - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} 2,230 - 1,414 \right] d. \quad (90)$$

Длину  $a$  и высоту  $h$  призмы выразим через суммы отрезков:

$$a = AA_1 + 2AE - 2CE \sin \varepsilon;$$

$$h = (EC + CG + GM) \cos \varepsilon.$$

После вычислений получим

$$a = 1,414d + \frac{2AE}{1 + \operatorname{tg} \varepsilon}; \quad (91)$$

$$h = 0,293d + a \left[ 0,5 + \sin(\varepsilon - \varepsilon') \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} \right]. \quad (92)$$

Аналогично поступим при определении длины  $l$  хода осевого луча:

$$l = 2(D_1H_1 + H_1O_1) + \frac{d}{\sin 45^\circ};$$

$$l = kd, \quad (93)$$

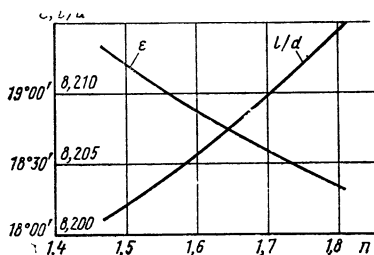


Рис. 71. Зависимость угла наклона преломляющих граней и длины хода осевого луча от показателя преломления

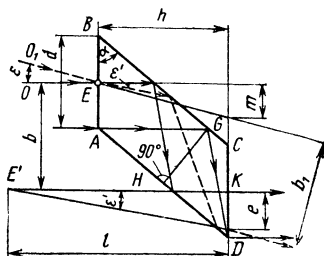


Рис. 72. Ромбическая призма



где

$$k = 2 \left[ 0,924 \frac{\cos(22^\circ 30' - \varepsilon)}{\sin(45^\circ + \varepsilon)} \left( 1 + 1,414 \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} \right) + \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} + 0,707 \right]. \quad (94)$$

Приведенная на рис. 71 кривая  $\varepsilon$  облегчает определение угла наклона преломляющих граней, а кривая  $l/d$  показывает, что сорт стекла призмы практически не влияет на длину хода осевого луча.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УГЛОВ МЕЖДУ ГРАНЯМИ

Задачу определения оптимальных углов между гранями решают в два этапа:

1) определяют зависимости размеров призмы от величины пропускаемого светового пучка, принимая углы между гранями за переменные величины;

2) проводят анализ полученных зависимостей и находят такие значения углов между гранями, при которых призма имеет оптимальные характеристики.

Ромбическая призма [патент ФРГ № 1285198] (рис. 72) при определенной величине угла  $\alpha$  между гранями обладает ценным свойством: не смещает выходящий пучок лучей при небольших наклонах вокруг оси, перпендикулярной падающему осевому лучу.

Найдем зависимости длины хода  $l$  осевого луча и высоты  $h$  призмы от диаметра  $d$  цилиндрического светового пучка и угла  $\alpha$ . Величину  $l$  определим по лучу  $AGD$ , который вместе с отрезком  $AD$  образует равнобедренный треугольник  $AGD$ :

$$l = 2AG = 2d \operatorname{tg} \alpha. \quad (95)$$

Из точки  $G$  проведем вспомогательную прямую  $GH$ , перпендикулярно грани  $AD$ . Тогда

$$h = 2AH \sin \alpha = 2d \operatorname{tg} \alpha \sin^2 \alpha. \quad (96)$$

Пусть в первоначальном положении призмы осевой луч  $O$  падает на грань  $AB$  по нормали. Ось вращения  $E$  призмы направим перпендикулярно плоскости рисунка. Изображение предметной точки  $E$  расположится в точке  $E'$ , а расстояние  $E'K$  будет равно длине хода осевого луча.

Обозначим буквами  $b$  и  $b_1$  соответственно смещение осевого луча в исходном положении призмы и после ее наклона. Вместо наклона призмы повернем на малый угол  $\varepsilon$  осевой луч в положение  $O_1$ . Вследствие малости угла  $\varepsilon$  примем  $\sin \varepsilon = \operatorname{tg} \varepsilon = \varepsilon$ ,  $\cos \varepsilon = 1$ ,  $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{n}$ ,

где  $n$  — показатель преломления стекла.

Для двух положений осевого луча разность смещений

$$\Delta b = b_1 - b = \varepsilon - m = \varepsilon \left( \frac{l}{n} - h \right).$$

Чтобы при повороте призмы выходящий луч не сдвигался, необходимо выдержать условие  $\Delta b = 0$  или

$$\frac{l}{n} = h.$$

Подставив сюда значения  $l$ ,  $h$  из уравнений (95), (96), получим после преобразования выражение для вычисления искомого угла  $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{1}{n}}. \quad (97)$$

Рассмотрим примеры определения оптимального угла между гранями в призмах для конического светового пучка.

Призма [7] (рис. 73) в главном сечении имеет вид равнобедренного треугольника и по действию не отличается от типовой призмы  $BP-180^\circ$ . На гранях  $AB$  и  $BC$  нанесено покрытие.

Из рис. 73 следует

$$AC = 2BC \cos \alpha; \quad (98)$$

$$d' = C'D + ED = BC (\cos \alpha + \sin \alpha + \operatorname{tg} w'); \quad (99)$$

$$d' = d + 2l \operatorname{tg} w'; \quad (100)$$

$$l = KB' + B'D = 4BC \sin \alpha \cos^2 \alpha. \quad (100)$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$BC = \frac{d}{\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} w' (1 - 8 \cos^2 \alpha)}. \quad (101)$$

Определим величину базиса:

$$b = AC - \frac{d'}{2} - (KO - AK);$$

где

$$KO = \frac{d'}{2} - ED.$$

В результате вычислений получим

$$b = 4BC \cos \alpha \sin^2 \alpha. \quad (102)$$

Величина угла между гранями  $\alpha$  влияет на длину хода луча. Из развертки призмы следует, что этот угол можно увеличивать только до совмещения грани  $AB'$  с лучом  $B'E$  и уменьшать — до совмещения грани  $BC'$  с лучом  $C'F$ .

Следовательно,

$$\frac{90^\circ + w'}{3} \geq \alpha \geq \frac{90^\circ - w'}{3}. \quad (103)$$

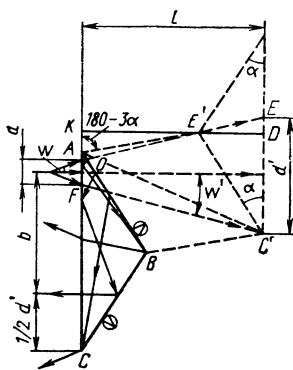


Рис. 73. Равнобедренная призма с углом отклонения  $180^\circ$

Рассматривая выражения (100), (101), видим, что длина хода луча зависит от величины углов  $\alpha$  и  $w'$ . Угол  $\alpha_0$ , соответствующий наименьшей длине  $l$ , можно определить по минимальному значению функции  $l = \Phi(\alpha, w')$  при заданном угле  $w'$ .

Учитывая результаты вычислений и неравенство (103), получим

$$\alpha_0 = \frac{90^\circ - w'}{3}. \quad (104)$$

## 6. ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИЗМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО КОНИЧЕСКОГО ПУЧКА ЛУЧЕЙ

Некоторые призмы для конического пучка лучей имеют разные характеристики (габариты, массу, угловое поле, виньетирование) в зависимости от расположения одной из наружных преломляющих граней в узком или широком месте пучка. Для определения оптимального расположения призмы относительно пучка следует вычислить нужные характеристики для двух ее положений и выбрать одно из них по лучшим данным.

Призма [7] (рис. 74, а) по действию подобна призме Лемана и отличается уменьшенными размерами. Грань  $AB$  расположена в узком месте пучка. Из треугольников  $ABE$ ,  $ADE$ ,  $CDE$  и  $AD'F$  находим

$$AE = \frac{2}{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w'} d; \quad (105)$$

$$DE = \frac{2(1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} w')}{(1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2} d; \quad (106)$$

$$CD = \frac{2(1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2}{(1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2 (\sqrt{3} \operatorname{tg} w')} d; \quad (107)$$

$$l = \frac{2\sqrt{3}}{(1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2} d. \quad (108)$$

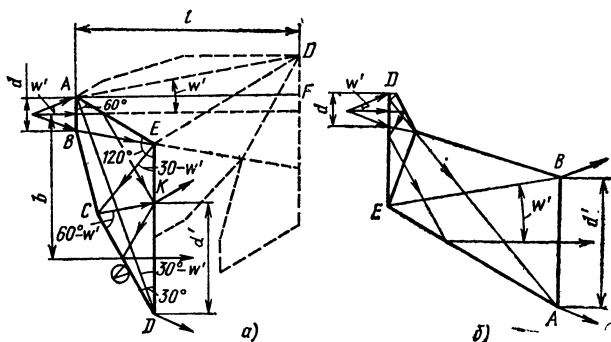


Рис. 74. Призмы с тремя отражениями и поступательным смещением лучей

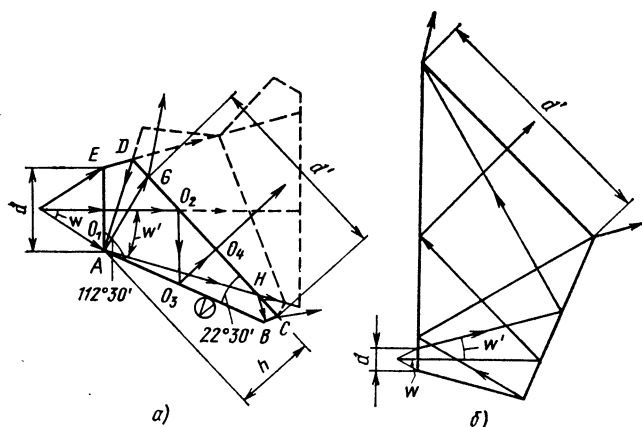


Рис. 75. Полупентапризмы

Используя равенства

$$d' = d + 2D'F;$$

$$m = DE + AE \sin 30^\circ - \frac{d}{2} - \frac{d'}{2}.$$

вычислим

$$d' = \frac{(1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2}{(1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2} d, \quad (109)$$

$$b = \frac{(2 + \sqrt{3} \operatorname{tg} w' - 3 \operatorname{tg}^2 w')}{(1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} w')^2} d. \quad (110)$$

На рис. 74, б построена вторая призма, у которой в узком месте пучка расположена грань DE. Масштаб рисунков 74, а и 74, б одинаковый. Расчеты показывают, что во втором положении призма имеет большие размеры, чем призма в первом положении. Кроме того, во втором положении призма состоит из двух частей, имеет большее число рабочих граней и, следовательно, более трудоемка в изготовлении. Поэтому грань AB следует размещать в узком месте конического пучка лучей.

Полупентапризма [33] (рис. 75) построена в двух положениях относительно конического пучка лучей, причем призма на рис. 75, а увеличена в 4 раза по сравнению с призмой на рис. 75, б. Расчеты и рисунок показывают, что при размещении грани AE в узком месте пучка призма имеет наименьшие размеры, а следовательно, и оптимальное расположение.

Найдем размеры призмы, занимающей это положение. По условию прохождения луча AH угол  $w' \leq 22^\circ 30'$ .

С другой стороны, из условия полного внутреннего отражения луча  $DE$  на грани  $CD$  имеем

$$\sin(45^\circ - w') \geq 1/n,$$

следовательно,

$$45^\circ - \arcsin 1/n \geq w' \leq 22^\circ 30'. \quad (111)$$

Левая часть неравенства возрастает при увеличении показателя преломления стекла  $n$  и достигает величины  $22^\circ 30'$  при  $n \approx 2,6$ . Общеупотребительные стекла для видимой области спектра имеют показатель преломления, не превышающий  $n=1,8$ , поэтому предельный угол  $w'$  определяет только левая часть неравенства (111)

Для увеличения угла наклона пропускаемых лучей грань  $CD$  на участке  $DG$  покрывают зеркальным слоем. Тогда предельный угол определяют по правой части неравенства (111) и соблюдают неравенство

$$\sin \varepsilon \geq 1/n, \quad (112)$$

где  $\varepsilon$  — угол падения луча, отражающегося в точке  $G$ .

Учитывая построения на рис. 75,  $a$ , найдем

$$DE = \frac{\sin w'}{\sin(90^\circ - 2w')} d = \frac{\sin w'}{\cos 2w'} d; \quad (113)$$

$$AD = \frac{\sin(90^\circ + w')}{\sin(90^\circ - 2w')} d = \frac{\cos w'}{\cos 2w'} d;$$

$$AH = AD \frac{\sin(45^\circ + w')}{\sin(45^\circ - w')} = AD \operatorname{tg}(45^\circ + w');$$

$$AB = AH \frac{\sin(90^\circ + 2w')}{\sin(67^\circ 30' - w')} = \frac{\operatorname{tg}(45^\circ + w')}{0,924 - 0,383 \operatorname{tg} w'} d; \quad (114)$$

$$DG = AD \frac{\sin(45^\circ - 2w')}{\sin(90^\circ + w')} = 0,707(1 - \operatorname{tg} 2w') d; \quad (115)$$

$$h = AD \sin(45^\circ + w') = 0,354ld, \quad (116)$$

где  $l = 1 + \operatorname{ctg}(45^\circ - w')$ .

Из развертки призмы получим

$$l = (DE + AD + AG) \cos w' = 0,854ld, \quad (117)$$

$$a' = d + 2l \operatorname{tg} w' = (1 + 1,707l \operatorname{tg} w') d. \quad (118)$$

Длина грани  $CD$  определяется суммой

$$CD = d' + DG. \quad (119)$$

## 7. ВЛИЯНИЕ УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧЕЙ НА ГАБАРИТЫ ПРИЗМЫ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭТОГО УГЛА

Для изучения деформирования призм с изменением угла отклонения лучей полезно иметь сведения о влиянии углов отклонения на габариты призмы и знать их предельные значения. Исследование вы-

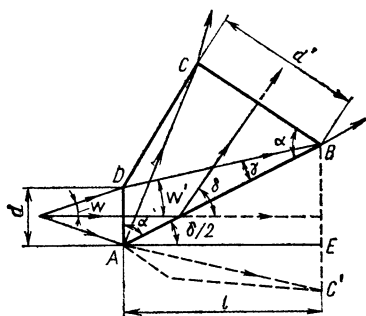


Рис. 76. Призма с углом отклонения, меньшим  $90^\circ$

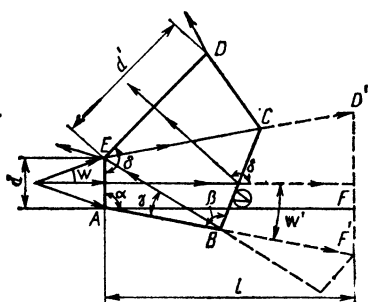


Рис. 7. Призма с углом отклонения, большим  $90^\circ$

полняют в два этапа: находят зависимости размеров призм от величины светового пучка, в которых угол отклонения лучей принимают за переменную величину; проводят анализ полученных зависимостей, выявляют предельные условия прохождения лучей и определяют требуемые данные.

Призма с углом отклонения меньше  $90^\circ$  [7] (рис. 76).

Угол между гранями призмы  $\alpha$  зависит от величины угла отклонения  $\delta$  осевого луча. Очевидно, что

$$\alpha = 90^\circ - \frac{\delta}{2}. \quad (120)$$

Рассматривая треугольник  $ABD$ , получим

$$AB = \frac{\cos \omega'}{\sin \left( \frac{\delta}{2} - \omega' \right)} d. \quad (121)$$

Длина хода осевого луча в призме определяется из треугольника  $ABE$ :

$$l = AB \cos \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \omega'}{\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \cos \omega' - \sin \omega'} d. \quad (122)$$

По развертке призмы находим

$$d' = BC' = 2 \left( \frac{d}{2} + l \operatorname{tg} \omega' \right),$$

откуда

$$d' = \frac{\sin \left( \frac{\delta}{2} + \omega' \right)}{\sin \left( \frac{\delta}{2} - \omega' \right)} d. \quad (123)$$

Габариты призмы определяет длина хода осевого луча  $l$ : чем меньше величина  $l$ , тем меньше и габариты. Из формулы (122) следует, что длина  $l$  и габариты призмы уменьшаются при увеличении угла отклонения лучей.

Наибольшую величину угол  $\delta_{\max}$  примет в момент совмещения луча  $AC$  с гранью  $AD$ . Учитывая это обстоятельство, получим

$$\delta_{\max} = 90^\circ - w'. \quad (124)$$

При уменьшении угла отклонения лучей уменьшается угол  $\gamma$  между отражающей гранью  $AB$  и крайним лучом  $BD$  светового пучка. При этом

$$\gamma = 0,5\delta - w'. \quad (125)$$

По условиям работы призмы угол  $\gamma > 0$ , поэтому на основании равенства (125) получим

$$\delta_{\min} > 2w'. \quad (126)$$

Практически наименьшие углы  $\delta$  ограничивает приемлемая величина  $l$ .

Призма с углом отклонения больше  $90^\circ$  [7] (рис. 77).

Согласно рис. 77 имеем

$$\alpha = 90^\circ + w'; \quad (127)$$

$$\beta = 180^\circ - \frac{\delta}{2} - w'. \quad (128)$$

Из треугольников  $ABE$  и  $BCE$  найдем

$$AB = -\frac{\cos(\delta + w')}{\sin(\delta + 2w')} d; \quad (129)$$

$$BE = BE' = \frac{\cos w'}{\sin(\delta + 2w')} d; \quad (130)$$

$$BC = \frac{\cos w' \sin \delta}{\sin(\delta + 2w') \sin\left(\frac{\delta}{2} - w'\right)} d. \quad (131)$$

Определим длину хода луча и размер  $d'$ :

$$l = (AB + BE') \cos w' = BE [\cos w' - \cos(\delta + w')]; \quad (132)$$

$$d' = E'D' = 2 \left( \frac{d}{2} + l \operatorname{tg} w' \right) = \frac{\sin 2w' + \sin \delta}{\sin(\delta + 2w')} d. \quad (133)$$

Формулы (129), (130) показывают, что с уменьшением угла  $\delta$  уменьшаются грань  $AB$  и отрезок  $BE$ . Следовательно, согласно формуле (132), длина  $l$  и габариты призмы будут сокращаться при уменьшении угла отклонения лучей.

Призма позволяет уменьшать угол  $\delta$  до момента совмещения грани  $ED$  с лучом  $EC$ , что запишется следующим равенством:

$$\delta_{\min} = 90^\circ + w'. \quad (134)$$

При увеличении угла отклонения лучей уменьшается угол  $\gamma$  между гранью  $AB$  и лучом  $BE$ . Принимая во внимание, что

$$\gamma = 180^\circ - 2\omega' - \delta > 0,$$

получим

$$\delta_{\max} < 180^\circ - 2\omega'. \quad (135)$$

Практически наибольший угол отклонения лучей ограничивают допустимые габариты призмы.

## 8. ВЫЯВЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

В призмах и призмённых системах могут возникать вредные отражения, которые вызывают появление дополнительных изображений, бликов и рассеянного света. Дополнительные изображения возникают в тех случаях, когда лучи пропускаемого пучка претерпевают в призме разное число отражений или оптическая система пропускает пучки, отраженные от наружных граней призмы.

В прямоугольной призме проекционной системы пучок лучей  $B$  испытывает одно отражение, а пучки  $B_1$  и  $B_2$  — два отражения (рис. 78). В результате на основное изображение  $A'$  накладываются дополнительные вредные изображения  $A'_1$  и  $A'_2$ . Для исключения вредных отражений следует увеличить размеры призмы или уменьшить размеры кадровой рамки.

Призма, показанная на рис. 79, дает трехкратное отражение основного пучка  $B$  и двукратное отражение пучка  $B_1$ , который строит дополнительное изображение. Для перекрытия пучка  $B_1$  нужно установить на определенном расстоянии от призмы диафрагму  $D$ .

При исследовании выявляют пучки лучей, испытывающие вредные отражения, и находят способы, позволяющие исключить эти отражения. На основе результатов исследования определяют расположение и размеры экранирующих элементов, а в случае необходимости корректируют размеры призмы.

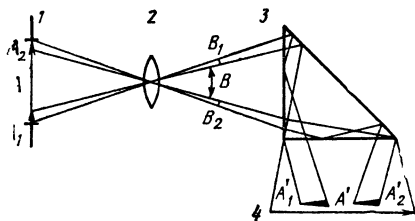


Рис. 78. Вредные отражения в прямоугольной призме:

1 — предметная плоскость; 2 — объектив; 3 — призма; 4 — плоскость изображений

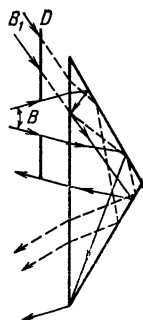


Рис. 79. Вредные отражения в призме ВР-180°



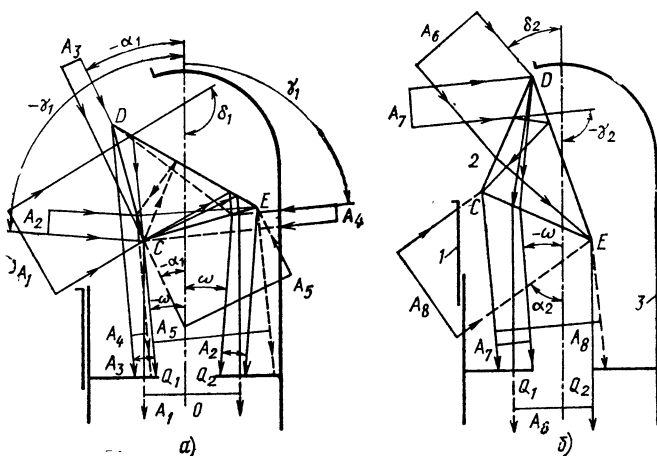


Рис. 80. Вредные отражения в качающейся прямоугольной призме

Исследования проводят двумя методами: 1) непосредственно определяют вредные пучки лучей; 2) используют для этой цели побочные зрачки.

**Непосредственное определение вредных пучков лучей.** Качающаяся прямоугольная призма (рис. 80) расположена перед зрительной трубой с входным зрачком  $Q_1Q_2$  и показана в двух крайних положениях, которым соответствуют углы отклонения лучей  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Параллельные пучки лучей  $A_1, A_6$  отражаются от гипотенузной грани призмы  $DE$  и дают в центре поля зрения основное изображение.

Вредные изображения могут дать только такие пучки лучей, которые после призмы проходят относительно оптической оси  $O$  зрительной трубы под углом, равным или меньшим половине углового поля  $\omega$ . В первом положении призмы (рис. 80, а) параллельные пучки  $A_2, \dots, A_5$ , испытывающие вредные отражения, имеют после призмы наиболее опасное направление — проходят под углом  $\pm\omega$  на минимальном расстоянии от зрачка  $Q_1Q_2$ .

Пучки  $A_3, A_5$  испытывают одно отражение от граней  $CD, CE$ , а каждый из пучков  $A_2, A_4$  отражается 2 раза: пучок  $A_2$  от граней  $CE, DE$  и пучок  $A_4$  от граней  $CD, DE$ . Ширина пучков ограничивается размерами призмы.

По известным величинам углов  $\omega, \delta_1$  найдем углы  $\alpha_1, \gamma_1$ , определяющие направление вредных пучков лучей  $A_2, \dots, A_5$  до призмы. Используя закон отражения, получим

$$\alpha_1 = \delta_1 - \omega - 90^\circ \quad (136)$$

Пучки  $A_2, A_4$  отражаются угловыми зеркалами, образованными гранями  $CE, DE$  и  $CD, DE$ . Так как угол между плоскостями угловых зеркал составляет  $45^\circ$ , то угол отклонения пучков будет равен  $90^\circ$ , т. е.

$$\gamma_1 = 90^\circ - \omega. \quad (137)$$

При втором крайнем положении призмы (рис. 80, б) вредные изображения могут дать пучки  $A_7$ ,  $A_8$ . Их направления определим по аналогии с предыдущим случаем:

$$\alpha_2 = 90^\circ - \delta_2 + w; \quad (138)$$

$$\gamma_2 = 90^\circ + w. \quad (139)$$

Ширину вредных пучков лучей находят с помощью развертки призмы.

Ход пучков лучей  $A_2, \dots, A_5$  в первом положении призмы 2 показывает, что через зрачок  $Q_1Q_2$  проходят лишь лучи пучка  $A_5$ . Для исключения вредных отражений достаточно перекрыть пучок  $A_5$  кожухом 3 и не допускать засветки внутренних поверхностей конструкции крепления призмы, которые могут отражать свет в направлении пучка  $A_5$ .

При втором положении призмы через зрачок проходят только лучи пучка  $A_8$ , которые можно перекрыть подвижной шторкой 1.

Размеры призмы вычисляют, выдерживая два условия:

1) призма должна пропускать основной пучок лучей в двух крайних положениях;

2) в тех же положениях призмы вредные пучки лучей  $A_2, A_3, A_4, A_7$  должны проходить в стороне от входного зрачка  $Q_1, Q_2$ .

Размеры подвижной шторки и величину ее перемещения в зависимости от угла отклонения  $\delta_k$  основного пучка определяют по результатам рассмотрения хода пучков  $A_1, A_8$  в промежуточных положениях призмы.

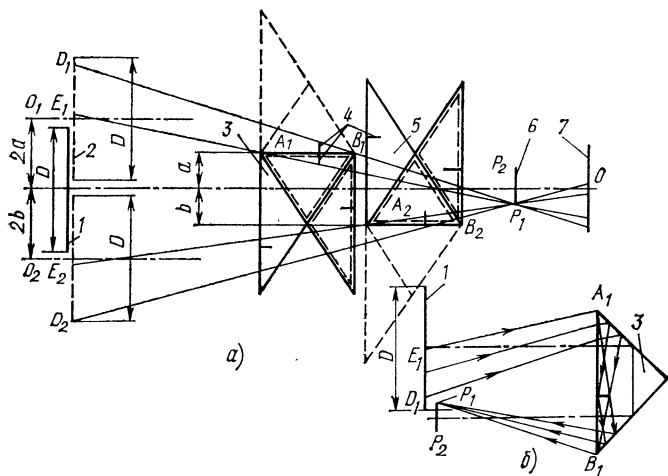


Рис. 81. Вредные отражения в бинокле с оборачивающей системой Малофеева:

$a$  — схема с редуцированной разверткой оборачивающей системы;  $b$  — ход вредного пучка лучей в первой призме; 1 — входной зрачок; 2 — побочный входной зрачок; 3 — редуцированная развертка первой призмы; 4 — канавка; 5 — редуцированная развертка второй призмы; 6 — полевая диафрагма; 7 — окуляр

**Использование побочных зрачков** [23]. При наличии вредных отражений, вызывающих образование дополнительных изображений, вблизи основного выходного зрачка появляются участки побочных выходных зрачков, которые сопряжены в пространстве предметов с соответствующими участками побочных входных зрачков.

Бинокль с оборачивающей системой Малофеева (рис. 81). Редуцированные развертки призм системы 3, 5 для основного пучка лучей показаны контурными линиями. Вредные пучки лучей  $D_1E_1P_1$ ,  $D_2E_2P_1$  испытывают дополнительные отражения от гипотенузных граней  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$  (рис. 81, а, б). Штриховыми линиями показаны приведенные к воздуху развертки призм в обратном ходе лучей для вредных пучков. Общие части разверток для основного и вредных пучков лучей обозначены двумя линиями — контурной и штриховой.

На развертках призм в обратном ходе лучей побочные входные зрачки 2 являются изображениями входного зрачка объектива 1, которые дают при отражении гипотенузные грани  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ . Следовательно, оси  $O_1$ ,  $O_2$  зрачков 2 располагаются относительно оптической оси  $O$  на расстояниях  $2a$ ,  $2b$ , которые равны двойным расстояниям между осью  $O$  и соответствующими гипотенузными гранями на развертке.

Вредные пучки лучей дают в фокальной плоскости  $P_1P_2$  объектива дополнительные изображения. Наибольшую ширину имеют пучки лучей для крайней точки дополнительных изображений  $P_1$ . При перекрытии этих пучков будет обеспечено перекрытие и всех остальных вредных пучков.

Для определения вредных пучков лучей с наибольшей шириной следует провести от края  $P_1$  полевой диафрагмы  $b$  в направлении каждого побочного зрачка 2 по два крайних луча, пропускаемых побочным зрачком и призмой. На рис. 81, а ширина пучка  $D_1E_1P_1$  ограничена длиной грани  $A_1B_1$ , а ширина пучка  $D_2E_2P_1$  с одной стороны ограничена краем грани  $A_2B_2$  и с другой стороны — диаметром побочного входного зрачка.

Вредные пучки лучей перекрывают канавками 4, которые прорезают на гипотенузных гранях призм. Расположение и размеры канавок определяют по результатам исследования хода лучей.

## **9. ВЛИЯНИЕ ПРИЗМ НА ВИНЬЕТИРОВАНИЕ ПРОПУСКАЕМЫХ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ**

Некоторые призмы с разделением хода лучей виньетируют пропускаемый пучок лучей вследствие их конструктивных особенностей (призма-куб для вращения или зеркального оборачивания изображения, двухкомпонентная призма с углом отклонения  $60^\circ$ ). Другой причиной, вызывающей виньетирование, являются экранирующие элементы, включающие вредные отражения. В оборачивающей системе Малофеева (см. рис. 81) виньетирование вызывают канавки 4. Призма (см. рис. 117) виньетирует пучки лучей из-за наличия диафрагмы  $OD$ .

В процессе исследования характера виньетирования пучков лучей в призмных устройствах производится поиск способов, позволяющих свести виньетирование к минимальной величине. На основе результатов исследования определяют величину виньетирования.

Призма-куб (см. рис. 26) и двухкомпонентная призма с углом отклонения  $60^\circ$  (см. рис. 25) перестраивают

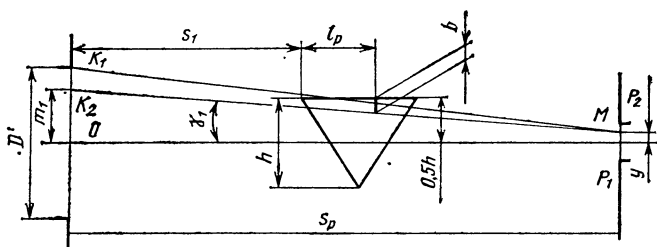


Рис. 82. Виньетирование изображения в точке  $M$  первой призмой оборачивающей системы Малофеева

вают пучок лучей: если падающий пучок имеет в сечении форму круга, то на выходе из призмы сечение пучка принимает форму двух полукругов. Поэтому при размещении призмы внутри оптической системы происходит виньетирование выходящего пучка при пропускании его через круглое отверстие.

Для уменьшения виньетирования следует увеличить световые диаметры оптических элементов, расположенных после призмы по ходу луча. При замене двухкомпонентной призмы-куба на соответствующую четырехкомпонентную призму (см. рис. 30) виньетирование пучков лучей исключается.

Оборачивающая система Малофеева (см. рис. 81) виньетирует пучки лучей из-за экранирующего действия канавки 4, прорезанной на гипотенузной грани призмы 3 для предотвращения вредных отражений. Такая же канавка на второй призме 5 в данном случае не вызывает виньетирования пучков в системе.

Из редуцированной развертки для основного пучка лучей выделим среднее положение призмы 3 (рис. 82). Пучок лучей  $K_1K_2M$ , идущий из выходного зрачка объектива диаметра  $D'$ , не пропускается призмой в точку изображения  $M$ , расположенную в плоскости полевой диафрагмы  $P_1P_2$ . Площадь  $S$  виньетированной зоны зрачка определяют с помощью размера

$$m_1 = s_p \operatorname{tg} \gamma_1 + y, \quad (140)$$

где

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{0,5h - b - y}{s_p - s_1 - l_p};$$

$y$  — координата точки изображения  $M$ ;  $s_p$  — редуцированная длина хода осевого луча между выходным зрачком объектива и диафрагмой  $P_1P_2$ ;  $l_p$  — редуцированное расстояние до канавки;  $s_1$  — расстояние до входной грани призмы;  $h$  — высота призмы;  $b$  — глубина канавки.

Коэффициент виньетирования для выбранной точки изображения вычисляют по формуле

$$k_b = \frac{S}{S_{sp}}, \quad (141)$$

где  $S_{sp}$  — площадь выходного зрачка объектива.

В результате виньетирования на одном крае поля наблюдается зона в форме сегмента с пониженной освещенностью изображения.

## 10. ВЛИЯНИЕ ПРИЗМ НА ГАБАРИТНЫЙ ХОД ЛУЧЕЙ

В зависимости от конфигурации призмы могут сокращать, удлинять или оставлять неизменной габаритную длину хода лучей. Сокращают длину хода лучей призмы с многократным отражением, например пентапризма БП-90°, полупентапризма БУ-45°, призма Шмидта ВР-45°, призма Пехана П-0° и некоторые другие. Призмы с одним отражением удлиняют габаритный ход лучей, а призма Аббе при соблюдении определенных конструктивных соотношений не изменяет длину хода лучей.

Для определения величины изменения габаритного хода лучей  $\Delta l$  следует заменить призму плоским зеркалом, дающим отклонение оптической оси на тот же угол без смещения оси [25].

Пентапризму БП-90° (рис. 83) заменяет зеркало  $Q$ . Ход осевого луча в призме перед зеркалом увеличивает его габаритную длину, а за зеркалом сокращает эту длину. Используя формулы (45) и (46), найдем величину изменения габаритного хода лучей:

$$\Delta l = 2AO \frac{n-1}{n} - (2OB + BC) \frac{1}{n}.$$

В равнобедренном треугольнике

$$OB = OE = \frac{d}{\sqrt{2}},$$

следовательно,

$$\Delta l = \frac{n-2-\sqrt{2}}{n} d. \quad (142)$$

Для стекла К8  $\Delta l = -1,25 d$ .

Полупентапризма БУ-45° (рис. 84) вносит изменение габаритного хода лучей:

$$\Delta l = AB \frac{n-1}{n} + BO - \left[ (BC + CD) \frac{1}{n} + DO \right].$$

Имея в виду, что отрезок  $CD = DO = BD = 0,5d$ , получим

$$\Delta l = \frac{(n-1)\sqrt{2}-2}{2n} d. \quad (143)$$

Для стекла К8  $\Delta l = -0,42 d$ .

В призме Аббе А-0° (рис. 85) части хода осевого луча  $AB$  и  $DE$  вносят удлинение хода, а часть  $BCD$  дает сокращение хода.

Следовательно,

$$\Delta l = 2AB \frac{n-1}{n} + BD - 2BC \frac{1}{n}, \quad (144)$$

или

$$\Delta l = \left( 2 - \frac{3}{n} \right) \sqrt{3} d. \quad (145)$$

Из полученной формулы следует, что призма не изменяет длину хода лучей при  $n = 1,5$ .

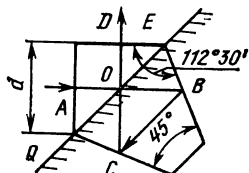


Рис. 83. Пентапризма БП-90°

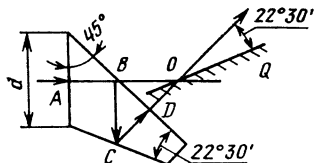


Рис. 84. Полупентапризма  
БУ-45°

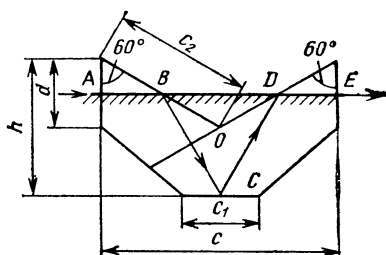


Рис. 85. Призма Аббе

Сохраняя углы призмы, найдем такое соотношение ее размеров, при котором габаритный ход лучей сохраняется при других значениях показателя преломления стекла. Подставив значения

$$AB = \frac{\sqrt{3}}{2} d, \quad BD = BC = (c_2 - d) \sqrt{3}$$

в равенство (144) и выполнив преобразования, получим

$$\Delta l = \sqrt{3} \left[ \left( 1 - \frac{1}{n} \right) d + (c_2 + d) \left( 1 - \frac{2}{n} \right) \right].$$

При  $\Delta l = 0$

$$c_2 = \frac{1}{2 - n} d. \quad (146)$$

Используя величину  $c_2$ , определим остальные размеры призмы и длину хода луча  $l$ :

$$c = \frac{\sqrt{3}}{2 - n} d; \quad (147)$$

$$h = \frac{n - 0,5}{2 - n} d; \quad (148)$$

$$c_1 = 1,387 d; \quad (149)$$

$$l = \frac{n \sqrt{3}}{2 - n} d. \quad (150)$$

Размер  $c_1$  остается таким же, как в типовой призме  $A = 0^\circ$ .

В призмах с поступательным смещением лучей при сохранении их направления (см. рис. 69) изменение габаритного хода лучей определяют по формуле

$$\Delta l = a + b - \frac{l}{n}, \quad (151)$$

где  $a$  — длина призмы;  $b$  — величина смещения лучей;  $l$  — длина хода осевого луча в призме.

Призмы, поступательно смещающие лучи и меняющие их направление на противоположное (см. рис. 73), вносят изменение габаритного хода лучей:

$$\Delta l = b - \frac{l}{n}. \quad (152)$$

## 11. ПРИВЕДЕНИЕ ПРИЗМ К ЭКВИВАЛЕНТНОМУ ЗЕРКАЛУ

Сложные зеркально-призменные системы можно привести к более простым зеркальным системам эквивалентного действия [19, 24]. В параллельных пучках лучей призмы приводятся к одной из четырех зеркальных систем: плоскому зеркалу, угловому зеркалу, зеркальному ромбу, зеркальному прямоугольному триэдру. В сходящихся пучках лучей число эквивалентных зеркальных систем возрастает до семи. К перечисленным системам добавляются следующие: тройное зеркало, плоское зеркало с перпендикулярным ему зеркальным ромбом, угловое зеркало с перпендикулярным ему зеркальным ромбом.

Зеркально-призменные системы с нечетным числом отражений дают не полностью обращенное зеркальное изображение предмета, а при четном числе отражений — полностью обращенное изображение.

**Эквивалентное зеркало.** Призмы, имеющие нечетное число отражающих граней, перпендикулярных плоскости главного сечения, приводятся в параллельных пучках лучей к плоскому зеркалу. В сходящихся пучках лучей эти призмы тождественны действию зеркала, в плоскости которого отраженные лучи поступательно смещаются на величину базиса эквивалентного зеркала. Так как поступательное смещение изображения и отраженных лучей можно осуществить с помощью зеркального ромба, то в последнем случае эквивалентную систему можно представить также в виде зеркала и перпендикулярного ему зеркального ромба.

На рис. 86, *a* показана призма с тремя отражениями, отклоняющая осевой луч *D* на угол  $\delta$ . Точка пересечения падающего луча *D* и выходящего из призмы луча *D'* обозначена буквой *O*, а расстояния от этой точки до входной и выходной граней призмы обозначены соответственно через *c* и *c'*. Эквивалентное зеркало *Q* расположено перпендикулярно биссектрисе *OB* угла  $180^\circ - \delta$ , поэтому при использовании зеркала вместо призмы направление отраженных лучей не изменяется.

Кроме того, эквивалентное зеркало совмещено с плоскостью, изображение произвольной точки *A* которой призма дает на той же плоскости в точке *A'*. Расстояние *b* между точками *A* и *A'* не зависит от положения предметной точки на зеркале, является неизменным для данной призмы и определяет величину базиса эквивалентного зеркала или двойное расстояние между зеркалами ромба эквивалентной системы. Замена призмы зеркалом с базисом *b* не вызывает сдвига изображения и выходящих лучей. Одинаковые подвижки эквивалентного зеркала и призмы оказывают одинаковое действие на выходящие лучи. Положение зеркала *Q* определяет расстояние *h*.

Условимся считать значения *h*, *c* и *c'* отрицательными, если падающий осевой луч *D* или его продолжение встречает эквивалент-

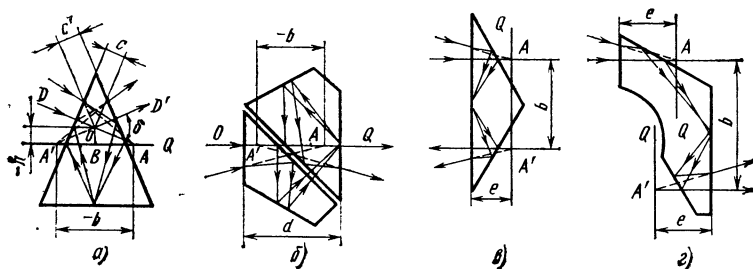


Рис. 86. Призмы, эквивалентные в сходящихся пучках лучей плоскому зеркалу  $Q$  с базисом  $b$

ное зеркало (значение  $h$ ) и входную грань (значение  $c$ ) после точки  $O$ , а отраженный луч выходит из призмы перед точкой  $O$  (значение  $c'$ ). Базис  $b$  принимаем отрицательным, если изображение  $A'$  располагается перед точкой предмета  $A$  по ходу проекции падающего луча на плоскость эквивалентного зеркала. В остальных случаях эти величины будут положительными.

Запишем очевидное равенство

$$AO = \frac{1}{2} \left( \frac{l}{n} - c - b' \right),$$

где  $\frac{l}{n}$  — редуцированная к воздуху толщина развертки призмы.

Из треугольника  $ABO$  получим

$$h = \frac{1}{2} \left( c + c' - \frac{l}{n} \right) \sin \frac{\delta}{2}; \quad (153)$$

$$b = \left( c + c' - \frac{l}{n} \right) \cos \frac{\delta}{2}. \quad (154)$$

В призмах прямого зрения (рис. 86, б) эквивалентное зеркало  $Q$  совмещено с падающим осевым лучом  $O$  ( $h=0$ ); величина базиса

$$b = a - \frac{l}{n}, \quad (155)$$

где  $a$  — длина призмы вдоль оптической оси.

Свои особенности имеют призмы, отклоняющие осевой луч на угол  $\delta=180^\circ$  (рис. 86, в) или  $\delta=0^\circ$  (рис. 86, г), одновременно смещающая его на расстояние  $b$ . Эквивалентное зеркало  $Q$  располагается параллельно входной и выходной граням призмы на расстоянии

$$e = \frac{l}{2n} \quad (156)$$

от этих граней, причем у призмы с углом  $\delta=0^\circ$  зеркало имеет разрыв. Базис эквивалентного зеркала равен расстоянию  $b$  между падающим на призму и выходящим из нее осевыми лучами.

**Эквивалентное угловое зеркало.** Призмы с четным числом отражающих граней в параллельных пучках лучей эквивалентны дейст-



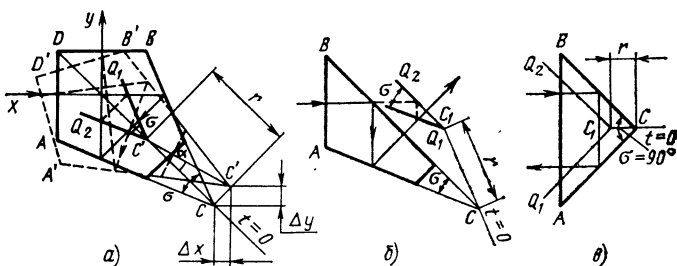


Рис. 87. Призмы, эквивалентные угловому зеркалу

вию углового зеркала, а в сходящихся пучках лучей — сочетанию углового зеркала с перпендикулярным его ребру зеркальным ромбом.

Если в призмах все отражающие грани расположены перпендикулярно плоскости главного сечения, то в сходящихся пучках лучей они приводятся к одному угловому зеркалу. В последнем случае наибольшее распространение получили простейшие призмы с двумя отражениями. Определим для этих призм положение ребра углового эквивалентного зеркала, обладающего тем свойством, что поворот призмы вокруг него на малый угол не вызывает сдвига изображения и выходящего луча.

Очевидно, угловое зеркало  $ACB$  (рис. 87, а), образованное отражающими гранями призмы, и эквивалентное зеркало  $Q_1C_1Q_2$  имеют равные двугранные углы  $\sigma$ , а также общую плоскость главного сечения и общую особую прямую  $t=0$ , которая проходит через ребро  $C$  перпендикулярно биссектрисе угла между падающим и выходящим лучами (см. гл. II, п. 13).

При повороте призмы вокруг ребра  $C_1$  на малый угол  $\alpha$  против часовой стрелки координаты ребра  $C$  получают приращения:

$$\Delta x = r\alpha \cos \sigma;$$

$$\Delta y = r\alpha \sin \sigma,$$

вызывающие поперечный сдвиг выходящего луча вправо на расстояние  $t$ . Подставляя в формулу (196) значения  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , получим

$$t = (2r \sin \sigma) \alpha. \quad (157)$$

В результате такого же поворота развертки призмы (плоскопараллельной пластинки толщиной  $l$ ) выходящий луч сдвинется влево на расстояние [30]

$$z = \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) l \sin \alpha.$$

Принимая во внимание малый угол поворота развертки, получим

$$z = \frac{n-1}{n} l \alpha. \quad (158)$$

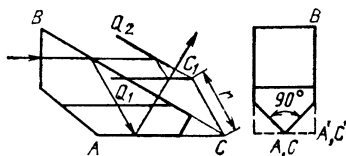


Рис. 88. Призма, эквивалентная тройному зеркалу

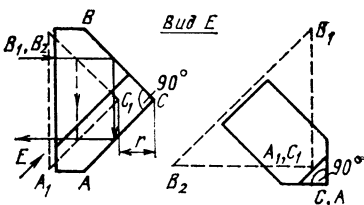


Рис. 89. Призма, эквивалентная зеркальному прямоугольному триэдру

Приравнивая друг другу оба сдвига  $t$  и  $z$ , найдем расстояние от вершины  $C$  двугранного угла  $\sigma$  призмы до ребра  $C_1$  эквивалентного углового зеркала:

$$r = \frac{(n-1)l}{2n \sin \sigma}, \quad (159)$$

где  $n$  — показатель преломления стекла призмы. Расстояние откладывается вдоль прямой  $t=0$ .

В призме, показанной на рис. 87, б, ребро эквивалентного зеркала располагается вне контура сечения призмы, а в прямоугольной призме, показанной на рис. 87, в, — лежит на биссектрисе двугранного угла  $\sigma$  призмы. Приведение к угловому зеркалу более сложных зеркально-призменных систем с четным числом отражений и пространственным расположением граней можно найти в книгах [19, 20].

**Эквивалентное тройное зеркало и зеркальный прямоугольный триэдр.** Из призм с нечетным числом отражений широко применяют призмы с тремя отражающими гранями, две из которых образуют крышу и расположены под одинаковыми углами к третьей отражающей грани (рис. 88). Их получают заменой на крышу одной отражающей грани в исходной призме с двумя отражениями.

В сходящихся пучках лучей эти призмы приводятся к тройному зеркалу, плоскости которого расположены параллельно отражающим граням. Общая точка пересечения зеркал — центр тройного зеркала  $C_1$  находится в точке пересечения ребра углового зеркала  $Q_1C_1Q_2$ , эквивалентного исходной призме двойного отражения  $ACB$ , с плоскостью главного сечения. Местоположение ребра эквивалентного углового зеркала находят по способу, указанному в предыдущем разделе.

Призмы с крышей и тремя отражениями, как и тройное зеркало, в сходящихся пучках лучей имеют только одну недейственную подвижку — поворот вокруг оси, проходящей через центр зеркала  $C_1$  перпендикулярно главному сечению.

В параллельных пучках лучей рассматриваемые призмы приводятся к угловому зеркалу, ребро которого направлено также перпендикулярно главному сечению.

Частным случаем является так называемая трипельпризма  $ACB$ , образованная из прямоугольной исходной призмы с двумя отражениями (рис. 89). Она приводится в сходящихся и параллельных пучках лучей к зеркальному прямоугольному триэдру

$A_1B_1B_2C_1$ . В сходящихся пучках лучей недейственными подвижками трипелъпризмы являются любые повороты вокруг центра  $C_1$  эквивалентного триэдра, а в параллельных пучках лучей недейственными будут все подвижки. Положение центра триэдра определяют также, как положение центра тройного зеркала.

## 12. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛОВ ПРИЗМ НА ОТКЛОНЕНИЕ ЛУЧЕЙ И КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Результаты настоящего исследования используют при вычислении допустимых погрешностей в углах призм и при разработке способов юстировки призм и призмённых систем. Погрешности изготовления углов призмы нарушают условие ее развертывания в плоскопараллельную пластинку, вызывают клиновидность развертки и отклонение выходящего пучка лучей. Угол отклонения определяется его проекциями на плоскость главного сечения и на перпендикулярную сечению плоскость, проходящую через падающий луч. Составляющие углы отклонения и составляющие клиновидности развертки рассматривают как самостоятельные погрешности.

**Погрешности изготовления углов призмы в главном сечении.** Погрешности углов призмы в плоскости главного сечения вызывают отклонение лучей в той же плоскости. Общий способ выявления действия этих погрешностей на ход лучей рассмотрим на примере равнобедренной призмы прямого зрения.

Призма, изображенная на рис. 90 вместе с разверткой, изготовлена с погрешностями углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Контур призмы с номинальными значениями углов и ход луча в ней показаны штриховыми линиями. Действительная величина угла  $\alpha_i$  между гранями

$$\alpha_i = \alpha_{oi} = \Delta\alpha_i, \quad (160)$$

где  $\alpha_{oi}$  — номинальный угол;  $\Delta\alpha_i$  — погрешность угла.

Определим клиновидность  $\theta_c$  развертки призмы в главном сечении. Из рис. 90 следует, что в каждой части развертки на кли-

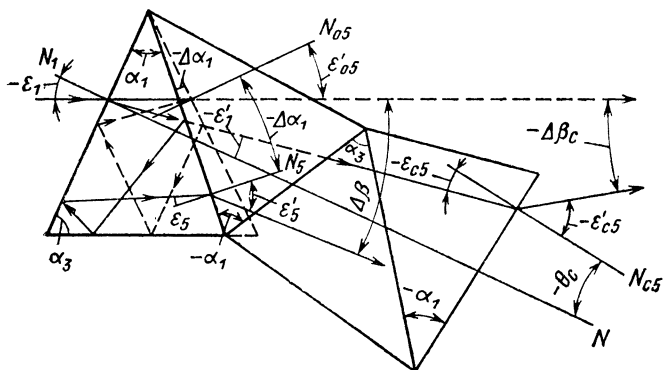


Рис. 90. Развертка равнобедренной призмы прямого зрения

новидность влияет только один угол: в первой части по ходу луча — угол  $\alpha_1$ , в последующих — соответственно  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и вновь  $\alpha_1$ . Условимся, что эти углы положительны, если они находятся выше луча, проходящего через развертку, и отрицательны при их расположении ниже луча. Тогда

$$\theta_c = \sum_1^4 \alpha_i = \alpha_3 - \alpha_2.$$

Подставляя значение углов  $\alpha_i$  из равенства (160) и учитывая, что  $\alpha_{03} - \alpha_{02} = 0$ , получим

$$\theta_c = \Delta\alpha_3 - \Delta\alpha_2. \quad (161)$$

Для призм с любым числом отражающих и преломляющих граней по аналогии запишем

$$\theta_c = \sum_1^k \alpha_i = \sum_1^k \Delta\alpha_i, \quad (162)$$

где  $k$  — число частей развертки.

Клин, образованный разверткой призмы, отклоняет луч на угол

$$\Delta\beta_c = \theta_c \left( n \frac{\cos \epsilon'_1}{\cos \epsilon_1} - 1 \right), \quad (163)$$

а при нормальном падении луча на первую грань — на угол

$$\Delta\beta_c = \theta_c (n - 1), \quad (164)$$

где  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon'_1$  — углы падения и преломления луча на первой грани;  $n$  — показатель преломления.

Угол отклонения луча  $\Delta\beta$ , вызываемый погрешностями изготовления углов призмы в главном сечении, отличается от угла  $\Delta\beta_c$  и может быть найден следующим образом.

На рис. 90 определяем

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \epsilon'_5 - \epsilon'_{05} - \Delta\alpha_1; & \epsilon'_5 &= -\epsilon'_{c5}; \\ \epsilon'_{05} &= -\epsilon_1; & \epsilon_{c5} &= \theta_c + \epsilon'_1. \end{aligned}$$

Выполнив подстановку, получим

$$\Delta\beta = -\epsilon'_{c5} + \epsilon_1 - \Delta\alpha_1. \quad (165)$$

На основании закона преломления запишем для малых углов

$$\sin \epsilon'_{cp} = \sin \epsilon'_{c5} = n \sin (\theta_c + \epsilon'_1) = \theta_c \sqrt{n^2 - \sin^2 \epsilon_1} + \sin \epsilon_1, \quad (166)$$

где  $\epsilon'_{cp}$  — угол преломления луча на выходе из развертки призмы;  $\epsilon_1$  — угол падения луча на входную грань.

Для лучей с углом  $\epsilon_1 = 0$  получим

$$\epsilon'_{cp} = n\theta_c. \quad (167)$$

Формулы (166) и (167) справедливы при расчете призм с любым числом рабочих граней.

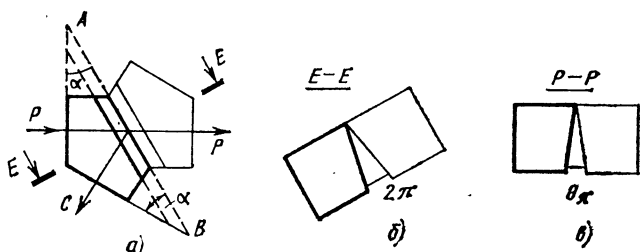


Рис. 91. Пирамидальность призмы с одним отражением:  
 а — развертка в главном сечении; б — сечение  $E-E$ ; в — клиновидность  
 развертки в плоскости  $P-P$

Решая совместно равенства (165) и (166), найдем

$$\Delta\beta = -\arcsin(\theta_c \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon_1} + \sin \varepsilon_1) + \varepsilon_1 - \Delta\alpha_1. \quad (168)$$

Следовательно, в отличие от угла отклонения  $\Delta\beta_c$ , величина которого зависит от клиновидности развертки, угол отклонения луча  $\Delta\beta$  зависит еще от погрешности угла между входной и выходной гранями призмы.

**Пирамидальность.** У реальной призмы кроме погрешностей углов главного сечения имеются погрешности параллельности ребер, образованных пересечением смежных рабочих граней, т. е. имеется так называемая пирамидальность. Рассмотрим призму с одним отражением, у которой ребро  $C$  расположено перпендикулярно плоскости главного сечения, а ребра  $A$  и  $B$  не параллельны ребру  $C$  (рис. 91, а). Штриховыми линиями показаны ненужные части призмы, которые могут быть срезаны. Пирамидальность в данном случае измеряется углом  $\pi$  между ребром  $C$  и противоположащей гранью  $AB$  (рис. 91, б). Вследствие пирамидальности возникает клиновидность развертки  $\theta_\pi$ , которая определяется проекцией двойного угла пирамидальности  $2\pi$  на плоскость  $PP$ , перпендикулярную главному сечению и проходящую через падающий на призму луч (рис. 91, в).

Для малых углов  $\pi$  и  $\theta_\pi$  получим

$$\theta_\pi = 2\pi \cos \alpha. \quad (169)$$

Пирамидальность призмы вызывает отклонение луча в плоскости  $PP$ . Угол отклонения  $\Delta\lambda'$  вычисляются последовательным применением инварианта пирамидальности [31] к каждой преломляющей и отражающей поверхности призмы:

$$\Delta\lambda' = \frac{n}{n'} \Delta\lambda - \frac{n \cos \varepsilon_0 - n' \cos \varepsilon'_0}{n'} \delta, \quad (170)$$

где  $n, n'$  — показатель преломления первой и второй по ходу луча среды;  $\Delta\lambda, \delta$  — угол отклонения от плоскости главного сечения падающего луча и нормали к преломляющей (отражающей) поверхности;  $\varepsilon_0, \varepsilon'_0$  — углы падения и преломления (отражения) при отсутствии погрешностей углов призмы.

Знак углов  $\Delta\lambda, \Delta\lambda', \delta$  определяется по направлению отклонения луча (его продолжения) и нормали за данной поверхностью. Если

Отклонение луча в призме с одним отражением (рис. 91)

Номер поверх- ности	$\varepsilon_0$	$\varepsilon'_0$	$n$	$n'$	$\delta$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda''$
1	0	0	1	$n$	$\delta_1$	0	$\frac{(n-1)\delta_1}{n}$
2	$\alpha$	$\alpha$	$n$	$-n$	$\delta_2$	$\frac{(n-1)\delta_1}{n}$	$-\frac{(n-1)\delta_1}{n} + 2\cos\alpha\delta_2$
3	0	0	$n$	1	$\delta_3$	$\frac{(n-1)\delta_1}{n} - 2\cos\alpha\delta_2$	$(n-1)(\delta_1 - \delta_3) - 2n\cos\alpha\delta_2$

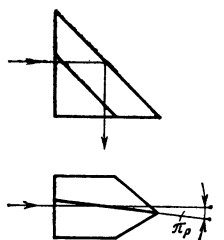


Рис. 92. Прямоугольная призма с крышей

Угол  $\Delta\lambda'$  для последней поверхности — искомый угол отклонения луча от плоскости главного сечения вследствие пирамидальности призмы.

Применим инвариант (170) к призме с одним отражением, полагая, что пирамидальность нарушает перпендикулярность ребер  $A$ ,  $B$ ,  $C$  главному сечению. Исходные данные и результаты расчета угла отклонения для каждой поверхности приведены в табл. 1.

Без ущерба для общности решения можно расположить плоскость главного сечения перпендикулярно ребру  $C$ . Тогда  $\delta_1 = \delta_3 = 0$ ,  $\delta_2 = \pi$ , а угол отклонения луча призмой

$$\Delta\lambda' = -2n\pi \cos \alpha. \quad (171)$$

Пирамидальность призмы кроме отклонения лучей вызывает также поворот изображения вокруг осевого луча на угол [32]

$$\Delta\gamma = 2\pi \sin \alpha. \quad (172)$$

Погрешности изготовления углов крыши, хроматизм, кома и дисторсия. В призмах с крышей клиновидность развертки в плоскости, перпендикулярной главному сечению, возникает вследствие разворота ребра крыши на угол  $\pi_p$  (рис. 92). Этот разворот вызывает отклонение осевого луча из плоскости чертежа на угол

$$\Delta\lambda' = 2n\pi_p \sin \varepsilon \quad (173)$$

и поворот изображения вокруг осевого луча на угол

$$\Delta\gamma = 2\pi_p \cos \varepsilon, \quad (174)$$

где  $\varepsilon$  — угол падения осевого луча на ребро крыши.

Погрешности изготовления прямого угла между гранями крыши  $\Delta_k$  приводят к тому, что осевой элементарный пучок лучей после призмы расходится на два пучка, образующих между собой угол,

$$q = 4n\Delta_k \cos \varepsilon. \quad (175)$$

В поле зрения оптической системы появятся два изображения, смещенных друг относительно друга на угловое расстояние  $q$ , которое определяет величину двоения изображения.

Клиновидность развертки призмы

$$\theta = \sqrt{\theta_{c_i}^2 + \theta_{\pi}^2} \quad (176)$$

они отклоняются вверх из плоскости главного сечения, совпадающей с плоскостью рис. 91, соответствующие углы будут положительными, а при отклонении вниз — отрицательными.

Знак углов  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0'$  не оказывает влияния на результаты вычислений, так как инвариант (170) содержит только косинусы этих углов.

Для отражающих поверхностей полагают  $n' = -n$ .

При переходе от преломляющей поверхности к следующей принимают:  $\Delta\lambda'$  преломляющей равно  $\Delta\lambda$  следующей, а при переходе от отражающей поверхности  $\Delta\lambda'$  отражающей равно  $-\Delta\lambda$  следующей.

вызывает хроматизм, величину которого для видимой области спектра находят по формуле

$$\Delta\delta_{FC} = \frac{\theta}{v} (n - 1), \quad (177)$$

где  $v$  — коэффициент дисперсии.

При размещении призмы в сходящихся пучках лучей клиновидность ее развертки вызывает в плоскости изображения поперечную кому [26]:

$$\Delta l_K = -\frac{3}{2} \theta \frac{n^2 - 1}{n} \rho (\sigma'_{A'})^2, \quad (178)$$

где  $\rho$  — расстояние по осевому лучу от клина до плоскости изображения;  $\sigma'_{A'}$  — апертурный угол пучка лучей.

В параллельных пучках лучей вследствие клиновидности  $\theta$  возникает дисторсия изображения. Луч, падающий под углом  $\epsilon$ , при выходе из призмы отклоняется вследствие дисторсии от общего направления на угол [26]

$$\Delta\psi = \frac{n^2 - 1}{2n} \epsilon \theta. \quad (179)$$

### 13. ДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖЕК ПРИЗМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Результаты анализа действия подвижек призм и их компонентов используют при решении юстировочных задач и при вычислении допустимых погрешностей расположения компонентов составных призм относительно друг друга. Рассмотрим действие подвижек простейших зеркальных систем, к которым приводятся призмы. На основе полученных данных в гл. III, пп. 3, 4 исследованы составные призмы.

**Вращение зеркала в параллельных пучках лучей.** Поступательные смещения зеркально-призменных систем в параллельных пучках лучей не влияют на положение изображения в поле зрения оптической системы, так как при этом углы падения и отражения лучей сохраняют свою величину. Эти смещения могут вызвать только виньетирование пропускаемых световых пучков.

При повороте зеркала на угол  $\omega$  вокруг оси, перпендикулярной падающему пучку лучей и параллельной плоскости зеркала, отраженные лучи повернутся в том же направлении на двойной угол:

$$\gamma = 2\omega. \quad (180)$$

Рассмотрим действие вращающегося зеркала, когда его ось вращения  $AA_1$  (рис. 93) образует угол  $\alpha$  с направлением падающего пучка лучей и угол  $\beta$  с плоскостью зеркала  $Q$ . В практике юстировки оптических приборов этот случай наблюдается у зеркально-призменных систем прямого зрения, вращающих изображение или компенсирующих его поворот. При юстировке стремятся исключить смещения центра вращающегося изображения сведением углов  $\alpha$  и  $\beta$  к нулю. Юстировочные погрешности — углы  $\alpha$  и  $\beta$  — малы по величине, поэтому можно не рассматривать действие вращающегося зеркала в общем виде, а ограничиться случаем, когда углы между



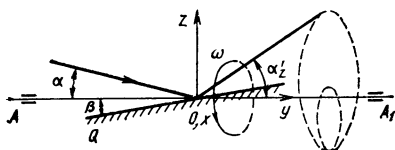


Рис. 93. Отражение луча при вращении зеркала вокруг оси, лежащей в плоскости рисунка

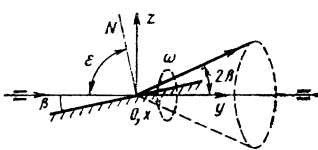


Рис. 94. Отражение луча от вращающегося зеркала при совмещении падающего луча с осью вращения

осью вращения, падающим пучком и плоскостью зеркала незначительны.

Построим кординатную систему  $xyz$ , у которой ось  $y$  направим по оси вращения, а начало координат совместим с точкой пересечения оси вращения с зеркалом. Положение отраженного луча в зависимости от угла поворота зеркала  $\omega$  при малых углах  $\alpha$  и  $\beta$  определится из выражений [19]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_x &= \alpha \sin 2\omega + 2\beta \sin \omega; \\ \alpha'_z &= \alpha \cos 2\omega + 2\beta \cos \omega; \end{aligned} \right\} \quad (181)$$

где  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_z$  — углы между осью  $y$  и проекциями отраженного луча на плоскости  $yOx$  и  $yOz$ .

Характер движения лучей отраженного пучка удобно проследить по лучу, проходящему через начало координат. При наличии юстировочных погрешностей  $\alpha$ ,  $\beta$  и прохождении падающего луча через начало координат отраженный луч описывает сложную коническую поверхность с вершиной в точке  $O$ . Согласно выражениям (181) за один оборот зеркала отраженный луч повернется на два оборота.

Если падающий луч совпадает с осью вращения ( $\alpha=0$ ), то отраженный луч опишет круговой конус с углом при вершине  $4\beta$  (рис. 94), а скорость вращения луча будет равна скорости вращения зеркала. Это следует из выражений (181), которые примут вид

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_x &= 2\beta \sin \omega; \\ \alpha'_z &= 2\beta \cos \omega. \end{aligned} \right\} \quad (182)$$

В случае, когда плоскость зеркала совпадает с осью вращения ( $\beta=0$ ), а падающий луч направлен к зеркалу под углом  $\alpha$  (рис. 95), отраженный луч также опишет круговой конус, но угол при его вершине составит величину  $2\alpha$ , а скорость вращения луча будет в 2 раза больше скорости вращения зеркала. Действительно, из выражения (181) получим

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_x &= \alpha \sin 2\omega; \\ \alpha'_z &= \alpha \cos 2\omega. \end{aligned} \right\} \quad (183)$$

Таким образом, повороты плоского зеркала вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, параллельных его плоскости в исходном

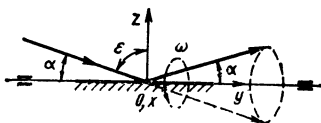


Рис. 95. Отражение луча от вращающегося зеркала при совмещении оси вращения с плоскостью зеркала

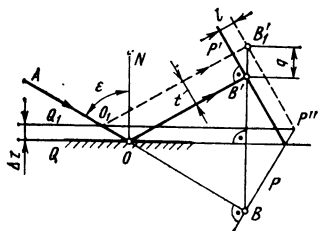


Рис. 96. Отражение луча при смещении зеркала вдоль нормали

положении, являются действительными подвижками. Вращение зеркала вокруг оси, перпендикулярной его плоскости, будет недействительным.

**Смещения и вращение зеркала в сходящихся пучках лучей.** Совместим экран с изображением  $P'$  предметной плоскости  $P$  (рис. 96). Условимся, что луч  $AO$ , идущий перпендикулярно плоскости  $P$ , является главным лучом светового пучка, который строит изображение  $B'$  точки предмета  $B$ . Сместим зеркало вдоль нормали  $ON$  из исходного положения  $Q$  в положение  $Q_1$  на величину  $\Delta z$ . Построив ход отраженного луча  $O_1B'_1$ , получим изображение в точке  $B'_1$ , которое лежит на одной нормали с изображением  $B'$  и смещено относительно него на удвоенную величину сдвига зеркала, т. е.  $q = 2\Delta z$ .

Проекция отрезка  $q$  на плоскость экрана определяет поперечный сдвиг изображения

$$t = 2\Delta z \sin \varepsilon, \quad (184)$$

а его проекция на отраженный луч дает величину расфокусировки изображения

$$l = 2\Delta z \cos \varepsilon. \quad (185)$$

С увеличением угла падения  $\varepsilon$  величина поперечного сдвига изображения возрастает, а величина расфокусировки уменьшается.

Таким образом, в сходящихся пучках лучей смещение зеркала в направлении его нормали вызывает расфокусировку и сдвиг изображения. Смещение зеркала вдоль отражающей плоскости не влияет на ход отраженных лучей.

Рассмотрим влияние поворота зеркала  $Q$  вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка (рис. 97), на котором экран совмещен с плоскостью изображений  $P'$ , а лучи  $ED$  и  $EC$  — главные лучи световых пучков, строящих изображения  $A'$ ,  $B'$  точек предмета  $A$ ,  $B$ .

Поворот зеркала  $Q$  на угол  $\omega$  по аналогии с действием зеркала в параллельных пучках вызовет поворот отраженных лучей, а следовательно, и плоскости изображения на угол  $2\omega$ . Повернутое зеркало и плоскость изображений обозначены буквами  $Q_1$  и  $P''$ . Изображение отрезка  $AB$  займет на экране положение  $A''_1B''_1$ , сдвинутое относительно своего первоначального положения  $A'B'$ . Очевидно, что  $A'B' = A'_1B'_1 \neq A''_1B''_1$ .

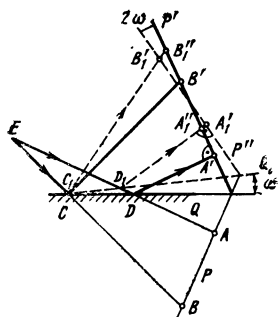


Рис. 97. Отражение сходящихся пучков лучей при повороте зеркала вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка

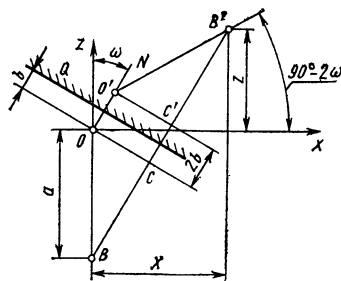


Рис. 98. Вращение зеркала вокруг оси, параллельной его плоскости

Следовательно, при повороте зеркала сдвиг изображения сопровождается его искажением в направлении сдвига. Кроме того, будет наблюдаться расфокусировка неодинаковой величины для разных точек изображения. Расфокусировка точек  $A''_1$  и  $B''_1$  определяется величиной отрезков  $A''_1A'_1$  и  $B''_1B'_1$ , причем  $A''_1A'_1 \neq B''_1B'_1$ . Точки, расположенные на линии пересечения экрана с плоскостью изображения, не имеют расфокусировки.

В общем случае ось вращения может располагаться под углом к плоскости зеркала. Так же, как при анализе действия в параллельных пучках лучей, ограничимся рассмотрением важного для практики случая, когда угол между осью и зеркалом мал. К такому зеркалу приводятся вращающиеся призмы прямого зрения.

Пренебрегая погрешностями второго порядка малости, можем допустить, что ось вращения  $O$  параллельна плоскости зеркала  $Q$  и направлена перпендикулярно плоскости изображений  $xOz$  (рис. 98). Угол нормали  $N$  зеркала с осью  $z$  обозначим через  $\omega$ , а расстояние от оси вращения до зеркала — через  $b$ . На оси  $z$  выберем предметную точку  $B$  на расстоянии  $a$  от начала координат  $O$ . Построим изображения  $B'$ ,  $O'$  этих точек.

Пользуясь равенством треугольников  $OBC$  и  $O'B'C'$ , найдем координаты  $x$ ,  $z$ , определяющие положение точки изображения  $B'$  в зависимости от угла поворота зеркала  $\omega$  и величины смещения  $b$  оси вращения относительно зеркала:

$$\left. \begin{aligned} x &= a \sin 2\omega + 2b \sin \omega; \\ z &= a \cos 2\omega + 2b \cos \omega. \end{aligned} \right\} \quad (186)$$

Таким образом, при вращении зеркала вокруг оси, параллельной его плоскости, путь, проходимый изображением произвольной точки предмета, определяется как геометрическая сумма двух путей. Первый путь представляет собой окружность, которую изображение точки пробегает дважды за один оборот зеркала; радиус  $a$  окружности равен расстоянию от произвольно выбранной точки до оси вращения. Второй путь также представляет собой окружность, но проходимую за один оборот зеркала один раз при радиусе  $2b$ , равном удвоенному расстоянию от плоскости зеркала до оси вра-

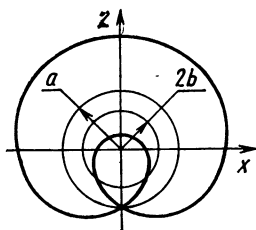


Рис. 99. Траектория перемещения изображения точки при вращении зеркала вокруг оси, параллельной его плоскости и перпендикулярной плоскости изображений

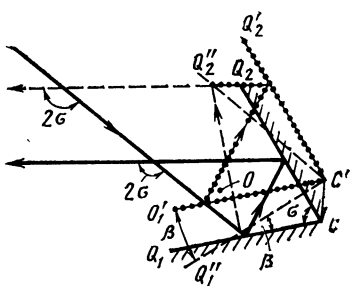


Рис. 100. Отражение луча при повороте углового зеркала вокруг оси, параллельной его ребру

нения. В результате точка изображения  $B'$  опишет кардиоиду (рис. 99).

**Повороты углового зеркала в параллельных пучках лучей.** При отражении от углового зеркала луч, проходящий в плоскости его главного сечения, отклоняется на угол

$$\delta = 2\sigma, \quad (187)$$

где  $\sigma$  — угол между зеркалами.

В общем случае угловое зеркало дает два полностью обращенных пространства изображений, не совпадающих друг с другом. Если угол между зеркалами равен  $90^\circ$ , оба пространства сольются.

Положение ребра углового зеркала вполне определяет положение отраженных лучей и пространства изображений независимо от углов падения лучей. При повороте зеркала вокруг его ребра пространство изображений остается неподвижным, т. е. такой поворот будет недействительным в параллельных и в сходящихся пучках лучей.

Поворот углового зеркала  $Q_1CQ_2$  (рис. 100) вокруг любой оси  $O$ , параллельной его ребру, является также недействительным, так как его можно разложить на две последовательные недействительные подвижки: поступательное перемещение зеркала на расстояние  $CC'$  (положение  $Q'_1C'Q'_2$ ) и его поворот вокруг ребра  $C$  (положение  $Q''_1C'Q'_2$ ).

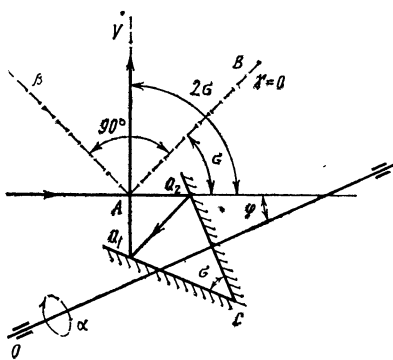


Рис. 101. Поворот углового зеркала в параллельных пучках лучей вокруг оси, перпендикулярной его ребру

Если повернуть угловое зеркало  $Q_1CQ_2$  (рис. 101) на малый угол  $\alpha$  вокруг оси  $O$ , перпендикулярной его ребру  $C$  и составляющей угол  $\varphi$  с падающим лучом, то в общем случае это вызовет отклонение отраженного луча в плоскости  $V$ , параллельной ребру  $V$  его исходном положении, на угол [19]

$$\beta \approx -2\alpha \sin \sigma \cos (\sigma - \varphi) \quad (188)$$

и наклон изображения в поле зрения оптической системы на угол

$$\gamma \approx -2\alpha \sin \sigma \sin (\sigma - \varphi). \quad (189)$$

Кроме того, луч отклонится на величину второго порядка малости в главной плоскости зеркала.

Из выражений (188), (189) следует, что при  $\varphi = \sigma$ , т. е. когда ось вращения  $O$  направлена параллельно биссектрисе  $AB$  угла между падающим и выходящим лучами, угол отклонения луча достигнет наибольшей величины:

$$\beta_{\max} = 2\alpha \sin \sigma, \quad (190)$$

а угол поворота изображения  $\gamma = 0$ .

Если ось вращения  $O$  перпендикулярна биссектрисе  $AB$ , т. е.  $\varphi = 90^\circ + \sigma$ , угол поворота изображения будет максимальным:

$$\gamma_{\max} = 2\alpha \sin \sigma, \quad (191)$$

и угол  $\beta = 0$ .

**Смещения и повороты углового зеркала в сходящихся пучках лучей.** При поступательном сдвиге углового зеркала все точки пространства изображений смещаются так, что взаимоположение точек остается неизменным, т. е. пространство изображений смещается как единое целое. Величина смещения одной точки пространства изображений характеризует смещение всех точек этого пространства.

Положим, что точка предмета  $B$  (рис. 102, а) находится на ребре  $C$  углового зеркала  $Q_1CQ_2$ . Тогда изображение  $B''$  этой точки в угловом зеркале совпадает с точкой предмета  $B$ . Луч  $A$ , расположенный в главном сечении зеркала, является главным лучом осевого светового пучка, который дает изображение  $B''$  точки предмета  $B$ . Экран  $P''$  установлен перпендикулярно отраженному лучу и совмещен с изображением плоскости предметов  $P$ . Такое расположение точки предмета и экрана упрощает определение интересующих нас зависимостей и не влияет на их общность.

Сместим угловое зеркало вдоль луча  $A$  на расстояние  $\Delta x$  в положение  $Q'_1C'Q'_2$ . Изображение точки предмета  $B$  переместится в точку  $B''_1$ , которая лежит на дуге окружности, проведенной из точки  $C'$  радиусом  $C'B$ , под углом  $2\sigma$  к падающему лучу. Отраженный луч  $A''_1$  сдвинется относительно своего исходного положения  $A''$  на расстояние  $t_x$ , определяющее сдвиг изображения, а плоскость изображений сместится вдоль отраженного луча в положение  $P''_1$  на величину расфокусировки изображения  $l_x$ .

Рассматривая треугольник  $CC'D$ , получим

$$t_x = \Delta x \sin 2\sigma; \quad (192)$$

$$l_x = \Delta x + CD = 2\Delta x \sin^2 \sigma. \quad (193)$$

На рис. 102, б показаны два положения углового зеркала —  $Q_1CQ_2$  и  $Q'_1C'Q'_2$  — до и после его сдвига в направлении, перпендикулярном падающему лучу  $A$ . Расположение точки предмета  $B$  и экрана  $P''$  такое же, как и на рис. 102, а.

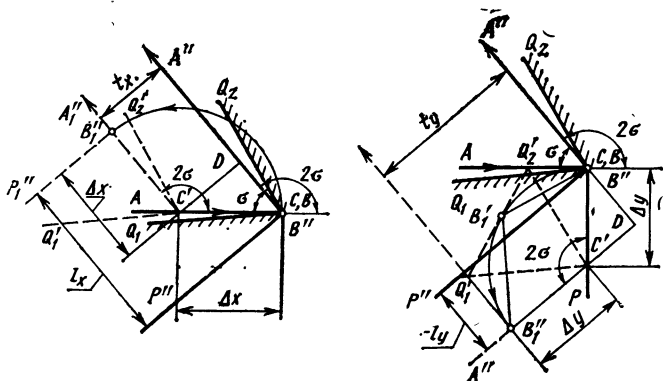


Рис. 102. Отражение луча при смещениях углового зеркала в направлениях:

*a* — вдоль падающего луча; *b* — перпендикулярно падающему лучу

После сдвига зеркала изображение точки предмета *B* сместится в точку *B'*, а плоскость изображений займет положение *P'*. Величина сдвига изображения обозначена через  $t_y$ , а величина расфокусировки — через  $l_y$ . Знак минус перед  $l_y$  показывает, что в данном случае получается расфокусировка обратного направления — от наблюдателя.

Рассматривая треугольник *CC'D* (см. рис. 102, б) получим

$$t_y = \Delta y + C'D = 2\Delta y \sin^2 \sigma; \quad (194)$$

$$l_y = -\Delta y \sin 2\sigma. \quad (195)$$

В общем случае угловое зеркало может быть сдвинуто одновременно вдоль и поперек падающего луча, например вдоль линии *C'C* (рис. 103), образующей угол  $\varphi$  с падающим лучом *A*. Новое положение ребра обозначено через *C'*. Тогда суммарная величина поперечного сдвига изображения

$$t = t_x + t_y = 2 \sin \sigma (\Delta x \cos \sigma + \Delta y \sin \sigma), \quad (196)$$

а суммарная величина расфокусировки изображения

$$l = l_x + l_y = 2 \sin \sigma (\Delta x \sin \sigma - \Delta y \cos \sigma). \quad (197)$$

Приравняв к нулю выражения (196) и (197), найдем особые плоскости, проходящие через ребро углового зеркала и обладающие тем свойством, что при смещении ребра зеркала в одной из них не возникает поперечного сдвига отраженного луча ( $t=0$ ), а при смещении в другой — расфокусировки изображения ( $l=0$ ).

Принимая  $t=0$ , получим

$$\operatorname{ctg} \varphi = -\operatorname{tg} \sigma = \operatorname{ctg} (90^\circ + \sigma);$$

$$\varphi = 90^\circ + \sigma.$$

Равенство  $l=0$  дает

$$\operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{ctg} \sigma; \quad \varphi = \sigma.$$

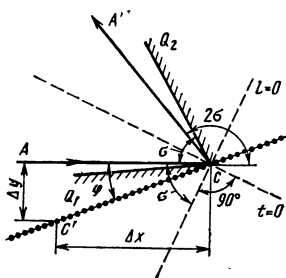


Рис. 103. Смещение углового зеркала в произвольном направлении

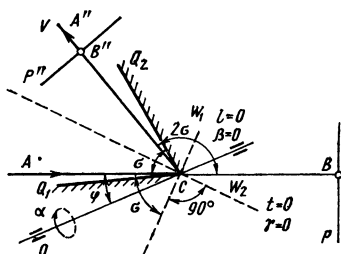


Рис. 104. Поворот углового зеркала в сходящихся пучках лучей вокруг оси, перпендикулярной его ребру

На рис. 103 следы особых плоскостей показаны штриховыми линиями. Плоскость  $l=0$  совпадает с биссектрисной плоскостью угла  $2\sigma$ , образованного падающим и отраженным лучами. Плоскость  $t=0$  составляет прямой угол с плоскостью  $l=0$ .

Смещение углового зеркала вдоль его ребра не вызовет смещения и поворота пространства изображений и будет недейственной подвижкой.

Пусть в главном сечении углового зеркала  $Q_1CQ_2$  (рис. 104) проходит осевой луч  $AC$  светового пучка, сходящегося в мнимой точке  $B$ . Экран  $P''$  совмещен с изображением предметной плоскости  $P$  и изображением  $B''$  точки  $B$ .

Повернем угловое зеркало на малый угол  $\alpha$  вокруг оси  $O$ , перпендикулярной ребру  $C$  и образующей с падающим лучом  $A$  угол  $\varphi$ . Тогда, как и в случае расположения зеркала в параллельных пучках лучей, изображение повернется на угол  $\gamma$ , величину которого определяются, используя выражение (189). Отраженный луч  $A''$  отклонится в плоскости  $V$ , проходящей через ребро  $C$  в его исходном положении, на угол  $\beta$ , величину которого определяют из выражения (188). Изображение  $B''$  сместится в той же плоскости по дуге с радиусом  $CB''$ , а плоскость изображения повернется относительно экрана  $P''$  на угол  $\beta$ . Вследствие этого в поле будет наблюдаться расфокусировка изображения переменной величины.

Если ось вращения  $O$  будет направлена по биссектрисе угла  $2\sigma$  между падающим и отраженным лучами  $A$  и  $A''$ , то при малых наклонах зеркала произойдут расфокусировка изображения и его сдвиг на максимальную величину без поворота, т. е.  $\gamma=0$ . Наклон зеркала вокруг оси, направленный перпендикулярно биссектрисе угла  $2\sigma$ , вызывает максимальный поворот изображения при отсутствии расфокусировки и сдвига, т. е.  $\beta=0$ .

Обобщая, можно сказать, что при любых сдвигах для малых наклонов углового зеркала в сходящихся пучках лучей имеются две особые взаимно перпендикулярные плоскости  $W_1$  и  $W_2$ , проходящие через ребро зеркала. Плоскость  $W_1$ , проходящая через биссектрису угла между падающим и отраженным осевыми лучами, проходящими в главном сечении зеркала, отличается тем, что сдвиг ребра вдоль нее и его наклон в той же плоскости на малый угол не вызывают

расфокусировки и сдвига изображения. Плоскость  $W_2$  отличается тем, что смещение ребра вдоль нее и его наклон на малый угол не вызывают поперечного сдвига и поворота изображения.

Как отмечалось выше, поворот углового зеркала вокруг его ребра является недействительной подвижкой как в параллельных, в сходящихся пучках лучей.

**Смещение и повороты зеркального ромба.** Особенностью зеркального ромба, состоящего из пары обращенных друг к другу параллельных зеркал, является то, что оно не изменяет направления проходящих через него лучей (рис. 105). Вследствие параллельности нормалей  $N_1$ ,  $N_2$  к зеркалам  $Q_1$ ,  $Q_2$  для любого луча можно записать

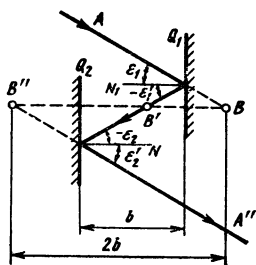


Рис. 105. Действие зеркального ромба в сходящихся пучках лучей

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1', \quad (198)$$

т. е. лучи падающий и отраженный всегда параллельны друг другу.

В параллельных пучках лучей любые смещения и повороты зеркального ромба не изменяют направления отраженных лучей и являются недействительными подвижками.

Рассмотрим действие зеркального ромба в сходящихся пучках лучей. Луч  $A$ , падающий на ромб  $Q_1$ ,  $Q_2$ , является главным лучом светового пучка, который сходится в мнимой точке  $B$ . Первое зеркало ромба  $Q_1$  дает изображение  $B'$  точки  $B$ . Для второго зеркала  $Q_2$  точка  $B'$  будет точкой предмета, изображение которой обозначено через  $B''$ . Из рис. 105 следует, что зеркальный ромб смещает изображение  $B''$  относительно точки предмета  $B$  вдоль перпендикуляра, опущенного из точки  $B$  на плоскости зеркал, на удвоенное расстояние между зеркалами, т. е.

$$BB'' = 2b. \quad (199)$$

Очевидно, величина смещения  $2b$  не зависит от угла падения лучей на зеркальный ромб.

Предположим, что на зеркальный ромб  $Q_1$ ,  $Q_2$  (рис. 106, а) падает пучок лучей, сходящийся в точке  $B$ . Главный луч пучка  $A$  совпадает с оптической осью системы и направлен перпендикулярно предметной плоскости  $P$ . Экран  $P''$  совмещен с изображением  $B''$  точки  $B$  и плоскостью изображений.

Повернем ромб на угол  $\alpha$  вокруг оси  $O_1$ , перпендикулярной его главному сечению. Тогда изображение  $B''$  сместится в точку  $B''_1$ , а плоскость изображения займет положение  $P''_1$ . По рис. 106, а определим сдвиг изображения в плоскости экрана:

$$l_1 = 4b \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\alpha}{2} \pm \varepsilon \right) \quad (200)$$

и расфокусировку изображения

$$l_1 = 4b \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\alpha}{2} \pm \varepsilon \right), \quad (201)$$



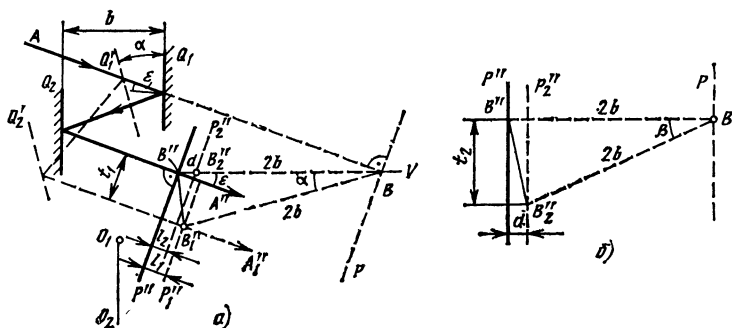


Рис. 106. Влияние поворотов зеркального ромба в сходящихся пучках лучей на положение изображения:

$a$  — поворот вокруг оси  $O_1$ , перпендикулярной плоскости рисунка;  $b$  — вид на плоскость  $V$  после поворота вокруг оси  $O_2$ , перпендикулярной оси  $O_1$

где  $\varepsilon$  — угол падения осевого луча. При повороте ромба против часовой стрелки в формулах (200), (201) принимается знак «+», при повороте ромба в обратную сторону — знак «—».

Если повернем ромб  $Q_1Q_2$  на угол  $\beta$  вокруг оси  $O_2$ , перпендикулярной оси  $O_1$  и параллельной плоскости зеркал, то плоскость изображений займет положение  $P''_2$  и будет параллельна экрану  $P''$ . Проведем через отрезок  $BB''$  плоскость  $V$ , перпендикулярную плоскости рис. 106,  $a$ , и покажем ее вид на рис. 106,  $b$ . Линии  $P$ ,  $P''$  и  $P''_2$  — следы плоскостей  $P$ ,  $P''$ ,  $P''_2$ , а точкой  $B''_2$  обозначено изображение точки  $B$ . В плоскости  $V$  изображение  $B''_2$  сместится на расстояние

$$d = 2b(1 - \cos \beta),$$

а относительно экрана — на расстояние

$$l_2 = 2b(1 - \cos \beta) \cos \varepsilon, \quad (202)$$

которое будет определять величину расфокусировки изображения.

Аналогично найдем сдвиг изображения

$$t_2 = 2b \sin \beta. \quad (203)$$

## Глава III

### РАСЧЕТ ПРИЗМ

#### 1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

При расчете отражательных призм находят размеры, определяющие их геометрическую форму (габаритный расчет), и допустимые погрешности изготовления. Считают известными зависимости, связывающие размеры призмы с величиной пропускаемого светового пучка, а также действие погрешностей изготовления на отклонение лучей и качество изображения.

Для габаритного расчета призмы нужно задать величину пропускаемого светового пучка и положение одной преломляющей грани. При пропускании конического пучка грань целесообразно располагать в наиболее узкой его части, что обеспечивает получение меньших размеров призмы. Не рекомендуется помещать грань в плоскости изображения, так как возможные дефекты поверхности грани будут отчетливо видны в поле зрения прибора. Если плоскость изображения рассматривается через окуляр с фокусным расстоянием  $f'_{ок}$ , то последнюю грань призмы желательно располагать на расстоянии  $t \geq 0,01 (f'_{ок})^2$  от этой плоскости.

Если задано положение грани относительно светового пучка, то будет известным и диаметр  $d$  сечения пучка этой гранью. В первом приближении предварительно выбирают конструкцию призмы и марку стекла, а в процессе расчета уточняют эти данные.

Способ габаритного расчета призмы определяют в зависимости от расположения эквивалентной плоскопараллельной пластинки относительно осевого луча (перпендикулярная или наклонная пластинка) и в зависимости от формы светового пучка (цилиндрический или конический пучок), для пропускания которого строят призму. Габаритный расчет призм, развертывающихся в перпендикулярную плоскопараллельную пластинку, производят двумя способами — для цилиндрического или для конического пучков лучей. Призмы, развертывающиеся в наклонную плоскопараллельную пластинку, многочисленны по конструктивным разновидностям и требуют индивидуального подхода при габаритном расчете.

После определения размеров призмы вычисляют допустимые погрешности ее изготовления, которые делят на три группы: 1) отклонение поверхностей граней от плоскостности; 2) погрешности углов между гранями; 3) погрешности взаимного расположения компонентов.

Методика расчета допустимых погрешностей изготовления плоских поверхностей изложена в работах М. Д. Мальцева [15] и Г. В. Погарева [20], поэтому рассмотрим только вторую и третью группы погрешностей.

Вследствие неточного изготовления углов развертка призмы приобретает клиновидность, которая вызывает дисторсию, кому, хроматизм, отклонение лучей пропускаемого пучка и поворот изображения. Дополнительное влияние на отклонение лучей оказывает погрешность угла между входной и выходной гранями. В призмах с разделением хода лучей погрешности изготовления углов вызывают двойное изображение.

Допустимые погрешности углов и допустимую клиновидность развертки определяют в плоскости главного сечения и в плоскости, перпендикулярной главному сечению. Эти составляющие рассматривают и контролируют как самостоятельные погрешности.

Погрешности взаимного расположения компонентов составных призм и призмённых систем ухудшают качество изображения, вызывают отклонение лучей и поворот изображения.

Проверка результатов исследования и расчета призмы может быть выполнена на ЭВМ по автоматической программе [20].

По сравнению с отражательными призмами преломляющие призмённые системы требуют другого подхода. При описании устройства систем в гл. I приведены формулы для расчета их конструктивных элементов. Способы расчета клиньев, безлинзовых телескопических и анаморфозных систем подробно изложены в работе [31].

В пп. 3—6 гл. III рассмотрены призмы для конического пучка лучей. Проведены комплексные исследования и расчет допустимых погрешностей изготовления составных призм, развертывающихся в перпендикулярную плоскопараллельную пластинку (пп. 3, 4). Выполнены исследования и изложены способы габаритного расчета призм, развертывающихся в наклонную плоскопараллельную пластинку (пп. 5, 6).

## 2. ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЕТ ПРИЗМ, РАЗВЕРТЫВАЮЩИХСЯ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНУЮ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПЛАСТИНКУ

Призмы для цилиндрического пучка лучей. Отражательные призмы чаще всего используют для пропускания пучков лучей, ограниченных круговым конусом. Конструкция и расчет призм значительно упрощаются, если определение их геометрических размеров производить для цилиндрического пучка лучей, диаметр которого равен наибольшему сечению конического пучка на гранях призмы с прибавкой припусков на фаски и крепление. В этом случае размер призмы будет больше необходимого для пропускания реального пучка. Однако при малых углах конуса светового пучка увеличение размеров призм незначительно и практически не влияет на габариты и массу прибора.

Длину хода  $l$  осевого луча в призме определяют по формуле

$$l = kd', \quad (204)$$

где  $k$  — коэффициент, постоянный для данного типа призмы и не зависящий от ее размеров.

По рис. 107, а найдем

$$d' = d + \frac{2l \operatorname{tg} w}{n}.$$

Подставляя в это выражение значение  $l$  из формулы (204), после преобразований получим

$$d' = \frac{d}{1 - \frac{2k \operatorname{tg} w}{n}} \quad (205)$$

при условии, что

$$1 - \frac{2k \operatorname{tg} w}{n} > 0$$

или

$$\operatorname{tg} w < \frac{n}{2k} = \operatorname{tg} w_d, \quad (206)$$

где  $2w_d$  — предельное угловое поле призмы.

Решая совместно выражения (204), (205), получим

$$\frac{l}{d} = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{2 \operatorname{tg} w}{n}}. \quad (207)$$

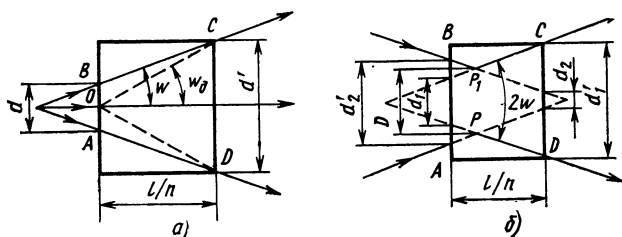


Рис. 107. Плоскопараллельная пластинка, эквивалентная редуцированной развертке призмы:  
 а — зрачок оптической системы расположен за пределами призмы; б — зрачок внутри призмы

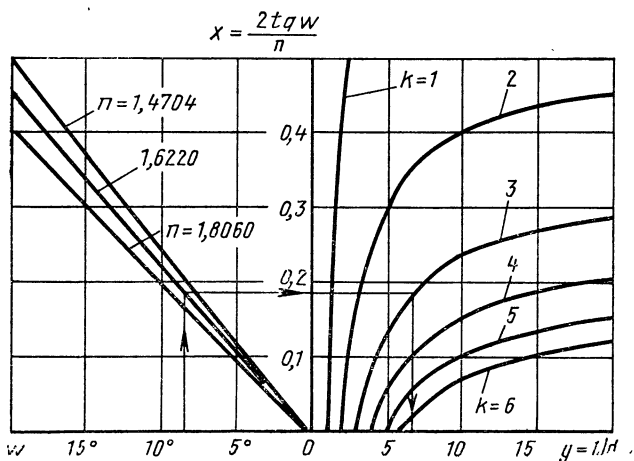


Рис. 108. Зависимость величин  $k$  и  $l/d$  от угла  $w$  и показателя преломления  $n$

Используя эту формулу, построим график (рис. 108), который дает наглядное представление о зависимости габаритных размеров призмы (величина  $\frac{l}{d}$ ) от угла конуса  $2w$  пропускаемого пучка лучей, показателя преломления стекла  $n$  и от типа призмы, характеризуемого коэффициентом  $k$ .

Обозначим

$$y = \frac{l}{d}; \quad x = \frac{2 \operatorname{tg} w}{n}.$$

Тогда уравнение (207) примет вид дробно-линейной функции:

$$y = \frac{1}{(-1)x + \frac{1}{k}}, \quad (208)$$

которая определяет равностороннюю гиперболу с центром в точке с координатами

$$x = \frac{1}{k}; \quad y = 0.$$

Одна из асимптот гиперболы совпадает с осью  $x$ , а вторая асимптота проходит параллельно оси  $y$  на расстоянии  $x = \frac{1}{k}$ .

Следовательно, кривые в правой части графика образуют семейство гипербол с одной общей асимптотой, совмещенной с осью  $x$ . Положение второй асимптоты для каждой гиперболы определяет расстояние  $\frac{1}{k}$ . Численные значения абсцисс точек пересечения гипербол с осью  $y$  равны соответствующим коэффициентам  $k$ .

Рекомендуется следующий порядок расчета.

1. С помощью графика уточняют тип призмы и марку стекла, устанавливая значение коэффициента призмы  $k$  и величину показателя преломления стекла  $n$ .

2. Производят окончательный расчет величин  $d'$ ,  $l$  по уравнениям (205), (204) и вычисляют остальные размеры по формулам, полученные при исследовании призмы или приведенным в литературе.

При выборе типа призмы и марки стекла необходимо соблюдать неравенство (206), которое запишем в следующем виде:

$$\frac{1}{k} > \frac{[2 \operatorname{tg} \omega]}{n}.$$

В противном случае горизонтальная прямая, соответствующая данному значению  $2 \operatorname{tg} \omega / n$ , не пересечет гиперболу для выбранной призмы, т. е. призма, изготовленная из стекла с выбранным показателем преломления  $n$ , не будет пропускать пучок лучей с углом конуса  $2\omega$ . Призму и стекло нужно подобрать такими, чтобы горизонтальная прямая  $2 \operatorname{tg} \omega / n$  пересекала соответствующую гиперболу на участке с наиболее крутым подъемом. Этим обеспечивают малые габариты призмы и лучшее использование ее объема.

График показывает, что при малых углах конуса  $2\omega$  пучка лучей изменение показателя преломления стекла  $n$  оказывает малое влияние на изменение величины  $l/d$ , определяющей габариты призмы. С возрастанием угла  $\omega$  возрастает роль показателя  $n$ : при увеличении  $n$  габариты призмы уменьшаются.

С помощью графика определяют в первом приближении величину  $l/d$  по заданным значениям  $\omega$ ,  $n$ ,  $k$ . Порядок работы показан на графике стрелками. Если предварительно вычислить значение  $2 \operatorname{tg} \omega / n$ , то величину  $l/d$  можно определить с помощью только правой половины графика.

По заданному значению диаметра  $d$  вычисляют

$$l = \frac{l}{d} d; \quad d' = \frac{l}{k}$$

и оценивают возможность использования призмы с полученными величинами  $l$ ,  $d'$ . Может оказаться, что размеры призмы неприемлемо велики. Тогда выбирают новый тип призмы с меньшей величиной коэффициента  $k$  или находят стекло с большим показателем преломления  $n$  и повторяют поиск величин  $l/d$ ,  $l$ ,  $d'$ . При удовлетворительных результатах производят окончательный расчет размеров призмы.

В практике расчета оптических систем встречаются случаи, когда задают положение грани  $CD$  в широкой части пучка (см. рис. 107, а). Тогда будет известна величина диаметра  $d'$ . Выбор типа призмы и марки стекла производят с помощью графика (см. рис. 108) в том же порядке, как в случае заданного положения грани в узкой части пучка. Длину хода луча определяют по формуле (204). Используя найденную величину  $l/d$ , вычисляют диаметр

$$d = \frac{d}{l} l.$$

Точное значение  $d$  находят по формуле (205) и определяют остальные размеры.

Иногда появляется возможность поместить зрачок  $PP_1$  внутри призмы, что позволяет значительно сократить ее размеры (рис. 107, б). Тогда наружная поверхность светового пучка образует два круговых усеченных конуса с общим малым основанием. Пусть положение призмы задано гранью  $AB$ . Разделим световой пучок на два конусных пучка (показаны штриховыми линиями), найдем диаметр  $d_1$  и по формуле (205) вычислим диаметр  $d'_1$ . Определим с помощью формулы (204) положение грани  $CD$ , а затем величину  $d_2$ . При  $d_1 > d_2$  принимаем диаметр расчетного цилиндрического пучка равным  $d'_1$ , а при  $d_1 < d_2$  приравниваем его величине  $d'_2$ . Если задано положение грани  $CD$ , порядок расчета не меняется.

Призма будет иметь минимальные размеры при размещении зрачка  $PP_1$  посередине ее развертки. В этом случае диаметр  $d'$  находят по формуле

$$d' = \frac{D}{1 - \frac{k \operatorname{tg} w}{n}}, \quad (209)$$

где  $D$  — диаметр зрачка оптической системы.

Рассмотрим графоаналитический метод определения величины  $d'$ , предложенный И. А. Турыгиным. Выберем тип призмы, марку стекла и зададим положение входной грани точкой  $O$ , лежащей на оси светового пучка (рис. 107, а). По формуле (206) вычислим угол  $w_d$  и проведем из точки  $O$  под этим углом прямую  $OC$  до пересечения с габаритным лучом  $BC$ . Через точку  $C$  проведем отрезок  $CD$ , длина которого равна диаметру  $d'$ .

При вычислении размеров призмы необходимо определить углы падения лучей: наименьшие — на отражающие грани и наиболь-

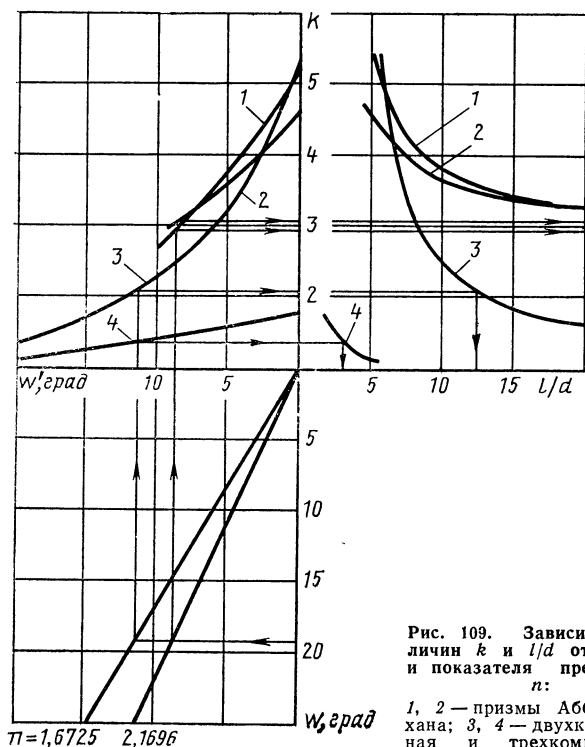


Рис. 109. Зависимость величин  $k$  и  $l/d$  от угла  $\omega$  и показателя преломления  $n$ :

1, 2 — призмы Аббе и Пехана; 3, 4 — двухкомпонентная и трехкомпонентная призмы, показанные на рис. 110 и 120

шие — на преломляющие грани. Если синус этих углов больше  $\frac{1}{n}$ , то на грани будет полное внутреннее отражение, что является желательным для отражающей грани и неприемлемо для преломляющей грани. В последнем случае нужно подобрать стекло с меньшим показателем преломления или использовать призму другой конструкции.

Если угол падения на отражающую грань меньше угла полного внутреннего отражения, то на эту грань наносят отражающее покрытие.

**Призмы для конического пучка лучей.** Призмы, рассчитанные для конического пучка, отличаются от призм для цилиндрического пучка лучей уменьшенными размерами, массой, длиной хода лучей и большим угловым полем. Эти достоинства особенно заметны при пропускании световых пучков с увеличенным углом конуса. Недостатками призм являются усложненная конструкция и повышенная стоимость изготовления.

Коэффициент  $k$  данного типа призмы, в отличие от коэффициента призмы для цилиндрического пучка лучей, является переменной

величиной, зависящей от угла конуса пропускаемого пучка. Поэтому методы расчета, основанные на постоянстве коэффициента  $k$ , нельзя использовать для призм, построенных для конического пучка лучей.

Для решения поставленной задачи в большинстве случаев могут быть использованы несколько призм. Оптимальную конструкцию призмы и марку стекла помогает определить график, построенный для предварительно выбранных призм по аналогии с графиком, показанным на рис. 109. Нижняя часть графика воспроизводит закон преломления для стекол разных марок:

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

где  $\omega'$  — угол конуса пучка лучей в стекле.

При построении верхней части используют для каждой призмы функциональные зависимости, полученные в результате исследования,

$$d'/d = f(\omega'); \quad l/d = \varphi(\omega'); \quad k = f(\omega)/\varphi(\omega').$$

Ординаты пересечения кривых с осью  $k$  в левой верхней части графика дают значения коэффициентов  $k$  соответствующих призм, построенных для цилиндрического пучка лучей с диаметром  $d'$ . В той же части графика левые концы кривых соответствуют предельным значениям углов конуса пропускаемых пучков лучей.

Некоторые кривые для разных типов призм пересекаются. Точка пересечения каждой пары кривых в левой части графика делит углы  $\omega'$  на две зоны. Если призма, построенная для угла  $\omega'$  одной зоны, имеет меньшую величину  $l/d$  и меньшие габариты, чем другая сравниваемая призма, то при построении первой призмы для угла  $\omega'$ , лежащего во второй зоне, ее габариты окажутся большими.

График показывает, что с увеличением угла  $\omega$  возрастает влияние показателя преломления стекла на габариты призмы.

При расчете предварительно выбирают тип призмы и марку стекла. С помощью графика по заданной величине  $\omega$  и соответствующим кривым определяют значения  $k$ ,  $l/d$ . Последовательность этих операций показана на рис. 109 стрелками. Используя величины, определенные по графику, и заданный размер диаметра  $d$  вычисляют значения

$$l = \frac{l}{d} d; \quad d' = \frac{l}{k}.$$

Если значения  $l$ ,  $d'$  выбранного типа призмы неприемлемо большие, подбирают другой тип призмы или заменяют марку стекла и находят новые значения  $l$ ,  $d'$ . После окончательного подбора призм вычисляют ее размеры по формулам, полученным при исследовании или приведенным в литературе. Одновременно проверяют отражающие и преломляющие грани на полное внутреннее отражение. В плоскости, перпендикулярной главному сечению, призмы строят также по коническому пучку, что дополнительно уменьшает их массу.

Порядок расчета не меняется, если задают положение преломляющей грани в широкой части пучка и за известную величину принимают диаметр  $d'$ . При расположении зрачка оптической системы внутри призмы дополнительные расчеты выполняют по методике,



изложенной в п. 6 настоящей главы применительно к равнобедренной призме прямого зрения.

График на рис. 109 дает наглядное представление о том, как изменяются размеры каждого типа призмы, определяемые значениями  $k$ ,  $l/d$ , в зависимости от угла конуса пропускаемого пучка лучей и марки стекла. Использование графика облегчает подбор типа призмы и марки стекла для ее изготовления, дает возможность производить сравнительную оценку выбранного типа призмы. По имеющимся на графике значениям коэффициента  $k$  призм для цилиндрического пучка лучей ( $k$  при  $w'=0$ ) можно сравнивать эти призмы с призмами для конического пучка.

### 3. ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ПРИЗМА

**Зависимость размеров призмы от величины пропускаемого пучка.** Призма [9] (рис. 110) имеет значительно меньшие размеры по сравнению с типовой призмой Аббе А-0°, что достигнуто изменением углов между гранями, введением воздушного промежутка между частями призмы и построением ее для пропуска реального конического светового пучка. Грань  $CH$  на участке  $BH$  одновременно преломляет и отражает световые лучи.

Для юстировки призмы достаточно вращать вокруг двух взаимно перпендикулярных осей только одну меньшую ее часть  $ABHT$ . При пропускании широких пучков лучей и соответственно больших размерах призмы это свойство является особо ценным, так как позволяет облегчить конструкцию крепления призмы и устройство для юстировочных подвижек.

Из рис. 110 имеем

$$AB = \frac{\cos w'}{\cos(\alpha + w')} d; \quad (210)$$

$$a_1 = AB \sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w'} d; \quad (211)$$

$$BH = -AB \frac{\cos(\alpha - w')}{\cos(3\alpha - w')}; \quad (212)$$

$$l = O_1 O_2 + 2O_2 O_3 + O_4 O_5;$$

$$O_1 O_2 = 0,5d \operatorname{tg} \alpha;$$

$$O_2 O_3 = \frac{a_1 - O_1 O_2}{\cos(180^\circ - 2\alpha)};$$

$$O_4 O_5 = 0,5d' \operatorname{tg} \alpha.$$

Развертка призмы дает

$$0,5d' = 0,5d + l \operatorname{tg} w', \quad (213)$$

где  $l$  — длина хода осевого луча.

Выполняя подстановку и преобразования, получим

$$l = a_1 l, \quad (214)$$



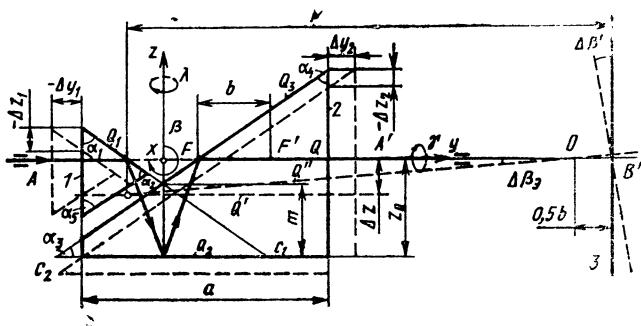


Рис. 111. Двухкомпонентная призма:

1, 2 — первый и второй компоненты; 3 — экран; 4 — плоскость изображений

$\omega'$  и  $n$ . Определение угла  $\alpha_0$  осуществляется нахождением производных функции  $l = \Phi(\alpha)$  или с помощью этой функции.

Задавая для расчета призмы угол  $\alpha$ , следует обеспечить полное внутреннее отражение наиболее наклонных лучей, идущих под углом  $\omega'$ , на гранях  $AB$ ,  $CH$  и пропускание этих лучей гранью  $CH$ , т. е. нужно соблюдать следующие условия:

$$|\epsilon_2| = |\epsilon_4| > \epsilon_0; \quad |\epsilon_3| < \epsilon_0, \quad (220)$$

где  $\epsilon_0$  — угол полного внутреннего отражения,  $\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  — углы падения лучей на грани  $AB$  и  $CH$ .

Из рис. 110 следует

$$|\epsilon_2| = \alpha - \omega'; \quad |\epsilon_3| = 180^\circ - 3\alpha + \omega'.$$

Подставляя эти значения в неравенства (220), получаем пределы, ограничивающие величину угла  $\alpha$ ,

$$\frac{180^\circ - \omega' + \epsilon_0}{3} > \alpha > \frac{180^\circ + \omega' - \epsilon_0}{3}; \quad (221)$$

$$\alpha > \epsilon_0 + \omega'.$$

**Действие подвижек призмы и ее компонентов.** Призма (рис. 111) в параллельных пучках лучей действует как плоское зеркало, а в сходящихся пучках — как зеркало, в плоскости которого ход отраженных лучей поступательно смещается на величину базиса  $b$ . При отсутствии погрешностей изготовления осевой луч  $AA'$  на входе и выходе из призмы проходит по одной прямой. Эквивалентное зеркало  $Q$  совмещено с прямой  $AA'$  и расположено параллельно основанию призмы  $Q_2$ . Положение зеркала  $Q$  относительно призмы определяет расстояние

$$z_0 = 2m \sin^2 \alpha_1, \quad (222)$$

где  $m$  — расстояние от грани  $Q_2$  до линии пересечения плоскости  $Q_1$  с гранью  $Q_3$ ,  $\alpha_1$  — угол между гранями призмы. Ввиду малости воздушного промежутка между компонентами призмы его влиянием на ход лучей пренебрегают. Величину базиса вычисляют по формуле (155).

При сортировке пользуются малыми подвижками призмы и ее компонентов, что учитывается в дальнейших выводах. Подвижки призмы вдоль осей  $x$ ,  $y$  не влияют на положение эквивалентного зеркала, а ее перемещение вдоль оси  $z$  вызывает такое же перемещение эквивалентного зеркала.

При повороте призмы вокруг осей  $x$ ,  $y$  эквивалентное зеркало поворачивается вместе с призмой. Поворот ее вокруг оси  $z$  на угол  $\Delta\lambda_{12}$  не оказывает влияния на положение эквивалентного зеркала, но вызывает поворот базиса  $b$  на тот же угол. Вследствие этого отраженные лучи поступательно смещаются в направлении оси  $x$  на величину

$$\Delta x = b\Delta\lambda_{12}. \quad (223)$$

Перемещение компонентов призмы вдоль оси  $x$  не изменяет положения эквивалентного зеркала, а вдоль осей  $y$ ,  $z$  изменяет расстояние  $m$  призмы, что приводит к смещению эквивалентного зеркала в направлении его нормали. Выполняя вычисления с помощью формулы (222), приходим к следующему выводу: смещения компонента 1 вдоль осей  $y$ ,  $z$  вызывают сдвиги эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$ :

$$\Delta z_{y1} = \frac{1}{2} \Delta y_1 \sin 2\alpha_1; \quad (224)$$

$$\Delta z_{z1} = \Delta z_1 \sin^2 \alpha_1, \quad (225)$$

а такие же смещения компонента 2 тоже вызывают сдвиг этого зеркала:

$$\Delta z_{y2} = -\frac{1}{2} \Delta y_2 \sin 2\alpha_1; \quad (226)$$

$$\Delta z_{z2} = \Delta z_2 \cos^2 \alpha_1, \quad (227)$$

где  $\Delta y_1$ ,  $\Delta z_1$ ,  $\Delta y_2$ ,  $\Delta z_2$  — смещения соответствующих компонентов вдоль осей  $y$  и  $z$ .

Сдвиг эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$  равнозначен смещению выходящего осевого луча в том же направлении на двойное расстояние.

При повороте компонента 1 вокруг оси  $x$  на угол  $\Delta\beta_1$  отраженный луч  $A'$  отклоняется на удвоенный угол в том же направлении. Следовательно, в этом случае эквивалентное зеркало повернется вокруг оси  $x$  на угол

$$\Delta\beta_2 = \Delta\beta_1. \quad (228)$$

Поворот компонента 2 вокруг оси  $x$  вызывает смещения  $\Delta y_{c2}$  и  $\Delta z_{c2}$  ребра  $C_2$  углового зеркала  $Q_2C_2Q_3$  вдоль осей  $y$ ,  $z$ . Так как поворот углового зеркала вокруг его ребра не влияет на положение выходящих лучей, то рассматриваемый случай равносителен результату действия двух поступательных смещений  $\Delta y_{c2}$  и  $\Delta z_{c2}$  компонента 2. Используя формулы (226) и (227), приходим к заключению, что поворот компонента 2 вокруг оси  $x$  вызывает сдвиг эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$  на величину

$$\Delta z_{y22} = \cos \alpha_1 (\Delta z_{c2} \cos \alpha_1 - \Delta y_{c2} \sin \alpha_1). \quad (229)$$

При повороте компонента 2, образующего угловое зеркало, вокруг оси  $y$  выходящий из призмы осевой луч  $A'$  отклоняется в

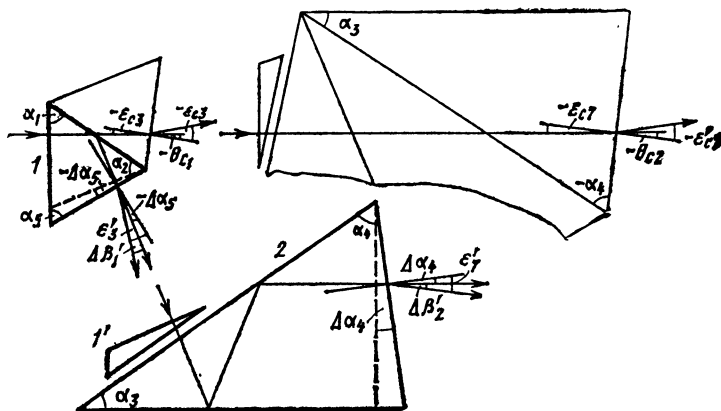


Рис. 112. Развертка двухкомпонентной призмы:

1, 1' — первый компонент, условно разделенный на две части; 2 — второй компонент

плоскости эквивалентного зеркала согласно формуле (188) на угол

$$\Delta \lambda'_y = -\Delta \gamma_2 \sin 2\alpha_1. \quad (230)$$

Если после поворота компонента 2 повернуть на тот же угол компонент 1, то осевой луч примет исходное положение, так как будет исключен взаимный разворот компонентов. Следовательно, поворот компонента 1 вокруг оси  $y$  вызывает наклон осевого луча:

$$\Delta \lambda''_y = \Delta \gamma_1 \sin 2\alpha_1, \quad (231)$$

где  $\Delta \gamma_1$  и  $\Delta \gamma_2$  — углы поворота компонентов. Отклонение луча сопровождается поворотом изображения вокруг оси  $y$ , который не оказывает влияния на юстировку вращающейся призмы.

Повороты компонентов вокруг оси  $z$  равносильны таким же поворотам угловых зеркал  $Q_1C_1Q_2$ ,  $Q_2C_2Q_3$  и вызывают отклонение выходящего из призмы осевого луча  $A'$  в плоскости эквивалентного зеркала на угол

$$\Delta \lambda''_z \approx -2\Delta \lambda_1 \cos^2 \alpha_1 = 2\Delta \lambda_2 \cos^2 \alpha_2, \quad (232)$$

где  $\Delta \lambda_1$  и  $\Delta \lambda_2$  — углы поворота компонентов.

**Влияние погрешностей изготовления углов призмы на отклонение лучей.** Погрешности изготовления углов призмы в главном сечении  $\Delta \alpha_1, \dots, \Delta \alpha_5$  вызывают отклонение осевого луча в его плоскости. Не изменяя хода лучей, первый компонент можно условно разделить на две части, одна из которых 1 развертывается в плоскопараллельную пластинку, а другая в виде клина 1' дополняет развертку компонента 2 до такой же пластинки (рис. 112).

Штриховой линией показаны положения луча и граней при отступлении погрешностей изготовления призмы.

Входную грань компонента 1 расположим перпендикулярно падающему осевому лучу. Согласно рис. 112 этот компонент отклоняет луч на угол

$$\Delta\beta'_1 = \epsilon'_3 + \Delta\alpha_5.$$

Так как

$$\epsilon'_3 = -\epsilon'_{c3} = -n\theta_{c1},$$

то

$$\Delta\beta'_1 = -n\theta_{c1} + \Delta\alpha_5. \quad (233)$$

Аналогично получим угол отклонения луча для компонента 2:

$$\Delta\beta'_2 = -n\theta_{c2} - \Delta\alpha_4, \quad (234)$$

где  $\theta_{c1}$ ,  $\theta_{c2}$  — клиновидность развертки компонентов 1 и 2.

Отметим, что величина угла  $\Delta\beta'_2$  не зависит от положения компонента 2 относительно падающего луча.

Призма отклоняет осевой луч на суммарный угол

$$\Delta\beta'_{12} = \Delta\beta'_1 + \Delta\beta'_2 = -n\theta_c - \Delta\alpha_4 + \Delta\alpha_5, \quad (235)$$

где  $\theta_c$  — клиновидность развертки призмы в главном сечении;

$$\theta_c = \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2 + 2\Delta\alpha_3 - \Delta\alpha_4. \quad (236)$$

Пирамидальность призмы вызывает отклонение осевого луча в плоскости, перпендикулярной главному сечению. Плоскости главных сечений компонентов расположим перпендикулярно ребрам двугранных углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$  (см. рис. 111). С помощью инварианта пирамидальности (170) вычислим угол отклонения луча отдельно для компонентов 1 и 2, а затем составим их сумму, которая выражает угол отклонения луча призмой:

$$\Delta\lambda'_{12} = -2n\pi_1 \sin 2\alpha_1 - (n-1)\pi_2, \quad (237)$$

где  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  — пирамидальность компонентов 1 и 2.

Клиновидность развертки призмы  $\theta_\pi$  в плоскости, перпендикулярной главному сечению, определяется суммой клиновидностей разверток компонентов:

$$\theta_\pi = \pi_1 + 2\pi_2 \sin 2\alpha_1. \quad (238)$$

Действие биения подшипников и несоосности оптической оси объектива относительно оси вращения призмы. Рассмотрим проекционную систему, у которой призма вращает изображение (рис. 113). Биение подшипников 3 призмы 4 приводит к тому, что эквивалентное зеркало изменяет свое положение относительно падающего осевого луча А. Это вызывает биение изображения, которое не исправляется юстировочными подвижками. При вращении призмы возможны повороты эквивалентного зеркала вокруг осей  $x$ ,  $z$  на угол  $\frac{\Delta z_0}{p_1}$  и его смещение вдоль оси  $z$  на расстояние  $0,5\Delta z_0$ , где  $\Delta z_0$  — величина биения каждого из подшипников;  $p_1$  — расстояние между подшипниками.

В параллельных пучках лучей наибольшее биение изображения

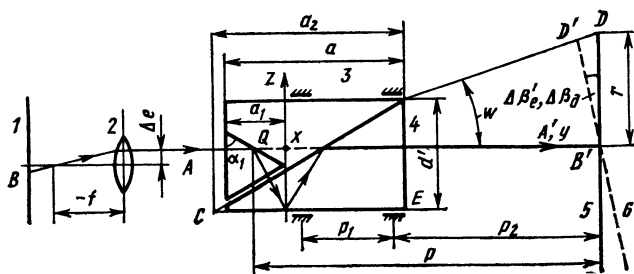


Рис. 113. Проекционная оптическая система:

1 — предметная плоскость; 2 — объектив; 3 — подшипники; 4 — призма; 5 — экран; 6 — плоскость изображений

из-за погрешностей изготовления подшипников будет составлять в угловой мере величину

$$\varphi = 4 \frac{\Delta z_0}{p_1}. \quad (239)$$

В сходящихся пучках лучей поворот эквивалентного зеркала вокруг оси  $z$  приводит к сдвигу изображения

$$\Delta s = b \frac{\Delta z_0}{p_1} \quad (240)$$

из-за наличия базиса. Поворот эквивалентного зеркала вокруг оси  $x$  вызывает наклон осевого луча на угол

$$\Delta \beta'_p = 2 \frac{\Delta z_0}{p_1} \quad (241)$$

и сдвиг изображения

$$\Delta s = 2 \frac{\Delta z_0}{p_1} (0,5p_1 + p_2). \quad (242)$$

При смещении оси вращения изображение сдвигается на расстояние

$$\Delta s = \Delta z_0. \quad (243)$$

Несоосность оптической оси проекционного объектива и оси вращения призмы приводит к наклону плоскости изображений. На рис. 113 объектив 2 строит на экране 5 изображение  $B'$  точки предмета  $B$ . Ось вращения призмы 4 находится в плоскости эквивалентного зеркала  $Q$ , проходит через точку изображения  $B'$  и не совпадает с оптической осью объектива на величину  $\Delta e$ . Наклон плоскости изображений 6, возникающий из-за смещения объектива, вычисляются по формуле

$$\Delta \beta'_e = \frac{\Delta e}{f'}, \quad (244)$$

где  $f'$  — фокусное расстояние объектива.





экрану 3 и как следствие этого — искажение наблюдаемого на экране изображения и его расфокусировку переменной величины по площади экрана. Действительно, смещение компонентов вдоль осей  $y$ ,  $z$  и поворот компонента 2 вокруг оси  $x$  вызывает сдвиг  $\Delta z$  эквивалентного зеркала  $Q$  вдоль оси  $z$  в положение  $Q'$ , что приводит к смещению выходящего осевого луча  $A'$  и биению изображения. Биение исключается поворотом компонента 1 вокруг оси  $x$ . При этом эквивалентное зеркало наклоняется на угол  $\Delta\beta$  (положение  $Q''$ ) до пересечения с осью вращения в точке  $O$ , отстоящей от плоскости изображения на половину базиса. Соответственно выходящий осевой луч и плоскость изображения поворачиваются на угол  $\Delta\beta' = 2\Delta\beta$ , а точка их пересечения  $B'$  совмещается с осью вращения. Используя рис. 111, получим

$$\Delta\beta' = \frac{2\Delta z}{p - 0,5b}, \quad (245)$$

где  $p$  — расстояние между точкой первого отражения осевого луча и точкой изображения  $B'$ ;  $\Delta z$  вычисляют по формулам (224) — (227), (229).

Биение изображения, вносимое разворотами компонентов вокруг оси  $z$  и погрешностями в углах между гранями призмы, исключается поворотами компонента 1 вокруг осей  $x$  и  $y$  до совмещения с осью вращения точки изображения  $B'$ . После юстировки первоначальный наклон выходящего осевого луча и плоскость изображения, вызванный погрешностями изготовления, изменяет свою величину, а в некоторых случаях полностью исключается.

Юстировку призмы в параллельных пучках лучей производят при помощи коллиматора и зрительной трубы, оптические оси которых должны быть параллельны. В этом случае изображение центра перекрестия сетки коллиматора будет совпадать с изображением центра перекрестия сетки зрительной трубы. Призму в подшипниках устанавливают между коллиматором и трубой. При произвольном положении ось вращения призмы образует угол  $\alpha$  с осью коллиматора и угол  $\beta$  с плоскостью эквивалентного зеркала, поэтому изображение сетки коллиматора сместится относительно центра сетки зрительной трубы. Если призму повернем на один оборот, то изображение центра сетки коллиматора опишет кардиоиду, которая определяется в угловой мере выражением (181) и показана на рис. 99.

Основание призмы  $Q_2$  устанавливают в нижнем или верхнем положении и подвижками корпуса подшипников совмещают центры изображений сеток коллиматора и зрительной трубы. Затем поворачивают призму на  $180^\circ$ . При этом изображение сетки коллиматора повернется на  $360^\circ$  и опишет половину кардиоиды. Поворотами компонента 1 относительно осей  $x$ ,  $y$  добиваются наименьшего смещения изображения сетки коллиматора при взаимно противоположных положениях призмы. Подвижки корпуса подшипников и компонента 1 повторяют до получения минимальной величины биения изображения, которая характеризует погрешности изготовления подшипников.

Юстировку в сходящихся пучках лучей выполняют в следующем порядке: вращая призму, одновременно перемещают в предметной плоскости сетку с перекрестием, добиваясь наименьшей траектории изображения центра перекрестия на экране. Сокращение биения

осуществляют юстировочными подвижками компонента 1 при неподвижной сетке. Затем эти операции повторяют, добиваясь получения такой величины биения изображения, которая уже не уменьшается и определяется только погрешностями изготовления подшипников.

**Допустимые погрешности изготовления призмы.** С помощью формул (224)—(227), (229), (244), (245) вычисляют допуски на расположение компонентов относительно друг друга и относительно оси вращения и допустимую величину смещения объектива относительно оси вращения. При этом исходными данными служат допустимые величины искажения и расфокусировки изображения на экране вследствие наклона изображения. Полученные результаты учитывают при проектировании призмы и ее крепления.

Формулы (239)—(243) позволяют определить требуемую точность изготовления подшипников призмы в зависимости от допустимой величины биения центра изображения.

Пусть проекционная оптическая система, показанная на рис. 113, из-за неточности изготовления призмы допускает искажение изображения на краю экрана радиусом  $r=70$  мм, не превышающее  $t=0,15$  мм, биение изображения  $\Delta c \leq 0,3$  мм, хроматизм  $\Delta \delta_{FC} \leq 0,5'$  и поперечную кому в плоскости изображения  $\Delta l_K \leq 0,05$  мм. По условиям конструкции крепления объектива задаем его допустимое смещение  $\Delta e \leq 0,03$  мм. Глубина изображения  $\Delta l = 1$  мм, фокусное расстояние объектива  $f' = 10,3$  мм, угол конуса пропускаемого пучка лучей  $2\omega = 36^\circ 20'$ , угол между гранями призмы  $\alpha = 56^\circ$ , размеры  $a_2 = 89$  мм,  $p_2 = 136$  мм,  $p_1 = 30$  мм,  $p = 0,5$  б = 200 мм, показатель преломления стекла призмы  $n = 1,6725$ , апертурный угол пучка лучей в пространстве изображений  $\sigma_{A'} = 0,0174$  рад.

Расчет допусков производят в следующем порядке:

1. Находят допустимый угол  $\Delta \beta_d$  наклона плоскости изображений, при котором искажения не превысят заданную предельную величину. Принимая во внимание, что  $t = r - B'D'$ , из треугольника  $B'D'D$  получим

$$\sin D' = \frac{r \cos \omega}{r - t} = \sin (D + \Delta \beta_d),$$

откуда

$$\begin{aligned} \Delta \beta_d &= \omega - 90^\circ + \arcsin \frac{r \cos \omega}{r - t} = \\ &= 18^\circ 10' - 90^\circ + \arcsin \frac{70 \cos 18^\circ 10'}{70 - 0,15} = 23'. \end{aligned}$$

2. Определяют смещение  $DD'$  точки изображения  $D'$  относительно экрана  $\delta$  и сравнивают полученное значение с глубиной изображения:

$$DD' = \frac{(r - t) \sin \Delta \beta_d}{\cos \omega} = \frac{(70 - 0,15) 0,0067}{0,9502} = 0,492 < \Delta l.$$

Следовательно, при наклоне плоскости изображений на угол  $\Delta \beta_d$  смещение  $DD'$  не превышает заданную глубину изображения.

3. Вычисляют допустимую величину биения подшипников  $\Delta z_{од}$  и составляющие допустимого угла наклона плоскости изображения.

Составляющие носят случайный характер, могут компенсировать друг друга, поэтому запишем

$$\Delta\beta_d^2 = \Delta\beta_p'^2 + \Delta\beta_e'^2 + \Delta\beta'^2, \quad (246)$$

где  $\Delta\beta_p'$ ,  $\Delta\beta_e'$  — наклоны плоскости изображения вследствие биения подшипников и смещения оптической оси объектива относительно оси вращения призмы;  $\Delta\beta'$  — наклон плоскости изображения, вызываемый погрешностями взаимного расположения компонентов. Наибольший сдвиг изображения

$$\Delta s = 0,5\Delta c.$$

Используя формулы (241), (242), (244), (246), получим

$$\Delta z_{од} = \frac{\Delta s p_1}{2(0,5p_1 + p_2)} = \frac{0,15 \cdot 30}{2(0,5 \cdot 30 + 136)} = 0,016 \text{ мм};$$

$$\Delta\beta_p' = 2 \frac{\Delta z_{од}}{p_1} = 2 \frac{0,016 \cdot 3438}{30} = 3,7';$$

$$\Delta\beta_e' = \frac{\Delta e}{f'} = \frac{0,03 \cdot 3438}{10,3} = 10';$$

$$\Delta\beta' = \sqrt{\Delta\beta_d^2 - \Delta\beta_p'^2 - \Delta\beta_e'^2} = \sqrt{529 - 13 - 100} = 20,4'.$$

4. Находят сдвиги эквивалентного зеркала, вызываемые погрешностями взаимного расположения компонентов и неточным выполнением их размеров. Полагая, что погрешности имеют случайный характер, согласно формуле (245) получим

$$\Delta\beta'^2 = \left( \frac{2}{p - 0,5b} \right)^2 (\Delta z_{y1}^2 + \Delta z_{z1}^2 + \Delta z_{z2}^2 + \Delta z_{yz2}^2). \quad (247)$$

Сдвиг эквивалентного зеркала  $\Delta z_{y1}$  является следствием относительного смещения компонентов вдоль оси  $y$  и погрешности размера  $a_1$  компонента 1, а сдвиг зеркала  $\Delta z_{z2}$  вызывается смещением компонента 2 вдоль оси  $z$  и погрешностью размера  $d'$  этого компонента. На сдвиги зеркала  $\Delta z_{z1}$  и  $\Delta z_{yz2}$  влияют соответственно смещение  $\Delta z_1$  компонента 1 и поворот компонента 2 относительно оси  $x$ . Принимая во внимание эти зависимости и допуская, что каждая погрешность изготовления призмы смещает эквивалентное зеркало на одинаковую величину, получим

$$\Delta z_{y1} = 2\Delta z_{z1} = \Delta z_1 = 2\Delta z_{yz2}. \quad (248)$$

Совместное решение уравнений (247) и (248) дает

$$\Delta z_{y1} = \sqrt{0,025\Delta\beta'^2(p - 0,5b)^2} = \sqrt{\frac{0,025 \cdot 20,4^2 \cdot 200^2}{3438}} = 0,19 \text{ мм};$$

$$\Delta z_{z2} = 0,19 \text{ мм}; \quad \Delta z_{z1} = \Delta z_{yz2} = 0,095 \text{ мм}.$$

5. Определяют допуски на взаимное расположение компонентов и допуски на их размеры.

Используя формулы (224), (227), определим

$$\Delta y_1 = \frac{2\Delta z_{y1}}{\sin 2\alpha_1} = \frac{2 \cdot 0,19}{0,927} = 0,41 \text{ мм};$$

$$\Delta z_2 = \frac{\Delta z_{z2}}{\cos^2 \alpha_1} = \frac{0,19}{0,559^2} = 0,61 \text{ мм}.$$

Половину погрешности  $\Delta y_1$  отнесем к допуску  $\Delta a$  на взаимное смещение компонентов вдоль оптической оси, а вторую половину — к допуску  $\Delta a_1$  размера  $a_1$ . Также поступим с погрешностью  $\Delta z_2$  — распределим ее на допустимое смещение компонента 2 поперек оптической оси  $\Delta z_{2д}$  и на допуск  $\Delta d'$  размера  $d'$ . В результате получим

$$\Delta a = \pm 0,2 \text{ мм}; \quad \Delta a_1 = \pm 0,2 \text{ мм};$$

$$\Delta z_{2д} = \pm 0,3 \text{ мм}; \quad \Delta d' = \pm 0,3 \text{ мм}.$$

Допустимое смещение компонента 1 поперек оптической оси вычислим с помощью формулы (225):

$$\Delta z_{1д} = \frac{\Delta z_{z1}}{\sin^2 \alpha_1} = \frac{0,095}{0,829^2} = 0,14 \text{ мм}.$$

По конструктивным соображениям компонент 2 удобно крепить к вращающейся оправе за широкую часть. Поэтому можно принять, что его поворот, возникающий вследствие ошибок сборки, происходит вокруг ребра  $E$ , параллельного оси  $x$ . Тогда при  $\Delta y_{c2} = 0$  по формуле (229) находим

$$\Delta z_{c2} = \frac{\Delta z_{yz2}}{\cos^2 \alpha_1} = \frac{0,095}{0,313} = 0,3 \text{ мм}$$

и вычисляем допустимый угол поворота компонента 2:

$$\Delta \beta_{2д} = \frac{\Delta z_2}{a_2} = \frac{0,3 \cdot 3438}{89} = 12'.$$

6. Вычисляют допуски на углы между гранями по допустимой величине хроматизма, вносимого призмой. Из формул (177) и (176) получим

$$\theta_c^2 + \theta_\pi^2 = \left( \frac{\nu \Delta \delta_{FC}}{n-1} \right)^2 = \left( \frac{32,2 \cdot 0,5}{1,6725-1} \right)^2 = 576'.$$

Соблюдая это равенство, устанавливаем допуски на клиновидность развертки:  $\theta_c = 21'$ ,  $\theta_\pi = 11,6'$ . При случайном характере распределения допусков и равном влиянии их на клиновидность  $\theta_c$  формула (236) примет следующий вид:

$$\theta_c^2 = \Delta \alpha_1^2 + \Delta \alpha_2^2 + 4\Delta \alpha_3^2 + \Delta \alpha_4^2.$$

Следовательно,

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_4 = \sqrt{\frac{\theta_c^2}{4}} = \sqrt{\frac{21^2}{4}} = 10,5';$$

$$\Delta\alpha_3 = \sqrt{\frac{\Delta\alpha_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{10,5^2}{4}} = 5,2'.$$

Примем пирамидальности компонентов одинаковыми и с помощью формулы (238) вычислим

$$\pi_1 = \pi_2 = \frac{\theta_\pi}{1 + 2 \sin 2\alpha_1} = \frac{11,6}{1 + 2 \cdot 0,9272} = 4'.$$

7. Находят по формулам (176), (178) клиновидность развертки  $\theta$  и поперечную кому  $\Delta l_K$ , вносимую клиновидностью  $\theta$ ,

$$\begin{aligned} \theta &= \sqrt{\theta_c^2 + \theta_\pi^2} = \sqrt{576} = 24' \\ \Delta l_K &= -\frac{3}{2} \theta \frac{n^2 - 1}{n} \rho_2 (\sigma_{A'})^2 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{24}{3438} \times \\ &\times \frac{1,6725^2 - 1}{1,6725} \cdot 136 \cdot 0,0174^2 = -0,00046 \text{ мм}; \\ \Delta l_K &< 0,05 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Таким образом, клиновидность развертки, определяемая допустимой величиной хроматизма, вызывает кому на два порядка меньшую допустимой.

#### 4. ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ ПРИЗМА, ПРЕДЛОЖЕННАЯ М. М. РУСИНЫМ

Зависимость размеров призмы от величины пропускаемого пучка. Призма (рис. 115) имеет малые размеры и длину хода осевого луча. Она содержит две одинаковые призмы 1, 2 с двумя отражениями, призму 3 с одним отражением и две плоскопараллельные пластинки 4, установленные с воздушными зазорами между призмами. На рисунке воздушный зазор с одной стороны пластинок 4 условно не показан, а размером  $c_2$  обозначена сумма зазоров с двух сторон пластинок. Величину  $c_2$  выбирают из условия обеспечения юстировочных подвижек составных частей призмы.

Призмы 1, 2 разделяют пучок лучей, а призма 3 обеспечивает совмещение разделенных частей пучка. Элементарный осевой пучок лучей  $A$  разделяется в точке  $O$  и отражается от гипотенузных граней призм 1, 2. Затем каждая половина пучка отражается от катетных граней этих призм (точка  $C$ ), преломляется на гипотенузных гранях (точка  $R$ ), проходит через пластинку 4 и падает на вершину  $D$  призмы 3, где, претерпев преломление и отражение, совмещается с другой половиной пучка. Совмещенный пучок идет по оси симметрии  $DT$  и преломляется на выходной грани призмы 3.

Для исключения вредных отражений в призме установлена диафрагма  $OD$ , которая не пропускает лучи, проходящие левее ребра

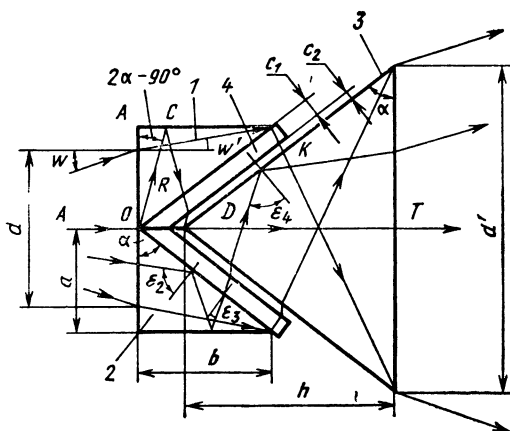


Рис. 115. Призма, предложенная М. М. Русиновым

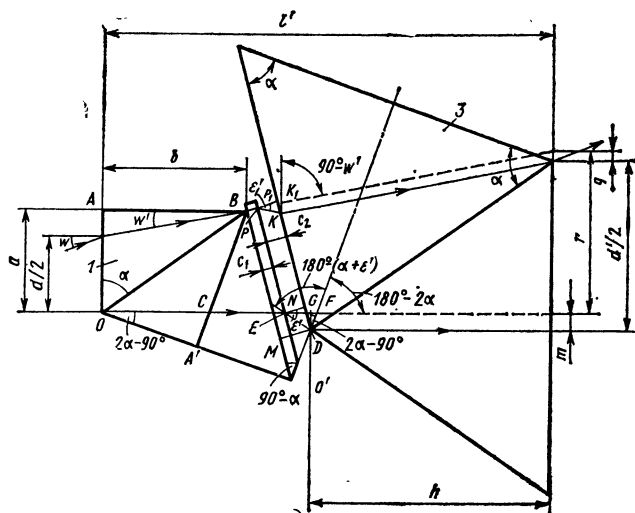


Рис. 116. Развертка половины призмы

Д. Поэтому призма виньетировать пропускаемый световой пучок. Характер виньетирования изложен ниже.

Плоскопараллельные пластинки 4 уменьшают виньетирование пучка и позволяют изменять в известных пределах угол  $\alpha$  между гранями, практически не увеличивая хроматизма призмы в сходя-

щихся пучках лучей. Однако вместе с некоторым улучшением характеристик призмы введение пластинок усложняет и утяжеляет конструкцию призмы, увеличивает световые потери. Поэтому применять пластинки следует только в крайних случаях.

Используя рис. 115 и 116, определим размеры призмы:

$$\begin{aligned} a &= 0,5d + b \operatorname{tg} w'; \\ b &= a \operatorname{tg} \alpha, \end{aligned} \quad (249)$$

откуда

$$a = \frac{d'}{2(1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w')}. \quad (250)$$

Из треугольника  $O'MD$  найдем

$$c_1 + c_2 = MD = O'D (90^\circ - \alpha). \quad (251)$$

Рассматривая треугольники  $OO'F$ ,  $EFD$  и  $EDN$ , имеем

$$O'D = O'F - FD; \quad O'F = -2a \operatorname{ctg} 2\alpha;$$

$$FD = \frac{ED \sin(\varepsilon' - \varepsilon)}{\sin(180^\circ - 2\alpha)};$$

$$ED = \frac{c_2}{\cos \varepsilon'}, \quad (252)$$

где

$$\varepsilon = 180^\circ - 3\alpha.$$

После подстановки в равенство (251) и преобразований получим

$$c_1 = \frac{d \operatorname{ctg} 2\alpha \cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w' - 1} - c_2 \left[ 1 + \frac{\sin(\varepsilon' - \varepsilon)}{2 \sin \alpha \cos \varepsilon'} \right]. \quad (253)$$

Вычислим значение  $h$ :

$$\begin{aligned} h &= 0,5d' \operatorname{tg} \alpha; \quad 0,5d' = r + m - q; \\ r &= 0,5d + l' \operatorname{tg} w'; \quad l' = 2OC + h - GF; \\ OC &= \frac{a}{\sin 2\alpha}. \end{aligned} \quad (254)$$

Из треугольников  $EDG$ ,  $DFG$ ,  $PK_1K$  и  $PP_1K$  определим

$$m = ED \sin(\varepsilon' - \varepsilon); \quad GF = m \operatorname{tg}(2\alpha - 90^\circ);$$

$$q = \frac{PK \sin(\varepsilon'_1 - \varepsilon_1)}{\sin(90^\circ - w')}; \quad PK = \frac{c_2}{\cos \varepsilon'_1};$$

где

$$\varepsilon_1 = 180^\circ - (3\alpha + w').$$

Выполняя подстановку, находим

$$h = \frac{d(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} w')}{2(1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w')^2} + c_2 l, \quad (255)$$

где

$$l = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha' \operatorname{tg} \omega'} \left[ \frac{\operatorname{ctg} 2\alpha \operatorname{tg} \omega' \sin(e' - e)}{\cos e'} + \frac{\sin(e' - e)}{\cos e'} - \frac{\sin(e_1' - e_1)}{\cos \omega' \cos e_1'} \right].$$

Найдем длину  $l$  хода осевого луча в стекле призмы:

$$l = 2OC - EF + h.$$

Рассматривая треугольник  $EFD$ , имеем

$$EF = \frac{ED \sin(\alpha - e')}{\sin 2\alpha}. \quad (256)$$

В результате вычислений получим

$$l = \frac{1 + \sin^2 \alpha (1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \omega')}{\sin 2\alpha (1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \omega')^2} d - c_2 \left[ \frac{\sin(\alpha + e')}{\cos e' \sin 2\alpha} - 1 \right]. \quad (257)$$

Длина хода осевого луча в воздушных промежутках между частями призмы, равная отрезку  $ED$ , определяется по формуле (252). При использовании призмы без плоскопараллельных пластинок величина воздушного промежутка  $c_2$  вычисляется по уравнению (253), в котором принимается  $c_1 = 0$ .

**Оптимальные и предельные значения углов между гранями.** Если пренебречь величиной воздушных промежутков  $c_2$ , то длина хода луча  $l$  будет равна первому члену правой части равенства (257), а редуцированная длина  $l_{pk} = l_{p1}$  хода осевого луча в призме 1(2) и пластинке 4 определится выражением

$$l_{p1} = \frac{2OC}{n} = \frac{d}{n(1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \omega') \sin 2\alpha}. \quad (258)$$

Анализ формул (257) и (258) при  $c_2 = 0$  показывает, что при уменьшении угла  $\alpha$  уменьшаются также величины  $l$  и  $l_{pk}$ . Как показано ниже, с уменьшением длины  $l_{pk}$  уменьшается виньетирование световых пучков. Следовательно, чем меньше угол  $\alpha$ , тем меньше длина хода луча в призме, ее габариты и виньетирование. Величину угла  $\alpha$  ограничивает неравенство (221), которое будет справедливо для рассматриваемой призмы, так как у нее и в призме, показанной на рис. 110, условия прохождения пучков одинаковы.

**Вредные отражения, виньетирование и оптимальное расположение призмы относительно конического светового пучка.** Призма без плоскопараллельных пластинок (рис. 117) установлена в сходящихся пучках лучей между проекционным объективом  $Q_1 Q_2$  (выходной зрачок) и просветным экраном  $E$ . Основной пучок лучей отражается 3 раза. Все лучи, пересекающие плоскость между ребрами  $O$  и  $D$ , испытывают дополнительное отражение от горизонтальных граней компонентов 1, 2. Например, луч  $K$  после двух отражений в компоненте 2 дополнительно отражается от горизонтальной грани компонента 1 и, проходя через компонент 3, испытывает четвертое отражение.



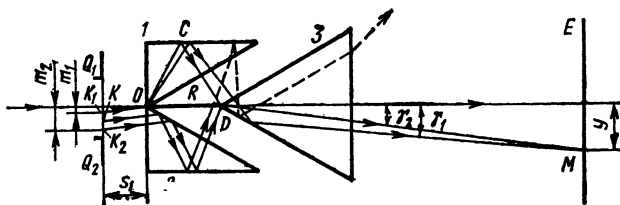


Рис. 117. Проекционная оптическая система с трехкомпонентной призмой

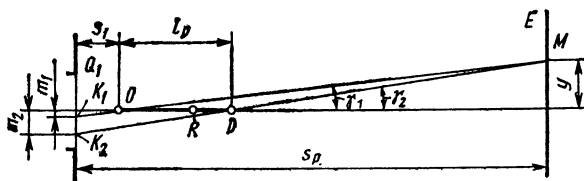


Рис. 118. Виньетирование изображения в точке  $M$  трехкомпонентной призмой

Вредные отражения исключают с помощью диафрагмы  $OD$ , устанавливаемой между компонентами. Применение диафрагмы оправдано и в тех случаях, когда вредные изображения проектируются за пределы поля зрения основного изображения, так как вредные пучки лучей увеличивают рассеянный свет в оптической системе, уменьшают контраст основного изображения и ухудшают его качество.

Промежуток  $OD$ , перекрытый диафрагмой, вызывает виньетирование пропускаемого светового пучка. Лучи, выходящие из зоны выходного зрачка объектива  $Q_1Q_2$  между точками  $K_1, K_2$ , не пропускаются призмой в точку изображения  $M$  на экране  $E$ .

На рис. 118 показаны редуцированная длина хода осевого луча в компоненте 2 (отрезок  $OR$ ) и длина хода этого луча в воздушном промежутке между компонентами (отрезок  $DR$ ). Остальные обозначения такие же, как на рис. 117.

Лучи, проходящие через точку изображения  $M$  и точки  $D, O$ , ограничивают виньетированную зону  $K_1K_2$ . Ширину зоны определяют расстояние  $s_1$  между выходным зрачком объектива и первой гранью призмы, длина хода луча в компонентах 1, 2 и величина воздушного промежутка  $DR$  между компонентами. Очевидно, чем меньше эти расстояния, тем уже будет зона  $K_1K_2$ .

Если в воздушных промежутках между компонентами поместить две плоскопараллельные стеклянные пластинки, обеспечивая с каждой стороны небольшие воздушные зазоры, то редуцированная величина промежутка  $DR$  уменьшится, следовательно, уменьшится и виньетирование.

Величину виньетирования определяют следующим образом. Для каждой точки изображения  $M$  вычисляют отрезки  $m_1$  и  $m_2$ , расположенные в плоскости выходного зрачка объектива  $Q_1Q_2$ . Очевид-

но, что

$$m_1 = s_1 \operatorname{tg} \gamma_1; \quad (259)$$

$$m_2 = (s_1 + l_{pk}) \operatorname{tg} \gamma_2, \quad (260)$$

где

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{y}{s_p - s_1}; \quad \operatorname{tg} \gamma_2 = \frac{y}{s_p - s_1 - l_{pk}};$$

$y$  — координата точки изображения  $M$ ;  $s_p$ ,  $l_{pk}$  — редуцированная длина хода осевого луча от выходного зрачка объектива до экрана  $E$  и от входной грани призмы до вершины  $D$  компонента  $З$ .

При наличии в призме плоскопараллельных пластинок редуцированную длину  $l_{pk} = l_{p1}$  вычисляют по формуле (258). Если призма выполнена без пластинок, то (см. рис. 116)

$$l_{pk} = l_{p2} = \frac{2OC - EF}{n} + ED.$$

Используя выражения (252), (254), (255) и выполняя преобразования, получим

$$l_{p2} = l_{p1} \left( 1 - \frac{\cos 2\alpha \cos \alpha}{\cos \varepsilon'} \cdot \frac{n - \frac{\sin(\alpha + \varepsilon')}{\sin 2\alpha}}{1 + \frac{\sin(\varepsilon' - \varepsilon)}{2 \sin \alpha \cos \varepsilon}} \right). \quad (261)$$

При установке призмы в параллельных пучках величина  $\gamma_1 = \gamma_2$  и обозначает угол между оптической осью и лучами пучка, для которого вычисляется виньетирование.

По значениям  $m_1$  и  $m_2$  определяют площадь  $S$  виньетируемой зоны зрачка объектива и коэффициент виньетирования для данной точки изображения по формуле (141).

Так как призма симметрична плоскости, проходящей через оптическую ось и ребро  $D$ , то пучки лучей, строящие изображения в точках с координатами  $y$  и  $-y$ , виньетируются одинаково. Следовательно, в плоскости изображения наблюдатель увидит две притененные параллельные друг другу зоны.

Установим призму так, чтобы компонент  $З$  (см. рис. 117) находился в узкой части конического пучка лучей. Выполняя вычисления по аналогии с предыдущими и пренебрегая воздушными зазорами между пластинками и гранями компонентов, получим следующие выражения для определения виньетирования:

$$l_{p3} = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \omega'}{n (\sin 2\alpha - \operatorname{tg} \omega')} d; \quad m_1 = \left( s_1 + \frac{h}{n} \right) \operatorname{tg} \gamma_1;$$

$$m_2 = \left( s_1 + \frac{h}{n} + l_{p3} \right) \operatorname{tg} \gamma_2; \quad h = 0,5 \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{y}{s_p - s_1 - \frac{h}{n}}; \quad \operatorname{tg} \gamma_2 = \frac{y}{s_p - s_1 - l_{p3} - \frac{h}{n}}.$$

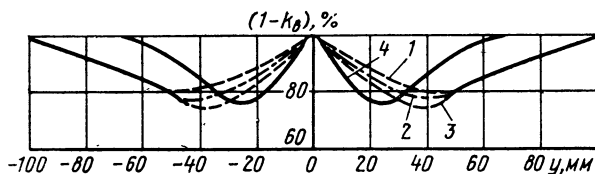


Рис. 119. Виньетирование пучков лучей различными призмами, рассчитанными на одинаковые значения  $d=14,4$  мм,  $w=18^\circ 5'$ ,  $n=1,6725$ :

1 — с пластинками,  $\alpha=52^\circ$ ; 2 — с пластинками,  $\alpha=60^\circ$ ; 3 — без пластинок,  $\alpha=60^\circ$ ; 4 — с пластинками,  $\alpha=60^\circ$ , компонент 3 расположен в узкой части пучка лучей

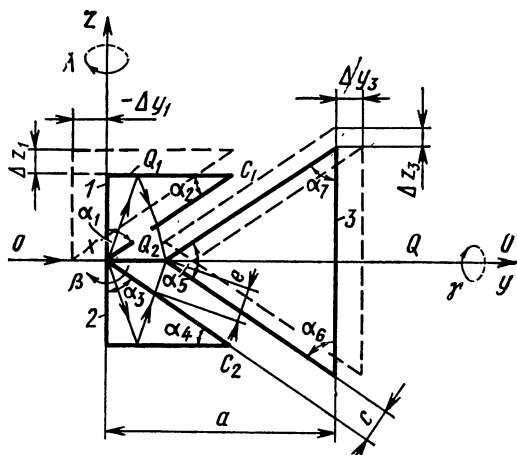


Рис. 120. Трехкомпонентная призма: 1, 2, 3 — первый, второй и третий компоненты

Сравним характер виньетирования пучков лучей трехкомпонентными призмами нескольких модификаций, которые последовательно устанавливаются в проекционную систему на одинаковом расстоянии от объектива ( $s_1=12,9$  мм). На рис. 119 видно, что призмы с пластинками (кривые 1, 2) виньетируют пучки меньше, чем призма без пластинок (кривая 3). При этом различия по величине виньетирования незначительны. Призма, у которой компонент 3 расположен в узкой части пучка лучей (кривая 4), дает наибольшую неравномерность виньетирования и соответственно наибольший контраст притененных полос на экране. Следовательно, призмы с таким расположением применять нецелесообразно.

**Действие подвижек призмы и ее компонентов.** Призма при первом отражении разделяет падающий на нее пучок лучей на две части, а после третьего отражения вновь соединяет разделенные части в один пучок (рис. 120). Эта особенность позволяет отождествить действие призмы в параллельных пучках лучей с действием двух плоских зеркал, а в сходящихся пучках — с действием двух зеркал, в плоскости которых ход отраженных лучей поступательно смещается на величину, равную базису эквивалентных зеркал.

В призме, изготовленной без погрешностей, плоскости зеркал  $Q$  совпадают с плоскостью симметрии призмы. Величину базиса  $b$  эквивалентного зеркала найдем с помощью формул (155), (252):

$$b = a - \frac{l}{n} - e, \quad e = \frac{c}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 3\alpha_1}}, \quad (262)$$

где  $a$  — длина призмы;  $l$  — длина хода луча в стекле призмы;  $n$  — показатель преломления;  $c$  — воздушный зазор между компонентами;  $\alpha_1$  — угол между гранями.

Нетрудно убедиться, что подвижки призмы оказывают такое же влияние на положение эквивалентного зеркала и ход лучей, как подвижки двухкомпонентной призмы (см. рис. 110), а каждая пара компонентов 1, 3 и 2, 3 действует как двухкомпонентная призма в обратном ходе лучей. Используя формулы (224), (232), получим следующие результаты.

Смещения компонентов призмы вдоль оси  $x$  недействительны (рис. 120). Смещения компонентов 1 и 2 вдоль осей  $y, z$  на величину  $\Delta y_1, \Delta z_1$  и  $\Delta y_2, \Delta z_2$  вызывают сдвиги зеркала, эквивалентного компонентам 1, 3, вдоль оси  $z$  на расстояние

$$\Delta z_{y13} = -\frac{1}{2} \Delta y_1 \sin 2\alpha_1; \quad (263)$$

$$\Delta z_{z13} = \Delta z_1 \cos^2 \alpha_1 \quad (264)$$

и зеркала, эквивалентного компонентам 2, 3, на расстояние

$$\Delta z_{y23} = \frac{1}{2} \Delta y_2 \sin 2\alpha_1; \quad (265)$$

$$\Delta z_{z23} = \Delta z_2 \cos^2 \alpha_1. \quad (266)$$

Смещения компонента 3 вдоль осей  $y, z$  на величину  $\Delta y_3, \Delta z_3$  вызывают сдвиги соответствующего эквивалентного зеркала:

$$\Delta z_{y31} = \frac{1}{2} \Delta y_3 \sin 2\alpha_1; \quad (267)$$

$$\Delta z_{y32} = -\frac{1}{2} \Delta y_3 \sin 2\alpha_1; \quad (268)$$

$$\Delta z_{z31} = \Delta z_{z32} = \Delta z_3 \sin^2 \alpha_1. \quad (269)$$

При сдвиге эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$  выходящий луч смещается в том же направлении на двойное расстояние.

Повороты компонента 1 вокруг осей  $x, y, z$  можно отождествить с наклонами углового зеркала  $Q_1 C_1 Q_2$ . Поворот вокруг оси  $x$  вызывает сдвиг  $\Delta z_{yz1}$  соответствующего эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$  за счет смещения  $\Delta z_{c1}, \Delta y_{c1}$  ребра  $C_1$  углового зеркала:

$$\Delta z_{yz1} = \cos \alpha_1 (\Delta z_{c1} \cos \alpha_1 - \Delta y_{c1} \sin \alpha_1). \quad (270)$$

Повороты вокруг осей  $y$  и  $z$  вызывают отклонение выходящего осевого луча в плоскости, перпендикулярной главному сечению, на

угол

$$\Delta\lambda'_{y1} = \Delta\gamma_1 \sin 2\alpha_1; \quad (271)$$

$$\Delta\lambda'_{z1} = -2\Delta\lambda_1 \cos^2 \alpha_1 \quad (272)$$

и поворот изображения, образованного компонентами 1, 3 вокруг оси  $y$  на угол

$$\Delta\gamma'_{y1} = 2\Delta\gamma_1 \cos^2 \alpha_1; \quad (273)$$

$$\Delta\gamma'_{z1} = \Delta\lambda_1 \sin 2\alpha_1, \quad (274)$$

где  $\Delta\gamma_1$  и  $\Delta\lambda_1$  — углы поворота компонента 1 вокруг осей  $y$  и  $z$ . Последние две формулы найдены с помощью выражения (189).

Аналогичные зависимости получим для поворота компонента 2 вокруг оси  $x$  и его наклонов  $\Delta\gamma_2$ ,  $\Delta\lambda_2$ :

$$\Delta z_{yz2} = \cos \alpha_1' (\Delta y_{c2} \sin \alpha_1 + \Delta z_{c2} \cos \alpha_1); \quad (275)$$

$$\Delta\lambda'_{y2} = -\Delta\gamma_2 \sin 2\alpha_1; \quad (276)$$

$$\Delta\lambda'_{z2} = -2\Delta\lambda_2 \cos^2 \alpha_1; \quad (277)$$

$$\Delta\gamma'_{y2} = 2\Delta\gamma_2 \cos^2 \alpha_1; \quad (278)$$

$$\Delta\gamma'_{z2} = -\Delta\lambda_2 \sin 2\alpha_1, \quad (279)$$

где  $\Delta z_{yz2}$  — смещение эквивалентного зеркала вдоль оси  $z$ ,  $\Delta y_{c2}$ ,  $\Delta z_{c2}$  — смещения ребра  $C_2$  вдоль осей  $y$ ,  $z$ .

Поворот компонента 3 вокруг оси  $x$  на угол  $\Delta\beta_3$  вызывает такой же поворот эквивалентных зеркал в одну сторону:

$$\Delta\beta_{x31} = \Delta\beta_{x32} = \Delta\beta_3. \quad (280)$$

В этом случае выходящие осевые лучи отклоняются на удвоенный угол в том же направлении:

$$\Delta\beta'_{x1} = \Delta\beta'_{x2} = 2\Delta\beta_3. \quad (281)$$

При повороте компонента 3 вокруг оси  $y$  на угол  $\Delta\gamma_3$  выходящие осевые лучи отклоняются в плоскости, перпендикулярной главному сечению, в противоположные стороны на угол

$$\Delta\lambda'_{y3} = |\Delta\gamma_3 \sin 2\alpha_1|. \quad (282)$$

Для нахождения угла поворота изображений  $\Delta\gamma'_{y3}$  повернем призму на угол  $\Delta\gamma_3$ . В результате изображения повернутся в ту же сторону на угол  $2\Delta\gamma_3$ , который является суммой поворотов изображений, вызываемых отдельными компонентами,

$$2\Delta\gamma_3 = 2\Delta\gamma_1 \cos^2 \alpha_1 + \Delta\gamma'_{y3},$$

где  $\Delta\gamma_3 = \Delta\gamma_1$ .

Решая это уравнение относительно угла  $\Delta\gamma'_{y3}$ , получим

$$\Delta\gamma'_{y3} = 2\gamma_3 \sin^2 \alpha_1. \quad (283)$$

Поворот компонента 3 вокруг оси  $z$  на угол  $\Delta\lambda_3$  вызывает отклонение осевых лучей в плоскости, перпендикулярной главному сечению, в одну сторону:

$$\Delta\lambda'_{z3} = 2\Delta\lambda_3 \cos^2 \alpha_1, \quad (284)$$

и наклон изображений вокруг оси  $y$  в противоположные стороны:

$$\Delta\gamma'_{z3} = |\Delta\lambda_3 \sin 2\alpha_1|. \quad (285)$$

Действительно, при повороте призмы вокруг оси  $z$  наклон изображений, отсутствует, а угол  $\Delta\lambda_3 = \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2$ . Следовательно, компонент 3 компенсирует наклон изображений, вызываемый компонентами 1, 2, что возможно только при равенстве

$$|\Delta\gamma'_{z3}| = |\Delta\gamma'_{z1}| = |\Delta\gamma'_{z2}|,$$

из которого получаем формулу (285).

Полученные зависимости позволяют определить допуски на относительное расположение компонентов призмы.

**Влияние погрешностей изготовления углов призмы на отклонение лучей.** Погрешности изготовления углов между гранями призмы в главном сечении оказывают такое же влияние на ход лучей, как в двухкомпонентной призме (см. рис. 110). Полагая, что выходная грань компонента 3 расположена перпендикулярно падающему на призму осевому лучу, найдем угол отклонения этого луча в главном сечении после прохождения компонентов 1, 3 (см. рис. 120):

$$\Delta\beta'_{13} = -n\theta_c - \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2,$$

или, принимая во внимание равенство  $\Delta\alpha_5 + \Delta\alpha_6 + \Delta\alpha_7 = 0$ ,

$$\Delta\beta'_{13} = -n\theta_c - \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_6 - \Delta\alpha_7, \quad (286)$$

где  $\Delta\alpha_1, \dots, \Delta\alpha_7$  — погрешности в соответствующих углах призмы,  $\theta_c$  — клиновидность развертки компонентов 1, 3 в главном сечении;

$$\theta_c = -\Delta\alpha_1 + 2\Delta\alpha_2 - \Delta\alpha_5 + \Delta\alpha_6. \quad (287)$$

Аналогичные выражения можно получить для угла отклонения  $\Delta\beta'_{23}$  осевого луча, проходящего через компоненты 2, 3. Примем  $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_3$ ,  $\Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_4$ ; тогда  $\Delta\beta'_{13} = -\Delta\beta'_{23}$ .

Угол  $\Delta\beta'$  между выходящими осевыми лучами  $O'_1, O'_2$  и взаимный наклон плоскостей изображений (рис. 121) определяет равенство

$$\Delta\beta' = 2\Delta\beta'_{13}. \quad (288)$$

Вследствие пирамидальности каждая пара компонентов призмы (см. рис. 120) отклоняет осевой луч в плоскости, перпендикулярной главному сечению, на угол

$$\Delta\lambda'_{\pi} = -2\pi_K \sin 2\alpha_1 - (n-1)\pi_3, \quad (289)$$

где  $\pi_K$  — пирамидальность первого или второго компонента;  $\pi_3$  — пирамидальность компонента 3.

Формула (289) выведена из условия, что ребра

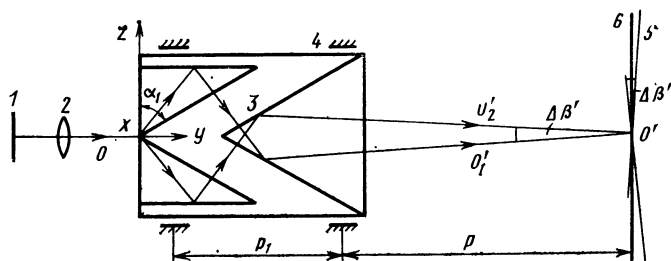


Рис. 121. Проекционная оптическая система:  
1 — предметная плоскость; 2 — объектив; 3 — призма; 4 — подшипник; 5 — плоскость изображений; 6 — экран

двугранных углов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_5$  перпендикулярны главному сечению. Клиновидность развертки двух компонентов в плоскости  $xy$  определяет выражение

$$\theta_{\pi} = 2\pi_{\kappa} \sin 2\alpha_1 + \pi_3. \quad (290)$$

**Юстировка вращающейся призмы.** Так как призма разделяет пучки лучей, то при ее юстировке требуется устранять наряду с биением изображения также двоение изображения в поле зрения оптической системы. В параллельных пучках лучей двоение изображения отсутствует, если обеспечена параллельность выходящих осевых лучей  $O'$  и не развернуты друг относительно друга изображения, образованные компонентами 1, 3 и 2, 3 (см. рис. 120). Эти условия выполняются, когда эквивалентные зеркала параллельны, а отклонения лучей  $O'$  в плоскости, перпендикулярной главному сечению призмы, равны. Для исключения биения изображения требуется выполнить дополнительное условие — обеспечить параллельность лучей  $O'$  оси вращения призмы.

В сходящихся пучках лучей двоения изображения не наблюдается при совпадении выходящих осевых лучей  $O'_1$ ,  $O'_2$  и при исключении взаимного разворота изображений вокруг оси  $y$  (рис. 121). Если лучи  $O'_1$ ,  $O'_2$ , пересекаются в плоскости экрана, то двоения изображения не будет в диаметральной зоне поля зрения. В первом случае эквивалентные зеркала совпадают, во втором случае — пересекаются по линии, отстоящей от плоскости экрана на половину базиса.

Для устранения биения изображения необходимо дополнительно обеспечить совпадение осевых лучей  $O'_1$ ,  $O'_2$  и оси вращения или их пересечение в одной точке плоскости экрана. При этом эквивалентные зеркала совпадут с осью вращения или пересекут ее в одной точке.

Юстировка призмы осуществляется подвижками компонента 3, которыми сначала устраняют двоение изображения, а затем его биение (см. 120, 121). В параллельных пучках лучей двоение изображения по высоте, вызываемое погрешностями изготовления углов призмы в главном сечении, юстировке не поддается. В этом случае допустимые отклонения в углах призмы вычисляют, используя нера-

где  $\beta_d$  — допустимая угловая величина двоения изображения.

Двоение изображения в направлении, перпендикулярном главному сечению, устраняют в центральной зоне поля зрения поворотом компонента 3 вокруг оси  $y$ . Взаимный разворот изображений и двоение на краях поля зрения исключают поворотом компонента 3 вокруг оси  $z$ .

Биеие изображения сводят к минимальной величине поворотом компонента 3 вокруг оси  $x$ , при котором происходит одновременный наклон на одинаковый угол осевых лучей в плоскости главного сечения. Наклон осевых лучей в плоскости, перпендикулярной главному сечению, после устранения двоения изображения не исправляется. Вследствие этого призма дает остаточное биеие изображения, величина которого определяется наклонами компонентов 1, 2 относительно осей  $y$ ,  $z$  и пирамидальностью призмы.

В сходящихся пучках лучей двоение изображения в направлении линии пересечения экрана с плоскостью главного сечения устраняют перемещением компонента 3 вдоль оси  $y$ , а в направлении, перпендикулярном главному сечению, — поворотом того же компонента вокруг оси  $y$ . Этим обеспечивается пересечение осевых лучей  $O'_1$ ,  $O'_2$  в одной точке плоскости экрана. Результаты подвижек оценивают, наблюдая центральную зону поля.

Взаимный разворот изображений, вызывающий двоение изображения на краях поля зрения, исключают поворотом компонента 3 вокруг оси  $z$ .

Юстировочные подвижки не оказывают влияния на угол  $\Delta\beta'$  между выходящими осевыми лучами и на взаимный наклон плоскостей изображений.

Вследствие этого на экране за пределами линии пересечения плоскостей изображений наблюдаются искажения, расфокусировка и двоение изображения, имеющие переменную величину по площади экрана. Остаточные дефекты изображения зависят от погрешностей углов призмы в главном сечении и от точности установки компонентов 1, 2 в направлении осей  $y$  и  $z$ .

Биеие изображения устраняют поворотами призмы вокруг осей  $x$  и  $z$ . Поворот призмы вокруг оси  $x$  равнозначен такому же повороту компонента 3. Если базис призмы мал или равен нулю, то ее поворот вокруг оси  $z$  на небольшой угол не оказывает влияния на биеие изображения. В этом случае остаточная величина биеия изображения после юстировки определяется пирамидальностью компонентов и точностью установки компонентов 1, 2.

Биеие изображения, вносимое погрешностями изготовления подшипников, юстировочными подвижками не устраняется.

**Допустимые погрешности изготовления призмы.** Проекционная оптическая система, представленная на рис. 121, из-за погрешностей изготовления призмы допускает биеие изображения  $\Delta c \leq 0,8$  мм, двоение изображения в плоскости экрана  $q \leq 0,05$  мм, хроматизм  $\Delta\delta_{FC} \leq 0,5'$  и поперечную кому в плоскости изображения  $\Delta'_{\kappa} \leq 0,05$  мм. Угол между гранями призмы  $\alpha_1 = 56^\circ$ , базис эквивалентных зеркал  $b = 3$ , размеры  $p_1 = 22$  мм,  $p = 270$  мм, показатель преломления стекла призмы  $n = 1,6725$ , апертурный угол пучка лучей в пространстве изображений  $\sigma'_A = 0,0174$  рад.



Вследствие небольшой величины базиса эквивалентных зеркал малые подвижки призмы являются недостаточными для устранения биения изображения, вызываемого наклоном осевых лучей в плоскости, перпендикулярной главному сечению. Поэтому допустимую величину биения изображений распределим на биение  $\Delta c_1$ , которое вносит наклон осевых лучей, и биение  $\Delta c_2$ , вызываемое сдвигом изображения  $\Delta s$  из-за погрешностей изготовления подшипников:  $\Delta c = 0,8 \text{ мм} = \Delta c_1 + \Delta c_2$ ;  $\Delta c_1 = 0,5 \text{ мм}$ ;  $\Delta c_2 = 2\Delta s = 0,3 \text{ мм}$ .

Юстировку призмы выполняют подвижками компонента 3. Величина биения изображения после юстировки определяется погрешностями сборки компонентов 1, 2 — наклонами  $\Delta\gamma_1$ ,  $\Delta\lambda_1$ ,  $\Delta\gamma_2$ ,  $\Delta\lambda_2$  относительно осей  $y$ ,  $z$ , пирамидальностью компонентов  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$  и биением подшипников  $\Delta z_0$ .

Допуски вычисляются в следующей последовательности.

1. Определяют допустимый угол наклона осевого луча  $\Delta\lambda_d$  в плоскости, перпендикулярной главному сечению, и с помощью (242) — допустимое биение подшипников  $\Delta z_{0д}$ :

$$\Delta\lambda_d = \frac{c_1}{2p} = \frac{0,5 \cdot 3438}{2 \cdot 270} = 3,2';$$

$$\Delta z_{0д} = \frac{\Delta s p_1}{2(0,5 p_1 + p)} = \frac{0,15 \cdot 22}{2(0,5 \cdot 22 + 270)} = 0,006 \text{ мм}.$$

2. По величине угла  $\Delta\lambda_d$  находят допуски  $\Delta\gamma_1$ ,  $\Delta\lambda_1$ ,  $\Delta\gamma_2$ ,  $\Delta\lambda_2$  на взаимное расположение компонентов 1, 2. Допустим, что из-за погрешностей установки компонентов 1, 2 осевые лучи, выходящие из призмы, отклоняются в плоскости  $xu$  в одну сторону на угол  $\Delta\lambda'_{12}$ . При этом изображения развернутся друг относительно друга на угол  $\Delta\gamma$ . В процессе юстировки взаимный разворот изображений компенсируется поворотом компонента 3 вокруг оси  $z$ , что вызывает дополнительный наклон осевых лучей  $\Delta\lambda'_{23}$ . Пусть в ту же сторону отклоняются лучи вследствие пирамидальности призмы. Так как составляющие наклона  $\Delta\lambda_d$  носят случайный характер, запишем

$$\Delta\lambda_d^2 = 10,24' = \Delta\lambda_{12}'^2 + \Delta\lambda_{23}'^2 + \Delta\lambda_{\pi}'^2. \quad (292)$$

Будем считать погрешности установки компонентов 1, 2 одинаковыми:  $\Delta\gamma_1 = \Delta\gamma_2 = \Delta\lambda_1 = \lambda_2$ .

Тогда, используя формулы (271), (274), (278), (279), получаем

$$\Delta\lambda_{12}'^2 = \Delta\lambda_{y1}'^2 + \Delta\lambda_{z1}'^2 = 4\Delta\gamma_1^2 \cos^2 \alpha_1; \quad (293)$$

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_{y1} - \Delta\gamma_{z1} + \Delta\gamma_{y2} - \Delta\gamma_{z2} = 4\Delta\gamma_1 \cos^2 \alpha_1.$$

Используя равенство  $\Delta\gamma = 2\Delta\gamma'_{23}$ , при котором исключается взаимный разворот изображений, и формулы (284), (285), найдем угол поворота  $\Delta\lambda_3$  компонента 3, а затем — наклон лучей  $\Delta\lambda'_{23}$ :

$$4\gamma_1 \cos^2 \alpha_1 = 2\Delta\lambda_3 \sin 2\alpha_1;$$

$$\Delta\lambda_3 = \Delta\gamma_1 \operatorname{ctg} \alpha_1;$$

$$\Delta\lambda_{23}'^2 = 2\Delta\gamma_1 \operatorname{ctg} \alpha_1 \cos^2 \alpha_1. \quad (294)$$

Соблюдая равенство (292), примем

$$\Delta\lambda_{12}'^2 = 4,24', \quad \Delta\lambda_{23}'^2 = 3', \quad \Delta\lambda_{\pi}'^2 = 3'.$$

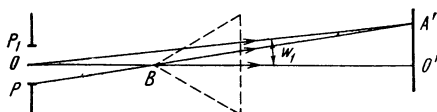
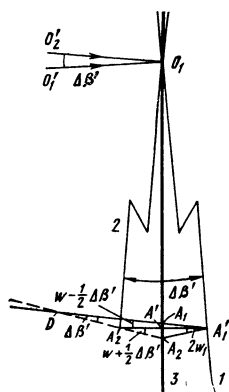


Рис. 122. Ход лучей между объективом и экраном при отсутствии призмы

Рис. 123. Двоение изображения вследствие погрешностей изготовления углов призмы:

1, 2 — плоскости изображений; 3 — экран



С помощью формул (293), (294) вычислим допустимые повороты компонентов 1, 2;

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{12}'^2 + \Delta\lambda_{23}'^2 &= \Delta\lambda_{\text{д}}'^2 - \Delta\lambda_{\pi}'^2; \\ 4\Delta\gamma_1^2 \cos^2 \alpha_1 (1 + \cos^2 \alpha_1 \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) &= 7,24'; \\ \Delta\gamma_1 &= \frac{\sqrt{7,24}}{2 \cos \alpha_1 \sqrt{1 + \cos^2 \alpha_1 \operatorname{ctg}^2 \alpha_1}} = \\ &= \frac{\sqrt{7,24}}{2 \cos 56^\circ \sqrt{1 + \cos^2 56^\circ \operatorname{ctg}^2 56^\circ}} = \pm 2,2'; \\ \Delta\gamma_2 &= \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \pm 2,2' .\end{aligned}$$

3. Применяя формулу (289) и считая пирамидальности одинаковыми, находят их допустимую величину:

$$\begin{aligned}\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 &= \frac{\Delta\lambda_{\pi}'}{n(2 \sin 2\alpha_1 + 1) - 1} = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{1,6725(2 \sin 112^\circ + 1) - 1} = 0,8' .\end{aligned}$$

4. Определяем допуски на углы в главном сечении по допустимой величине двоения изображения. Приведем развертку призмы к воздуху и найдем положение ребра B компонента 3 (рис. 122). Через край P выходящего зрачка объектива и точку B пропустим луч, который дает крайнюю точку A' изображения, образованного компонентами 2, 3.

Пользуясь оптической схемой, вычисляем расстояние от центра экрана O' до точки изображения A' и угол наклона  $w'$  главного луча OA':  $O'A' = 31,7$  мм,  $w_1 = 5^\circ 51'$ .

Вследствие погрешностей изготовления углов призмы в главном сечении предметная точка  $A$ , соответствующая краю изображения, отстоящему от центра экрана на расстояние  $O'A'$ , имеет два изображения:  $A'_1$  и  $A'_2$  (рис. 123). Точки  $A_1, A_2$  пересечения главных лучей  $DA'_1$  и  $DA'_2$  с экраном являются изображениями точки  $A$  на экране, а расстояние  $A_1A_2$  определяет наибольшую величину двоения изображения.

Учитывая, что угол между плоскостями изображений  $\Delta\beta'$  мал, из треугольников  $A_1A_2A'_1$ ,  $A_1A'_1A'$  и  $A'A'_1O'$  получаем

$$A_1A_2 = q = \frac{A_1A'_1 \sin 2\omega_1}{\cos \omega_1};$$

$$A_1A'_1 = \frac{A'A'_1}{\cos \omega_1};$$

$$A'A'_1 = \frac{1}{2} O'A' \Delta\beta'.$$

Совместное решение этих уравнений дает

$$\Delta\beta' = \frac{q}{O'A' \operatorname{tg} \omega_1}.$$

Подставляя сюда допустимую величину двоения изображения и полученные значения  $O'A'$  и  $\omega_1$ , вычисляем допустимый угол  $\Delta\beta'_d$  между выходящими осевыми лучами в главном сечении:

$$\Delta\beta'_d = \frac{0,05 \cdot 3438}{31,7 \cdot 0,1025} = 53'.$$

Допуски на углы призмы в главном сечении найдем по равенству  $\Delta\beta'_d = \Delta\beta'$ , которое с помощью формул (286)—(288) представим в следующем виде:

$$\frac{\Delta\beta'_d}{2} = |(n-1)(\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_5)| + |2n\Delta\alpha_2| + |(n+1)\Delta\alpha_6|.$$

Примем

$$|\Delta\alpha_1| = |2\Delta\alpha_2| = |\Delta\alpha_5| = |\Delta\alpha_6|,$$

тогда

$$\Delta\alpha_1 = \pm \frac{\Delta\beta'_d}{2(4n-1)} = \pm \frac{53}{2(4 \cdot 1,6725 - 1)} = \pm 4,6';$$

$$\Delta\alpha_2 = \pm 2,3'; \quad \Delta\alpha_5 = \Delta\alpha_6 = \pm 4,6'.$$

5. Используя формулы (287), (290), (176), (177), выполняют поверочный расчет на соответствие найденных допусков заданной

величине хроматизма:

$$\begin{aligned}\theta_c &= |\Delta\alpha_1| + |\Delta\alpha_2| + |\Delta\alpha_5| + |\Delta\alpha_6| = \\ &= 4,6 + 2 \cdot 2,3 + 4,6 + 4,6 = 18,4'; \\ \theta_\pi &= 2\pi_1 \sin 2\alpha_1 + \pi_3 = 2 \cdot 0,8 \sin 112^\circ + 0,8 = 2,3'; \\ \theta &= \sqrt{\theta_c^2 + \theta_\pi^2} = \sqrt{18,4^2 + 2,3^2} = 18,5'; \\ 0,5' &\geq \Delta\delta_{FC} = \frac{\theta}{v} (n-1) = \frac{18,5}{32,2} (1,6725 - 1) = 0,4'. \quad (295)\end{aligned}$$

В данном примере хроматизм призмы не превышает допустимой величины, поэтому полученные допуски на пирамидальность и на углы в главном сечении пересчета не требуют. С другими исходными данными возможен случай, когда неравенство (295) будет нарушено. Тогда допуски на углы призмы следует вычислять по допустимой величине хроматизма.

6. Вычисляют по формуле (178) поперечную кому  $\Delta l_K$  и сравнивают ее с допустимой величиной:

$$\begin{aligned}\Delta l_K &= -\frac{3}{2} \theta \frac{n^2 - 1}{n} p (\sigma'_{A'})^2 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{18,5}{3438} \times \\ &\times \frac{1,6725^2 - 1}{1,6725} \cdot 270 \cdot 0,0174^2 = -0,00071 \text{ мм}; \quad \Delta l_K < 0,05 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Следовательно, кома, вносимая клиновидностью  $\theta$ , практически не оказывает влияния на качество изображения.

## 5. ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ПРИЗМА С КРЫШЕЙ

Призма [10] (рис. 124, а) разворачивается в слабонаклонную плоско-параллельную пластинку, имеет малые размеры и отличается тем, что не требует нанесения зеркальных покрытий на отражающие грани, благодаря чему световые потери в призме сведены к мини-

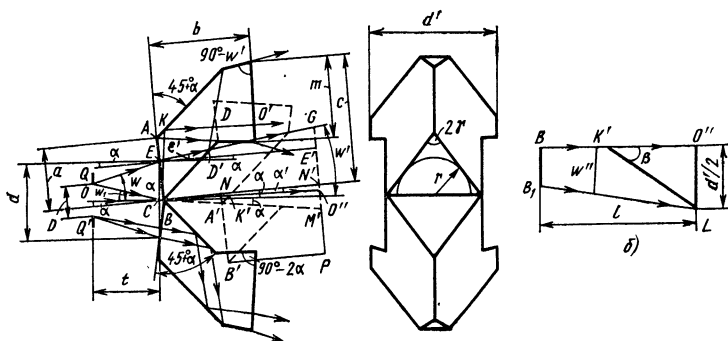


Рис. 124. Двухкомпонентная призма с крышей, установленная в параллельных пучках лучей

муму. Призма не виньетировывает пропускаемый пучок лучей и при определенных условиях может работать в сходящихся пучках лучей. Недостатками ее являются усложненная конструкция и разнесенная на два полукруга площадь сечения светового пучка на выходе из призмы.

Световой пучок, пропускаемый призмой, отражается от грани  $BD$ , расположенной под углом  $45^\circ$  к оптической оси, и от двух граней, образующих крышу над первой гранью. Пучок лучей, разделившись на ребре  $B$ , выходит из призмы и вновь соединяется в районе расположения изображения.

**Пропускание параллельных пучков лучей.** Считаем, что положение призмы в оптической системе задано сечением пучка лучей  $CE$ . Тогда легко определить сечение пучка  $d$  и расстояние  $t$  от зрачка  $QQ'$  до сечения  $CE$ . Диаметр зрачка  $D$  и угол конуса пучка  $2\omega$  известны из оптической схемы системы.

Направим в точки  $B$  и  $E$  верхней части призмы лучи  $QB$  и  $QE$ , образующие с оптической осью наибольшие углы  $\omega_1$  и  $\omega$ . Луч  $QB$  после отражения от грани  $BD$  сначала пойдет по направлению  $BA$ , затем по направлению  $AD$  и определит угол наклона  $\alpha$  входной и выходной граней призмы, а также наибольший размер  $BD$  первой отражающей грани. Луч  $QE$ , пройдя через призму, определит размер  $s$  и наименьшую длину  $BD'$  первой отражающей грани.

Угол наклона  $\alpha$  грани  $AB$  найдем, используя развертку призмы. На основании закона преломления для луча  $QB$  запишем

$$\sin(\omega_1 + \alpha) - n \sin 2\alpha = 0, \quad (296)$$

где

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{D}{2t + d \operatorname{tg} \alpha}.$$

Если

$$\operatorname{arctg} \frac{D}{2t + d \operatorname{tg} \alpha} > \omega,$$

то угол  $\omega_1$  принимаем равным  $\omega$ .

Угол  $\alpha$  сравнительно невелик, поэтому при определении размера  $a$  с достаточной степенью точности можно принять, что сечение пучка гранью  $AB$  имеет форму полукруга с радиусом

$$r = BE = \frac{d}{2 \cos \alpha}.$$

Используя зависимость (54), запишем

$$\operatorname{tg} \gamma = \cos(45^\circ - \alpha).$$

После преобразования получим

$$a = \frac{d \sqrt{3 - \sin 2\alpha}}{\sqrt{8} \cos(45^\circ - \alpha) \cos \alpha}. \quad (297)$$

Нетрудно убедиться, что треугольник  $ABD$  является равнобедренным. Тогда

$$BD = 2a \cos(45^\circ + \alpha). \quad (298)$$

Световой размер  $BD'$  найдем из треугольника  $BD'E$ :

$$BD' = \frac{d \cos(\omega' - \alpha)}{2 \cos \alpha \sin(45^\circ - \omega')}, \quad (299)$$

где

$$\omega' = \alpha + \arcsin \frac{\sin(\omega - \alpha)}{n}. \quad (300)$$

С возрастанием угла  $\omega$  увеличивается размер  $BD'$ , распространяясь в предельном случае на всю грань  $BD$ . Следовательно, неравенство

$$BD - BD' \geq 0 \quad (301)$$

будет ограничивать угловое поле призмы. Подставив в неравенство (301) ранее вычисленные величины и производя сокращения, получим

$$\frac{\sqrt{2(3 - \sin 2\alpha)} \cos(45^\circ + \alpha)}{\cos(45^\circ - \alpha)} - \frac{\cos(\omega' - \alpha)}{\sin(45^\circ - \omega')} \geq 0. \quad (302)$$

С другой стороны, угловое поле призмы ограничивает условие полного внутреннего отражения лучей от трех граней. Наименьший угол падения на грань  $BD$  имеет луч  $QB$ . Условие полного внутреннего отражения этого луча, определяемое неравенством

$$\sin(45^\circ - \alpha) \geq \frac{1}{n}, \quad (303)$$

является вторым ограничением углового поля призмы. На крышеобразные грани под наименьшим углом падает луч  $B_1L$ , показанный в сечении  $BO''$  развертки призмы (рис. 124, б). Расчеты показывают, что полное внутреннее отражение лучей от этих граней обеспечивается при выполнении неравенства (303). Исключение составляет случай, не имеющий практического интереса, когда для призмы использовано стекло с малым показателем преломления, а угол  $\omega_1$  не превышает  $30^\circ$ .

Остальные размеры призмы удобно выразить через длину хода  $l$ , которую найдем по рис. 124, б. Линия  $K'L$  является следом грани крыши на плоскости сечения. Очевидно, наименьшая длина хода  $l$  будет определяться точкой пересечения луча  $B_1L$  со следом  $K'L$ . Следовательно,  $l = K'O'' + BK'$ .

Поступая так же, как при определении угла  $\gamma$ , найдем  $\lg \beta = \sin(45^\circ - \alpha + \alpha')$ .

Выполнив подстановки и преобразования, получим

$$l = \frac{\frac{d}{2} \left( \sqrt{\frac{3 - \sin 2\alpha}{2 \cos^2 \alpha}} + \lg \alpha \lg \omega + 1 \right)}{\sin(45^\circ - \alpha + \alpha') - \lg \omega''}; \quad (304)$$

$$d' = d(1 + \lg \alpha \lg \omega) + 2l \lg \omega''; \quad (305)$$

$$BK' = BK = \frac{d \sqrt{3 - \sin 2\alpha}}{\sqrt{8} \cos \alpha \sin(45^\circ - \alpha + \alpha')}, \quad (306)$$

где

$$\sin \alpha' = \frac{\sin \alpha}{n};$$

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

Продолжим линию  $A'B'$  (см. рис. 124, а) до пересечения с нормалью  $BN'$ , проведем вспомогательную прямую  $EE'$ , параллельную нормали  $BN'$ , и опустим перпендикуляр из точки  $B'$  на продолжение линии  $GM'$ .

Из развертки призмы следует:

$$\begin{aligned} b &= BN' - BN; \\ m &= M'N' + N'E' + E'G; \\ c &= m + a - b \operatorname{tg} 2\alpha. \end{aligned} \quad (307)$$

Используя треугольники  $BN'O''$ ,  $BNA'$ ,  $BM'N'$ ,  $EE'G'$ , получим

$$b = l \cos \alpha' - a \cos 2\alpha; \quad (308)$$

$$m = l \cos \alpha' (\operatorname{tg} 2\alpha + \operatorname{tg} \epsilon') + \frac{d}{2 \cos \alpha}, \quad (309)$$

где

$$\sin \epsilon' = \frac{\sin (w - \alpha)}{n}.$$

**Пропускание сходящихся пучков лучей.** При установке призмы в сходящихся пучках лучей ее крышеобразным граням придают наклон, который обеспечивает соединение элементарного осевого пучка  $OB$ , разделенного на две части:  $BK'O'O_1$  и  $BK_2O'_2O_1$ , в центре поверхности изображения (рис. 125). Тогда наклонный элементарный пучок  $QB$  после разделения пройдет пути  $BAM_1M'_1$  и  $BA_2M_2M'_2$ . В этом случае ребро крыши образует с первой отражающей гранью некоторый угол  $\psi$ . Таким образом, лучи, проходящие через верхнюю половину призмы, строят изображение в плоскости  $O_1M'_1$ , а проходящие через нижнюю половину, — в плоскости  $O_1M'_2$ . Расчетной плоскостью изображения примем плоскость  $O_1H_0$ .

Расстояние  $e$  между следами на этой плоскости двух элементарных пучков, например  $M_1M'_1$  и  $M_2M'_2$ , прошедших через разные компоненты призмы и строящих одну точку изображения, будет определять величину двоения изображения. Использовать призму можно только при условии, если наибольшее расстояние  $q_2$  от плоскости  $O_1H_0$  до крайней точки изображения не превышает допустимую величину глубины изображения оптической системы, а наибольшая величина двоения изображения меньше допустимого предела разрешения. Условимся, что угол  $\psi$  образуется поворотом ребра крыши вокруг точки  $K$ . Длину хода  $l$  примем равной длине хода в исходной призме для параллельных пучков лучей. Тогда будут одинаковыми углы  $\alpha$ ,  $\alpha'$ , размеры  $d'$ ,  $m$ ,  $BK$  и расчетные формулы для определения этих величин. Считаем известным расстояние  $s$  от выходного зрачка  $QQ'$  до плоскости изображения при отсутствии призмы.

Длину  $s'$  определим из суммы отрезков  $s' = t + BC + BO_1$ .

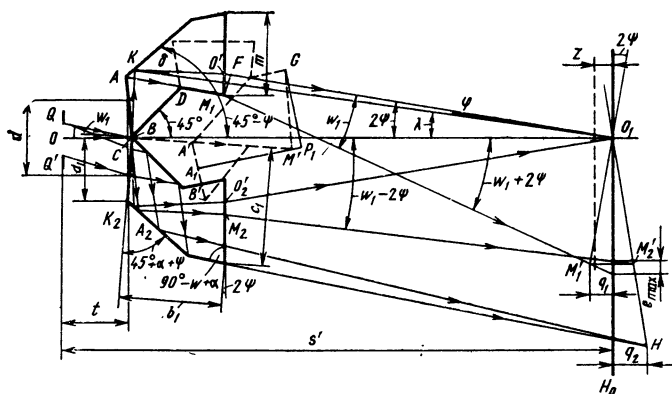


Рис. 125. Двухкомпонентная призма с крышей, установленная в сходящихся пучках лучей

С помощью треугольников  $BKO_1$  и  $KO'O_1$  найдем

$$s' = t + \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha + BK \frac{\cos(\alpha - \alpha' - \lambda)}{[\sin \lambda]}; \quad (310)$$

$$\sin \lambda = \frac{BK}{l - BK} \operatorname{ctg}(\alpha - \alpha') \sin \varphi;$$

$$\varphi = \frac{\alpha - \alpha'}{2} + \frac{\varphi - \delta}{2};$$

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi - \delta}{2} = \frac{KO' - O'O_1}{KO' + O'O_1} \operatorname{tg} \frac{\alpha - \alpha'}{2};$$

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi - \delta}{2} = \frac{t \left(1 + \frac{1}{n}\right) - BK - s + t + \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha}{l \left(1 - \frac{1}{n}\right) - BK + s + t - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha} \operatorname{tg} \frac{\alpha - \alpha'}{2}.$$

Из рис. 125 следует, что

$$2\psi = \lambda + \varphi. \quad (311)$$

Решая треугольники  $ABK$  и  $ABD$ , имеем

$$a_1 = AB = BK \frac{\sin(45^\circ - \alpha + \alpha' + \psi)}{\cos(45^\circ - \alpha - \psi)}; \quad (312)$$

$$BD = \frac{a_1 \cos 2(\alpha + \psi)}{\sin(45^\circ + \alpha + 2\psi)}. \quad (313)$$

Проведем через точки  $M'$  и  $G$  две вспомогательные прямые  $A_1P_1$  и  $P_1G$ , первая из которых перпендикулярна, а вторая парал-



лельна линии  $A'B'$ . Тогда можно записать

$$b_1 = A_1M' + M'P_1;$$

$$c_1 = A_1B' + P_1G.$$

Рассматривая треугольники  $A_1A'M'$ ,  $M'P_1G$  (см. рис. 125) и  $BN'O''$ ,  $BM'N'$  (см. рис. 124), имеем

$$b_1 = m \sin 2\psi + \left( \frac{l \cos \alpha'}{\cos 2\alpha} - a_1 \right) \cos 2(\alpha + \psi); \quad (314)$$

$$c_1 = m \cos 2\psi - \left( \frac{l \cos \alpha'}{\cos 2\alpha} - a_1 \right) \sin 2(\alpha + \psi) + a_1. \quad (315)$$

Как и в предыдущем случае, угловое поле призмы ограничивает неравенство (301). Подставив в неравенство (301) выражения (299) и (313), получим

$$\frac{\sqrt{3 - \sin 2\alpha \sin (45^\circ - \alpha + \alpha' + \psi) \cos 2(\alpha + \psi)}}{\sqrt{2} \sin (45^\circ - \alpha + \alpha') \cos (45^\circ - \alpha - \psi) \sin (45^\circ + \alpha + 2\psi)} - \frac{\cos (w' - \alpha)}{\sin (45^\circ - w')} \geq 0. \quad (316)$$

Значения  $q_2$  и  $e_{\max}$  найдем по рис. 125:

$$q_2 = \left( s \operatorname{tg} w + \frac{D}{2} \right) \sin 2\psi; \quad (317)$$

$$e_{\max} = q_1 [\operatorname{tg} (w_1 + 2\psi) + \operatorname{tg} (w_1 - 2\psi)], \quad (318)$$

где

$$q_1 = \left( s - t - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \operatorname{tg} w_1 \sin 2\psi.$$

Если оптическая система имеет глубину изображения, превышающую величину  $q_2$ , можно уменьшить двоение изображения перемещением плоскости  $O_1H_0$  в сторону призмы. Тогда появится и начнет возрастать двоение изображения в месте соединения осевых пучков  $O'O_1$ ,  $O'_2O_1$  и будет уменьшаться двоение, создаваемое пучками  $M_1M'_1$ ,  $M_2M'_2$ . При их равенстве будет обеспечено наименьшее двоение изображения по всему полю зрения, а плоскость  $O_1H_0$  сместится на расстояние  $z$ . Запишем выражения, определяющие двоение изображения в месте соединения пучков  $O'O_1$ ,  $O'_2O_1$ , и  $M_1M'_1$ ,  $M_2M'_2$ :

$$e_1 = 2z \operatorname{tg} 2\psi;$$

$$e_2 = (q_1 - z) \operatorname{tg} (w_1 + 2\psi) + (q_1 + z) \operatorname{tg} (w_1 - 2\psi). \quad (319)$$

Приравняв правые части этих равенств, получим

$$z = e_{\max} [2 \operatorname{tg} 2\psi + \operatorname{tg} (w_1 + 2\psi) - \operatorname{tg} (w_1 - 2\psi)]^{-1}. \quad (320)$$

**Габаритный расчет призмы.** Построим график (рис. 126) зависимости углов  $\alpha$  от  $2w_1$  для нескольких сортов стекол, используя выражение (296) и (303). Для тех же стекол построим второй ряд кривых, выражающих зависимость углов  $\alpha$  от максимально возможных углов конуса пропускаемого пучка лучей  $2w_{\max}$ . Расчет

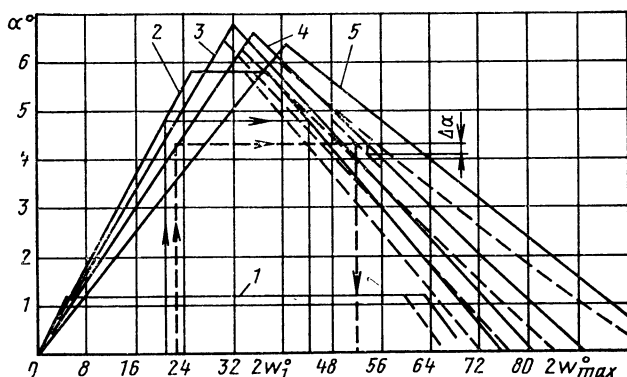


Рис. 126. Зависимость углов  $\alpha$  от  $2\omega_1$  (кривые сходятся в начале координат) и  $2\omega_{\max}$  ( $\psi=0$  — сплошные кривые,  $\psi=1^\circ$  — штриховые):

1 — стекло ЛК6; 2 — БФ8; 3 — ТФ2; 4 — ТФ10; 5 — СТФ11

выполним с помощью выражений (302), (316), в которых приравняем обе части, и равенства (300).

Ниспадающая ветвь кривой 1 и соответствующая ей штриховая линия не доходят до оси абсцисс вследствие ограничения угла конуса допускаемого пучка условием полного внутреннего отражения лучей от крышеобразных граней.

Из графика следует, что с уменьшением углов  $\omega_1$ ,  $\psi$  и возрастанием показателя преломления стекла  $n$  угловое поле призмы увеличивается. Отметим, что при уменьшении угла  $\omega_1$ , что достигается удалением призмы от зрачка  $QQ'$ , габариты призмы увеличиваются.

С возрастанием угла  $\psi$  кривые  $\dot{\alpha} = \Phi(2\omega_{\max})$  смещаются вниз, причем величина смещения практически одинакова по всей их длине и не зависит от сорта стекла. Вычисления показывают, что с достаточной степенью точности можно построить кривые для любых значений угла  $\psi$  путем уменьшения ординат исходных кривых для угла  $\psi=0$  на величину

$$\Delta\alpha = 0,55\psi. \quad (321)$$

Рассмотрим порядок определения размеров призмы для параллельных пучков лучей. Угол  $\alpha$  имеет малую величину, не превышающую  $7^\circ$ , поэтому его значение можно найти следующим приближенным методом. Вычисляют угол  $\omega_0$ , используя формулу  $\operatorname{tg} \omega_0 = D/2t$ .

Затем выбирают стекло и на оси абсцисс графика (см. рис. 126) откладывают значение угла  $2\omega_0$ . Из этой точки восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей выбранному стеклу и проходящей через начало координат. Обозначая ординату точки пересечения углом  $\alpha_0$ , вычисляют угол  $\omega_1$ :

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{D}{2(t + d \operatorname{tg} \alpha_0)}.$$

Поступая так же, как при определении угла  $\alpha_0$ , находят угол  $\alpha$  по величине  $2\omega_1$ .

Из точки с полученными координатами  $2\omega_1$  и  $\alpha$  проводят горизонталь до пересечения с соответствующей ниспадающей ветвью кривой, опускают перпендикуляр на ось абсцисс и считывают максимально возможный угол конуса пучка  $2\omega_{\max}$ , который может пропустить призма при выбранных расположении и сорте стекла. Последовательность этих операций показана на графике сплошными линиями со стрелками.

Если на графике нет кривой для выбранного стекла с показателем преломления  $n$ , то при определении углов  $\alpha$  ( $\alpha_0$ ),  $2\omega_{\max}$ , используют две кривые для стекол, показатели преломления которых  $n_2$  и  $n_3$  имеют величины, наиболее близкие к  $n$ . При этом должны удовлетворяться неравенства  $n_2 < n < n_3$ .

По двум кривым и полученному значению  $2\omega$ , ( $2\omega_0$ ) находят углы  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и вычисляют угол  $\alpha$  по следующей интерполяционной формуле:

$$\alpha = \alpha_2 - \frac{n - n_2}{n_3 - n_2} (\alpha_2 - \alpha_3).$$

Проводят горизонталь с ординатой, равной значению  $\alpha$ ; в точках ее пересечения с ниспадающими ветвями соответствующих кривых считают углы  $2\omega_2$ ,  $2\omega_3$  и определяют угол  $\omega_{\max}$  по формуле

$$\omega_{\max} = \omega_2 + \frac{n - n_2}{n_3 - n_2} (\omega_3 - \omega_2).$$

Может оказаться, что  $2\omega_{\max} < 2\omega$ , т. е. призма не пропускает данный пучок лучей. В этом случае следует подобрать другое стекло с большим показателем преломления или пойти на увеличение габаритов призмы — отодвинуть ее от зрачка  $QQ'$  (см. рис. 124) и тем самым уменьшить угол  $\omega_1$ .

После определения угла  $\alpha$  и проверки углового поля призмы вычисляют ее размеры и длину хода луча, используя полученные формулы.

При определении размеров призмы для сходящихся пучков лучей угол  $\alpha$  находят так же, как в предыдущем случае. Затем по формуле (311) вычисляют угол  $\psi$  и проводят на графике горизонталь с ординатой, равной углу  $\alpha$ . С помощью того же графика определяют угол  $2\omega_{\max}$  при  $\psi=0$ , его значение откладывают на горизонталь и от этой точки отсчитывают вниз величину  $\Delta\alpha$ , которую находят по формуле (321).

Через полученную точку проводят прямую, параллельную близлежащему участку соответствующей кривой для  $\psi=0$ , до пересечения с горизонталью. Из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс и считают значение  $2\omega_{\max}$  для данной величины угла  $\psi$ . Порядок действий показан на графике штриховыми линиями со стрелками.

Далее проверяют качество изображения, создаваемое оптической системой с призмой. Для этого вычисляют расстояния  $q_2$ ,  $z$  и величину двоения изображения, которые сравнивают с допустимыми величинами глубины изображения и предела разрушения. Если результаты положительны, определяют размеры призмы и длину  $s'$ .

## 6. РАВНОБЕДРЕННАЯ ПРИЗМА ПРЯМОГО ЗРЕНИЯ

Зависимость размеров призмы от величины пропускаемого пучка. Призма [8] (см. рис. 12) одинакова по форме и числу отражений с призмой Шмидта, но в отличие от последней устанавливается так, чтобы ее основание  $AC$  было параллельно осевому лучу пропускаемого светового пучка. Призма разворачивается в наклонную плоскопараллельную пластинку (рис. 127).

Диаметр  $d$  сечения конусного пучка лучей определяется в плоскости, перпендикулярной оптической оси и проходящий через точку пересечения крайнего луча  $OE$  с гранью  $AB$ . Наименьшие габариты призма будет иметь при прохождении луча  $LL'$  через точку  $P$ . При этом в соответствии с характером работы призмы должно соблюдаться равенство расстояний  $a$  от нижней грани  $AC$  до оси симметрии пучка перед призмой и после нее. Следует иметь в виду что осевой луч  $OD$  по выходе из призмы не совпадает с осью симметрии пучка  $O'D'$  из-за астигматизма призмы.

Для определения величины основания  $b$  и диаметра сечения пучка лучей  $d'$  на выходе из призмы проведем вспомогательную прямую  $EG$ , параллельную лучу  $LL'$  и составим равенства

$$\left. \begin{aligned} AD &= AB - BL - LE + ED = A'L' + L'D; \\ L'E' &= E'G + GL'; \quad EG = LL' = LP + PL'. \end{aligned} \right\} \quad (322)$$

Определим значения отрезков:

$$\left. \begin{aligned} AB &= \frac{b}{2 \sin \alpha}; \\ LE &= GL' = \frac{d \cos w}{\cos(\alpha + w)}; \\ A'L' &= \frac{b \sin(\alpha - \epsilon'_2)}{\cos \epsilon'_2}; \\ d' &= L'E' \frac{\cos(\alpha - w)}{\cos w}; \\ E'G &= EG \frac{\sin(\sin \epsilon'_2 - \epsilon'_1)}{\cos \epsilon'_1}; \\ PL' &= \frac{b \cos \alpha}{\cos \epsilon'_2}; \\ ED &= \frac{d}{2 \cos \alpha}; \\ L'D' &= \frac{d'}{2 \cos \alpha}; \\ LP &= \frac{2b \cos \alpha \cos 2\alpha}{\cos \epsilon'_2}; \end{aligned} \right\} \quad (323)$$

где  $\epsilon'_1, \epsilon'_2$  — углы преломления лучей  $OE$  и  $OL$ .

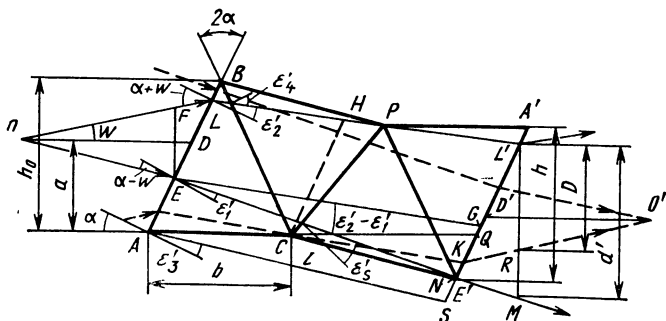


Рис. 127. Развертка равнобедренной призмы прямого зрения

После подстановки найденных выражений в равенства (322), (323) и преобразования получим

$$b = \frac{2 \cos \epsilon'_1}{(I_2 - I_1 - I_3) \cos \alpha} \cdot \frac{d \cos (\alpha - w)}{\cos (\alpha + w)}; \quad (324)$$

$$d' = I_1 \frac{b \cos \alpha}{\cos \epsilon'_2} + \frac{d \cos (\alpha - w)}{\cos (\alpha + w)}; \quad (325)$$

$$\text{где } I_1 = \frac{\sin (\epsilon'_2 - \epsilon'_1) \cos (\alpha - w)}{\cos \epsilon'_1 \cos w} (1 + 2 \cos 2\alpha);$$

$$I_2 = \frac{\cos \epsilon'_2 - \cos (4\alpha - \epsilon'_2)}{\sin \alpha};$$

$$I_3 = 2 \sin (\alpha - \epsilon'_2);$$

$$\sin \epsilon'_1 = \frac{\sin (\alpha - w)}{n};$$

$$\sin \epsilon'_2 = \frac{\sin (\alpha + w)}{n}.$$

Вычислим остальные размеры призмы:

$$2a = 2AD \cos \alpha = I_2 \frac{b \cos \alpha}{\cos \epsilon'_2} - \frac{d \cos (\alpha - w)}{\cos (\alpha + w)}; \quad (326)$$

$$h_0 = \frac{1}{2} b \operatorname{ctg} \alpha; \quad (327)$$

$$h = (A'L' + GL' + E'G) \operatorname{csc} \alpha.$$

Из выражения (324) определим значение  $d$  и выполним подстановку в последнем равенстве. В результате получим

$$h = \frac{b \cos^2 \alpha \cos w}{2 \cos \varepsilon'_2 \cos (\alpha - w)} (I_1 + I_2 + I_3 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w). \quad (328)$$

Расстояние  $h$  от основания призмы до места выхода крайнего луча  $E'M$  не должно превосходить расстояние  $h_0$  от основания призмы до ее вершины. Это условие запишется неравенством  $h \leq h_0$  или

$$\frac{b \operatorname{ctg} \alpha}{4} \left[ 2 - \frac{\sin 2\alpha \cos w}{\cos \varepsilon'_2 \cos (\alpha - w)} (I_1 + I_2 + I_3 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} w) \right] \geq 0. \quad (329)$$

Для определения длины хода луча  $l$  проведем вспомогательную прямую  $CQ$ , являющуюся продолжением прямой  $AC$ , и прямую  $AS$ , параллельную преломленному лучу, идущему перед призмой по направлению  $OD$ . Решая треугольники  $AQS$  и  $CQN$ , получим

$$l = AS = (b + CQ) \frac{\cos \alpha}{\cos \varepsilon'_3};$$

$$CQ = 2b \cos 2\alpha.$$

Тогда

$$l = \frac{b \cos \alpha}{\cos \varepsilon'_3} (1 + 2 \cos 2\alpha), \quad (330)$$

где

$$\sin \varepsilon'_3 = \frac{\sin \alpha}{n},$$

$\varepsilon'_3$  — угол преломления луча  $OD$ .

**Оптимальные и предельные значения углов между гранями.** Принцип действия призмы основан на том, что все лучи пропускаемого пучка испытывают в ней трехкратное отражение, причем на боковых гранях  $AB$  и  $BC$  — обязательно полное внутреннее отражение. Под наименьшим углом к боковым граням падает после преломления луч  $OL$ , а на основание — луч  $OE$ . Следовательно, условие полного внутреннего отражения лучей на боковых гранях запишется следующим неравенством:

$$\sin \varepsilon_4 = \sin \left( 2\alpha - \arcsin \frac{\sin (\alpha - w)}{n} \right) \geq \frac{1}{n}, \quad (331)$$

где  $\varepsilon_4$  — угол падения луча  $OL$  на грань  $BC$ .

Соответственно для обеспечения полного внутреннего отражения на основании  $AC$  необходимо соблюдение неравенства

$$\sin \varepsilon_5 = \cos \left( 3\alpha - \arcsin \frac{\sin (\alpha - w)}{n} \right) \geq \frac{1}{n}, \quad (332)$$

где  $\varepsilon_5$  — угол падения луча  $OE$  на основание  $AC$ .

Если это условие не выполняется, то на основании  $AC$  должно быть нанесено отражающее покрытие.

При уменьшении угла  $\alpha$  угол падения лучей на внутренние стороны боковых граней уменьшается, а на основание — увеличивается. Следовательно, при равенстве обеих частей выражения (331) угол  $\alpha$  принимает наименьшее из возможных значение. При равенстве в выражении (332) угол  $\alpha$  принимает наибольшую величину, при которой еще обеспечивается полное внутреннее отражение лучей от основания призмы.

Рассматривая равенства (327) и (328), можно убедиться, что с увеличением угла  $\alpha$ , по крайней мере в пределах  $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ , высота  $h_0$  при заданных значениях  $d$  и  $w$  уменьшается, а размер  $h$  увеличивается. Максимальное значение из возможных угол  $\alpha$  принимает при равенстве  $h_0 = h$ . Используя выражение (329), получим следующее уравнение, определяющее угол  $\alpha_{\max}$ :

$$2 - \frac{\sin 2\alpha_{\max} \cos w}{\cos \epsilon'_2 \cos (\alpha_{\max} - w)} (I_1 + I_2 + I_3 \operatorname{tg} \alpha_{\max} \operatorname{tg} w) = 0. \quad (333)$$

Непосредственное вычисление  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$  усложняется тем, что зависимость  $\alpha$  от  $w$  и  $n$  выражена не в явном виде. Те же трудности возникают при определении пределов значений угла  $\alpha_0$ , при которых обеспечивается полное внутреннее отражение лучей от основания призмы.

Эти обстоятельства усложняют подбор угла  $2\alpha$  и марки стекла. Для облегчения операции подбора построим графики функций

$$\alpha_{\min} = \Phi(w, n); \quad \alpha_{\max} = F(w, n); \quad \alpha_0 = f(w, n),$$

используя выражения (331) — (333) и выполняя вычисления на ЭВМ.

На рис. 128 каждая область, заключенная между контурными кривыми для одинаковых углов  $w$ , определяет возможные значения угла  $\alpha$  и показателя преломления стекла призмы  $n$ . В пределах областей, ограниченных штриховыми линиями и контурными с большим наклоном, находятся значения  $n$  и угла  $\alpha$ , при которых

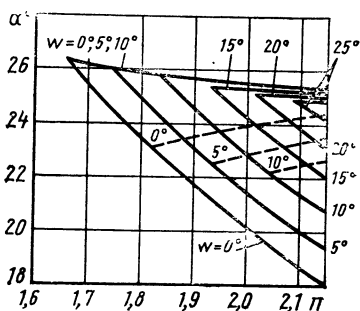


Рис. 128. Зависимость углов  $\alpha_{\max}$  (кривые с малым наклоном),  $\alpha_{\min}$  (кривые с большим наклоном) и  $\alpha_0$  (штриховые линии) от показателя преломления стекла  $n$

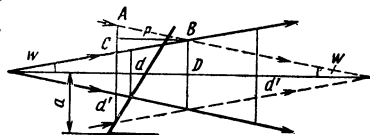


Рис. 129. Входная грань призмы, расположенной симметрично узкой части пучка

обеспечивается полное внутреннее отражение лучей от основания призмы.

График, показанный на рис. 128, облегчает подбор стекла призмы и величины угла  $\alpha$ , дает наглядное представление о зависимости  $\alpha$  от  $n$  и  $w$ . График показывает, что для призм можно использовать только весьма ограниченное количество сортов стекол, у которых  $n_e \geq 1,6776$  (ТФ2). Максимальный угол конуса пропускаемого пучка увеличивается с увеличением угла  $\alpha$  и показателя преломления  $n$  и при максимальных углах  $\alpha_{\max}$  лежит в пределах от  $2^\circ$  (стекло ТФ2) до  $46^\circ 30'$  (стекло СТФ11).

Исследуя выражение (330) в интервале возможных значений  $\alpha$  и  $n$ , можно убедиться, что длина хода луча в призме уменьшается с увеличением угла  $\alpha$ . Следовательно, призма будет иметь минимальные габариты при наибольшей величине угла  $\alpha$ .

**Габаритный расчет призмы.** Расчет призмы начинают с определения марки стекла и угла  $2\alpha$  по заданному значению угла конуса пропускаемого пучка  $2w$  при помощи графика на рис. 128. По найденным значениям показателя преломления  $n$  и угла  $\alpha$  и заданному диаметру  $d$  сечения светового пучка вычисляют длину основания призмы  $b$ , ее высоту  $h_0$  и размеры  $a$ ,  $h$ , используя формулы (324), (326) — (328).

При конструировании оптических приборов бывают случаи, когда призма устанавливается в пучке лучей, наружная поверхность которого образует два круговых усеченных конуса с общим малым основанием (рис. 129). Очевидно, наименьшие размеры призма будет иметь при ее размещении симметрично плоскости малого основания конусов пучка. При этом входная грань призмы должна располагаться в строго определенном месте. Здесь нельзя уже задавать положение входной грани и принимать за исходные данные для расчета соответствующий этому положению диаметр сечения пучка лучей  $d$ . Для рассматриваемого случая в качестве заданной величины удобно взять диаметр малого основания усеченных конусов пучка лучей  $D$ .

Определим размеры призмы, используя величину  $D$ . На рис. 127 изобразим штриховыми линиями второй конус, равный конусу пучка лучей, показанному сплошными линиями. Проведем вспомогательную прямую  $CH$ , параллельную грани  $AB$ . Из треугольников  $CHP$  и  $KL'R$  найдем

$$b = CP = CH \frac{\cos \varepsilon_2'}{\sin (3\alpha - \varepsilon_2')};$$

$$CH = KL' = \frac{D \cos w}{\cos (\alpha + w)}.$$

После подстановки получим

$$b = \frac{D \cos w \cos \varepsilon_2'}{\cos (\alpha + w) \sin (3\alpha - \varepsilon_2')}. \quad (334)$$

Для определения размера  $d'$  подставим в формулу (325) значение диаметра  $d$ , которое найдем из выражения (324). После пре-



образований получим

$$d' = \frac{b \cos \alpha}{2 \cos \varepsilon_2'} (I_1 + I_2 - I_3). \quad (335)$$

Используя ту же подстановку в формуле (326), запишем

$$a = \frac{b \cos \alpha}{4 \cos \varepsilon_2'} (I_1 + I_2 + I_3). \quad (336)$$

Величины  $h_0$  и  $h$  вычисляют по формулам (327) и (328). Положение входной грани призмы относительно пучка лучей определяется размером  $p$  (см. рис. 129), который найдем из треугольника  $ABC$ :

$$p = \frac{d' - D}{2 \operatorname{tg} \omega}. \quad (337)$$

Может оказаться, что по конструктивным соображениям призму не удастся разместить строго посередине узкой части пучка, тогда приходится задавать положение входной грани. Затем вычисляют расстояние  $p$  по формуле (337) и сравнивают его с действительным расстоянием  $p'$  до входной грани. Если разность  $p - p' > 0$ , то вычисления производят для одного конического пучка, используя заданную величину диаметра  $d$ .

При разности  $p - p' < 0$  расчет ведут также для одного конического пучка, но в качестве исходных данных принимают вместо диаметра  $d$  диаметр  $d'$ , опирающийся на входную грань. В этом случае с помощью формулы (325) определяют величину диаметра  $d$  и, пользуясь этой величиной, проводят дальнейшие расчеты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. М.: Изд-во. МГУ, 1961. 210 с.
2. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973. 488 с.
3. Гальперн Д. Ю., Нефедов Б. Л. О возникновении рассеянного света в оптических приборах и способы его устранения. — Оптико-механическая промышленность, 1953, № 6, с. 36—44.
4. Гончаренко Е. Н., Осипова Л. П. Призма с тремя отражениями. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 1, с. 21—22.
5. Грейм И. А., Стендер П. В. Расчет систем плоских зеркал. Л.: СЗПИ, 1968. 111 с.
6. Кожевников Ю. Г. Просветный растровый экран. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 4, с. 23—26.
7. Кожевников Ю. Г. Габаритный расчет отражательных призм, пропускающих конические пучки лучей. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 5, с. 29—32.
8. Кожевников Ю. Г. Равнобедренная призма прямого зрения, пропускающая конический пучок лучей. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 2, с. 19—22.
9. Кожевников Ю. Г., Дорофеева М. В. Призмы с прямой линией визирования и увеличенным полем зрения. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 2, с. 17—21.
10. Кожевников Ю. Г. Призма прямого зрения с разделением хода лучей. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 8, с. 28—30.
11. Кожевников Ю. Г., Дорофеева М. В. Юстировка двухкомпонентной призмы прямого зрения. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 9, с. 41—44.
12. Кожевников Ю. Г., Дорофеева М. В. Юстировка трехкомпонентной призмы прямого зрения. — Оптико-механическая промышленность, 1975, № 1, с. 46—49.
13. Кожевников Ю. Г. Оптические призмы. М.: Машиностроение, 1975. 192 с.
14. Контиевский Ю. П. Нониальное визирование. — Оптико-механическая промышленность, 1965, № 7, с. 6—7.
15. Мальцев М. Д. Расчет допусков на оптические детали. М.: Машиностроение, 1974. 169 с.
16. Можаров Г. А., Филатов В. С. Трехгранная равнобедренная отражательная призма. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 4, с. 30—32.
17. Нефедов Б. Л. Новый бинокль большого увеличения. — Оптико-механическая промышленность, 1958, № 8, с. 31—34.

18. Нефедов Б. Л. Методы решения задач по вычислительной оптике. М.: Машиностроение, Ленингр. отд. 1966. 264 с.
19. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. М.: Машиностроение, Ленингр. отд. 1968. 292 с.
20. Погарев Г. В. Оптические юстировочные задачи. М.: Машиностроение, Ленингр. отд. 1974. 223 с.
21. Полякова И. П. Использование автоматической программы для расчета и исследования призмённых систем. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 12, с. 17—20.
22. Пошехонов Б. Л. Графоаналитическая геометрия в применении к оптическим задачам. М.: Машиностроение. Ленингрд. отд. 1967. 158 с.
23. Русинов М. М. Габаритные расчеты оптических систем. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 400 с.
24. Русинов М. М. Юстировка оптических приборов. М.: Недра, 1969. 326 с.
25. Серафимов Е. Б. К теории отражательных призм — «Оптико-механическая промышленность», 1964, № 8, с. 45—46.
26. Слюсарев Г. Г. Методы расчетов оптических систем. М.: Машиностроение, Ленингр. отд. 1969. 670 с.
27. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М., Машиностроение, 1965. 362 с.
28. Филатов В. С., Можаров Г. А. Эффект линейного перемещения некоторых отражательных призм — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 9, с. 74—75 с ил.
29. Филатов В. С., Можаров Г. А. Призмённая оборачивающая система. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 12, с. 62—63 с ил.
30. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.: Машиностроение, Ленингрд. отд. 1966, 564 с.
31. Чуриловский В. Н., Халилулин К. А. Теория и расчет призмённых систем. М.: Машиностроение, Ленингрд. отд. 1979. 270 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Приемы конструирования</b> . . . . .	6
1. Перечень свойств и приемов конструирования призм и призмённых систем . . . . .	6
2. Базовые и производные призмы . . . . .	8
3. Использование явления полного внутреннего отражения . . . . .	13
4. Призмённые системы и составные призмы . . . . .	14
5. Разделение хода лучей . . . . .	24
6. Пространственный ход лучей . . . . .	28
7. Деформирование призм при сохранении угла отклонения лучей . . . . .	30
8. Деформирование призм с изменением угла отклонения лучей . . . . .	31
9. Изменение положения призмы относительно падающего светового пучка . . . . .	32
10. Исключение клина в составных призмах . . . . .	32
11. Использование разного числа отражений при получении одного изображения . . . . .	33
12. Использование призм для изменения глазного базиса и внутренней фокусировки изображения . . . . .	35
13. Использование преломляющих свойств призм при получении изображений . . . . .	36
<b>Глава II. Методы исследования призм и призмённых систем</b> . . . . .	44
1. Использование лучей, не пропускаемых реальной призмой . . . . .	46
2. Развертка призм . . . . .	47
3. Приведение или редуцирование развертки призмы к воздуху . . . . .	49
4. Определение размеров призм с крышами . . . . .	51
5. Определение оптимальных углов между гранями . . . . .	64
6. Выявление оптимального расположения призмы относительно конического пучка лучей . . . . .	66
7. Влияние угла отклонения лучей на габариты призмы и предельные значения этого угла . . . . .	68
8. Выявление вредных отражений . . . . .	71
9. Влияние призм на виньетирование пропускаемых пучков лучей . . . . .	74
10. Влияние призм на габаритный ход лучей . . . . .	76
11. Приведение призм к эквивалентному зеркалу . . . . .	78
12. Влияние погрешностей изготовления углов призм на отклонение лучей и качество изображения . . . . .	82
13. Действие подвижек призм и их компонентов . . . . .	87

<b>Глава III. Расчет призм</b> . . . . .	96
1. Общие соображения . . . . .	96
2. Габаритный расчет призм, развертывающихся в перпендикулярную плоскопараллельную пластинку . . . . .	98
3. Двухкомпонентная призма . . . . .	104
4. Трехкомпонентная призма, предложенная М. М. Русиновым . . . . .	116
5. Двухкомпонентная призма с крышей . . . . .	131
6. Равнобедренная призма прямого зрения . . . . .	139
Список литературы . . . . .	145

**ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЗМЫ.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ, РАСЧЕТ**

**Юрий Георгиевич Кожевников**

Редактор **Л. К. Тучкова**  
Художественный редактор **С. С. Водчиц**  
Технический редактор **Т. С. Старых**  
Корректор **А. П. Сизова**

**ИБ № 3827**

---

Сдано в набор 06.07.83. Подписано к печати 17.01.84. Т-01524. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,98. Усл. кр.-отт. 8,4. Уч.-изд. л. 9,77. Тираж 4000 экз. Заказ 588. Цена 50 к.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромынский пер., 4

---

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

**НОВЫЕ КНИГИ  
ПО ПРИБОРОСТРОЕНИЮ**

*Выпуск 1984 года*

**Бабаев А. А.** Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. 16 л., ил. 80 к. (По подписке).

**Бальмонт В. Б., Матвеев В. А.** Опоры качения приборов. 15 л., ил. (Б-ка приборостроителя), 95 к.

**Выскуп В. Г., Розов Б. С., Савельев В. И.** Прецизионные цифровые системы автоматического управления. 10 л., ил. 55 к.

**Герасимов Б. И.** Проектирование аналитических приборов для контроля состава и свойств веществ. 10 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 55 к.

**Иванов Ю. П., Синяков А. Н., Филатов И. В.** Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: Учеб. пособие для вузов/Под ред. В. А. Боднера. 16 л., ил. 55 к.

**Иванова Т. А., Кирилловский В. К.** Проектирование и контроль оптики микроскопов. 16 л., ил. В пер.: 1 р. 20 к.

**Крутоголов В. Д., Кулаков М. В.** Ротационные вискозиметры. 10 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 55 к.

**Матвеев В. И.** Отсчетные устройства приборов и систем. 10 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 55 к.

**Нешумова К. А.** Периферийные устройства ЭВМ: Учебник для техникумов по специальности «Электронно-вычислительные машины, приборы и устройства». 20 л., ил. В пер.: 95 к.

**Парфенов Е. М.** Электромеханические модули точного приборостроения. 10 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 55 к.

**Петропавловский В. П., Сеницын Н. В.** Фазовые цифровые преобразователи угла. 10 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 55 к.

**Самсаев Ю. А.** Вибрации приборов с опорами качения. 9 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 50 к.

**Средства контроля винтовых пружин сжатия/**  
Н. М. Бобин, Е. А. Голованов, Ш. И. Гагуа и др. 7 л.,  
ил. (Б-ка приборостроителя). 40 к.

**Трубка С. В.** Расчет двухлинзовых склеенных объек-  
тивов: Справочник. 12 л., ил. 65 к.

**Шульман М. Я.** Фотоаппараты. 10 л., ил. 55 к.

**Юдич М. З.** Аналоговые сравнивающие устройства.  
8 л., ил. (Б-ка приборостроителя). 45 к.

*По всем вопросам приобретения новых книг, в том  
числе оформления предварительных заказов и подписки  
читателям следует обращаться непосредственно в мест-  
ные магазины, распространяющие техническую литера-  
туру, а также в специализированные магазины — опор-  
ные пункты издательства «Машиностроение».*

## ***Уважаемый читатель!***

С целью получения информации о качестве наших изданий просим Вас в прилагаемой анкете подчеркнуть позиции, соответствующие Вашей оценке этой книги.

**1. Необходимость издания:**

значительная  
незначительная

**2. Эффективность книги с точки зрения практического вклада в отрасль:**

высокая  
незначительная

**3. Эффективность книги с точки зрения теоретического вклада в отрасль:**

высокая  
незначительная

**4. Материал книги соответствует достижениям науки и техники в данной отрасли:**

в полной мере  
частично  
слабо

**5. Книга сохранит свою актуальность:**

1—2 года  
в течение 5 лет  
длительный срок

**6. Название книги отвечает содержанию:**

в полной мере  
частично

**7. Оформление книги:**

хорошее  
удовлетворительное



Фамилия, имя, отчество \_\_\_\_\_

Ученое звание \_\_\_\_\_

Место работы, должность \_\_\_\_\_

Стаж работы \_\_\_\_\_

Дополнительные замечания приложите отдельно.

Благодарим Вас за помощь издательству.

Заполненную анкету вышлите по адресу:  
107076, Москва, Стромынский пер., 4,  
ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Машиностроение»  
**Ю. Г. Кожевников**

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЗМЫ

Линия отреза

50 коп.

