

ГАБАРИТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М. М. РУСИНОВ

# ГАБАРИТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ

М. М. РУСИНОВ

# ГАБАРИТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Второе переработанное издание



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГЕОЛОГИИ И ОХРАНЕ НЕДР  
МОСКВА 1963



Scan AAW

### АННОТАЦИЯ

Книга посвящена вопросам разработки габаритных схем оптических приборов различного назначения, предназначенных, главным образом, для работы совместно с глазом.

В ней рассмотрены общие вопросы геометрической оптики; приведены габаритные расчеты основных конструктивных элементов, из которых составляются сложные оптические системы, и выведены основные закономерности, необходимые при расчетах габаритов оптических систем. Кроме того, рассмотрен ряд конструкций различных отражательных призм и некоторых конструктивных узлов с примерами расчетов для них.

В книге содержится также ряд сведений об аберрациях оптических систем; даются сведения о выявлении и устранении паразитных засветок изображения; приводятся приемы расчетов некоторых допусков на изготовление и сборку оптических систем.

В приложениях даны наборы объективов и окуляров, позволяющие выполнять подбор их для оптических систем средней сложности без специального аберрационного расчета.

Книга рассчитана на конструкторов, занимающихся разработкой оптических приборов, оптиков-вычислителей, а также может быть полезна студентам-дипломантам оптико-механических факультетов высших и средних учебных заведений.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние десятилетия разработаны различные технические приемы и конструкции, в значительной мере способствующие усовершенствованию оптических приборов и более полному использованию имеющихся для этого возможностей.

Разработкой оптических приборов начинает заниматься все более и более широкий круг лиц; однако литература по этому вопросу за последние 20—25 лет ничем не обогатилась, если не считать отдельных журнальных статей.

Отсутствие этой литературы особенно ощущается при работе над дипломным проектированием студентов оптических факультетов высших и средних технических учебных заведений.

Все это говорит о необходимости создания учебного пособия или монографии, посвященных вопросам габаритного расчета оптических систем, в которых в той или иной мере были бы отражены достижения последних лет.

Попытке решения этой задачи и посвящена настоящая работа.

Первое издание книги состояло из четырех частей. В первой части были приведены общие сведения из теории оптических приборов, необходимые для развития специальных разделов; однако некоторые вопросы, как, например, о виньетировании, излагаемые обычно в рамках общей теории, были перенесены во вторую часть.

Во второй части были изложены вопросы о суммировании аберраций в оптической системе, состоящей из ряда последовательно расположенных и самостоятельно скорректированных компонентов.

В отличие от обычно принятого изложения материалов по габаритным расчетам круглой оптики в первом издании учитывалось аберрационное виньетирование и влияние дисторсии отдельных компонентов системы (в частности, дисторсия объективов и окуляров).

Третья часть книги содержала габаритные расчеты призм, встречающихся в оптических приборах; в этой части были приведены точные формулы, учитывающие углы преломления лучей.

В четвертой, последней, части книги были даны материалы, позволяющие по произведенному габаритному расчету подобрать конкретные компоненты рассчитываемой оптической системы (объектив, линзы оборачивающих систем, окуляр).

С этой целью в приложениях были даны наборы окуляров, применяющихся в оптико-механической промышленности; кроме того, для подбора объективов и линз оборотных систем был специально разработан набор линз, склеенных из двух стекол, позволяющий путем несложных вычислений получать отдельные компоненты с теми аберрациями, которые необходимы для получения удовлетворительного качества изображения.

В этой же части были приведены основы методики расчета склеенных объективов, разработанной профессором доктором физико-математических наук Г. Г. Слюсаревым.

Так как первое издание книги «Габаритные расчеты оптических систем» по выходе в свет было подвергнуто обсуждению на расширенном заседании Ученого совета оптического факультета Ленинградского института точной механики и оптики, в результате пожеланий, высказанных при обсуждении первого издания, в книгу внесены следующие дополнения и изменения.

Введена новая, XVI глава, — «О расчете допусков»; заново написана V глава — «Учение об аберрациях»; в эту главу включены вопросы о связи между волновыми и геометрическими аберрациями, приведены приближенные формулы для аберраций третьего порядка (формулы Зейделя), рассмотрено влияние дисторсии на изменение астигматизма при перефокусировке окуляра.

Значительно дополнена IV глава; в нее включена таблица, выражающая зависимость между линейным виньетированием и виньетированием по площади; в этой же главе приведен пример определения виньетирования и экранирования для зеркальной системы Кассегрена.

VII глава дополнена примером расчета габаритной схемы оптики стереокомпаратора с изменением расстояния между линзами и подбора оптических элементов системы из набора склеенных объективов. Из приложений исключены таблицы профессора Слюсарева для расчета двухлинзовых склеенных объективов, но расширен заранее рассчитанный набор объективов, практически обеспечивающий подбор нужных элементов лишь с производством пропорционального пересчета на заданное фокусное расстояние.

VIII глава дополнена рассмотрением трехкомпонентных систем переменного увеличения; XV глава дополнена примером рассмотрения паразитных изображений, возникающих в остекленных головках зрительных труб с визирными призмами.

Кроме того, в другие разделы книги внесен ряд более мелких дополнений и исправлений.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Е. Г. Яхонтову, принявшему на себя труд по редактированию и второго издания книги «Габаритные расчеты оптических систем»; Т. А. Козневой, выполнившей на электронной вычислительной машине расчеты расширенного набора склеенных объективов, и Л. М. Кочкиной, подготовившей чертежи и рукопись к изданию.

*ЧАСТЬ ПЕРВАЯ*

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ИЗ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

---

Глава I

**ОСНОВАНИЯ ТЕОРИИ СОЛИНЕЙНОГО СРОДСТВА**

**§ 1. Основные положения. Правила знаков**

Работа оптического прибора — будь то зрительная труба, микроскоп или фотографический объектив — сводится к получению того или иного изображения, более или менее подобного наблюдаемому предмету; при этом создаваемое оптическим прибором изображение будет определенным образом расположено в пространстве. Идеализируя предмет, как множество точек, принадлежащее некоторому пространству, можем представить себе изображение, как совокупность точек, определенным образом связанных с точками первого пространства, но принадлежащих уже некоторому другому пространству.

При этом каждому лучу, выходящему из какой-нибудь точки предмета, соответствует один определенный луч, проходящий через сопряженную точку.

Таким образом, работа оптического прибора может быть приведена к решению некоторой геометрической задачи — задачи установления зависимостей между взаимным расположением сопряженных одна другой точек, принадлежащих двум сопряженным пространствам.

В геометрии эта задача известна под наименованием теории коллинеарных преобразований; в теории оптических приборов эта задача обычно именуется теорией солинейного сродства.

Следовательно, теория солинейного сродства занимается изучением соотношений между элементами двух пространств (пространства предметов и пространства изображений), удовлетворяющих следующим положениям:

1. Каждой прямой одного пространства соответствует одна и только одна прямая в другом пространстве (сопряженные прямые), и каждой точке одного пространства соответствует одна и только одна сопряженная точка в другом пространстве.

Это положение может быть сформулировано более сжато следующим образом: каждому гомоцентрическому пучку прямых (пересекающихся в одной точке) в одном пространстве соответствует гомоцентрический пучок в другом пространстве.

Из этого положения следует, что каждой плоскости одного пространства соответствует одна и только одна плоскость другого пространства. Действительно, двум пересекающимся прямым, определяющим однозначно положение некоторой плоскости в одном пространстве, должны соответствовать две пересекающиеся прямые в другом пространстве, точно так же однозначно определяющие положение некоторой плоскости.

2. Ниже будут рассматриваться центрированные системы, имеющие наибольшее практическое значение. Они обладают следующими общими свойствами.

В обоих пространствах существуют две оси симметрии, сопряженные одна другой. Из этого положения следует, что плоскости, перпендикулярной оси в одном пространстве, соответствует плоскость, перпендикулярная оси в другом пространстве. Действительно, если бы плоскости, перпендикулярной оси (определяемой точками, расположенными симметрично относительно оси) в одном пространстве, соответствовала плоскость, не перпендикулярная оси в другом пространстве, то тем самым во втором пространстве было бы нарушено условие симметрии.

3. Повороту меридиональной плоскости в одном пространстве (плоскости, проходящей через ось симметрии) на некоторый угол соответствует поворот сопряженной ей плоскости (меридиональной) в другом пространстве на тот же угол.

Прежде чем переходить к дальнейшему развитию теории солинейного сродства, основываясь на установленных нами трех основных положениях, установим так называемые правила знаков.

Отрезки считаются положительными, если они направлены от левой руки к правой (по направлению света) или снизу вверх, и отрицательными — в обратных случаях. В каждом отдельном случае будем устанавливать начало отрезка.

Углы, образуемые прямой, пересекающейся с осью, считаются положительными, если прямая пересекает ось сверху вниз, и отрицательными — в обратном случае.

Кроме того, условимся обозначать все величины, относящиеся к пространству предметов, без значков, а все величины, относящиеся к пространству изображений, — с надстрочным штрихом (например,  $a'$  читаем  $a$  штрих).

## § 2. Линейное увеличение. Главные плоскости. Фокусные расстояния. Формула Ньютона

Условимся называть сопряженные плоскости, перпендикулярные осям, нормальными сопряженными плоскостями или, сокращенно, просто сопряженными (рис. 1). Обозначим точки пересечения сопряженных нормальных плоскостей  $P$  и  $P'$  с осями  $OX$  и  $O'X'$ , являющиеся сопряженными, буквами  $B$  и  $B'$ , а две другие сопряженные точки на тех же плоскостях — через  $A$  и  $A'$ . Расстояния этих точек от точек  $B$  и  $B'$  соответственно равны  $y$  и  $y'$ .

Докажем теперь, что отношение величин  $\frac{y'}{y} = V$ , называемое линейным увеличением, не зависит от величины  $y$  и является величиной постоянной для каждой пары нормальных сопряженных плоскостей (рис. 2).

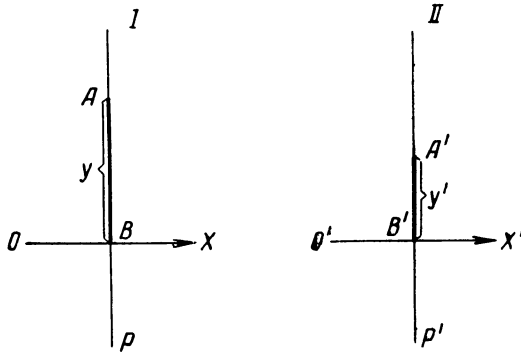


Рис. 1

Представим себе вид на обе плоскости  $P$  и  $P'$  по направлению осей. Меридиональные плоскости изобразятся тогда линиями  $AB$  и  $A'B'$ . Повернем меридиональную плоскость в первом простран-

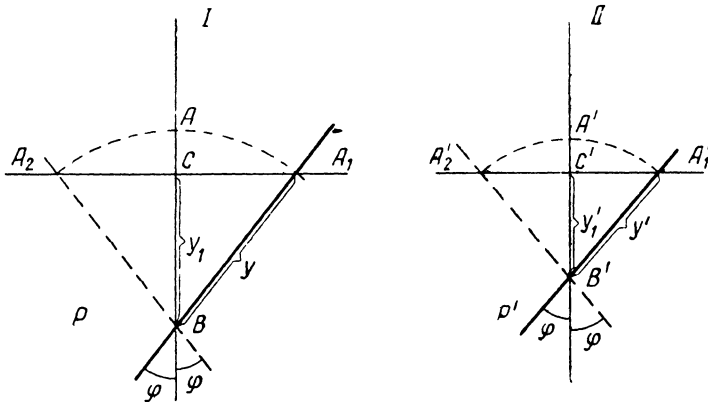


Рис. 2

стве вокруг оси вправо и влево на произвольный угол  $\varphi$ . Тогда точка  $A$  займет соответственно положения  $A_1$  и  $A_2$ , определяющие некоторую прямую  $A_1A_2$ , перпендикулярную прямой  $AB$ . Аналогично этому точка  $A'$ , сопряженная точке  $A$ , займет соответственно положение  $A_1'$  и  $A_2'$  вследствие поворота сопряженной меридиональной плоскости  $A'B'$  на тот же самый угол  $\varphi$  вправо и



влево. Таким образом, точки  $A_1'A_2'$  определяют собою некоторую прямую  $A_1'A_2'$ , перпендикулярную прямой  $A'B'$  и сопряженную прямой  $A_1A_2$ . Вследствие этого точка пересечения  $C$  прямых  $AB$  и  $A_1A_2$  и точка  $C'$  пересечения сопряженных прямых  $A'B'$  и  $A_1'A_2'$  будут также сопряженными одна другой. Поэтому из подобия треугольников  $BCA_1$  и  $B'C'A_1'$  можно написать

$$\frac{y_1'}{y_1} = \frac{B'C'}{BC} = \frac{B'A_1'}{BA_1} = \frac{y'}{y} = V = \text{const}, \quad (1)$$

чем (ввиду произвольности угла  $\varphi$ ) и доказывается постоянство линейного увеличения  $V$  для любых точек пары сопряженных нормальных плоскостей (но не постоянство увеличения для различных пар плоскостей).

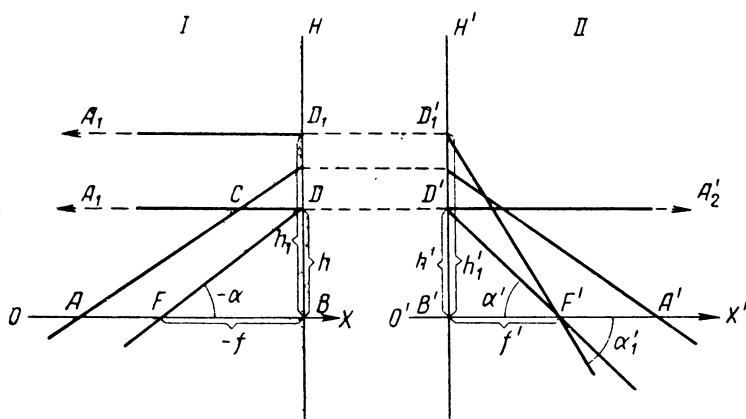


Рис. 3

Перейдем к определению понятия главных плоскостей, фокусов и фокусных расстояний (рис. 3).  $OX$  и  $O'X'$  — сопряженные оси, причем точки  $A$  и  $A'$  суть сопряженные точки. Предположим, что точка  $A$  неограниченно перемещается влево и в момент, когда точка  $A$  уйдет в бесконечность и займет положение  $A_1$ , сопряженная ей точка  $A'$  второго пространства займет положение, определяемое точкой  $F'$ . Тогда эту точку  $F'$ , сопряженную бесконечно удаленной точке  $A_1$  первого пространства, называют задним фокусом. Аналогично при удалении точки  $A'$  в бесконечность соответственное положение точки  $A$  определяет нам положение переднего фокуса  $F$ . Предположим далее, что точка  $A$  является вершиной некоторого гомоцентрического пучка прямых, и займемся рассмотрением некоторой прямой  $AC$  этого пучка.

При удалении точки  $A$  в бесконечность и при постоянном положении точки  $C$  прямая  $AC$  примет положение  $A_1C$ , параллельное

оси  $OX$ . Полагая, что ось  $O'X'$  является продолжением оси  $OX$  и продолжая прямую  $A_1C$  до пересечения с сопряженной ей прямой  $D'F'$  пространства II в точке  $D'$ , мы тем самым определяем положение точки  $D'$ . Проведем теперь через точку  $D'$  нормальную плоскость  $H'$ , которая носит название задней главной плоскости. Пусть этой плоскости  $H'$  соответствует в первом пространстве сопряженная плоскость  $H$ , называемая передней главной плоскостью. Допустим, что прямая  $AC$ , параллельная оси, пересечет плоскость  $H$  в некоторой точке  $D$ . Тогда отрезки от точек пересечения  $B$  и  $B'$  главных плоскостей с осями (главных точек) до точек  $D$  и  $D'$  будут равны друг другу, т. е. иными словами линейное увеличение  $V$  в главных плоскостях равно единице. Из треугольников  $DBF$  и  $D'B'F'$  следует

$$f' = \frac{h'}{\operatorname{tg} \alpha'} = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{и} \quad -f = \frac{h}{-\operatorname{tg} \alpha} = \frac{h'}{-\operatorname{tg} \alpha}, \quad (2)$$

причем отрезки  $f$  и  $f'$ , отсчитываемые от главных точек  $B$  и  $B'$  до фокусов  $F$  и  $F'$ , носят название переднего и заднего фокусных расстояний. Покажем, что фокусные расстояния не зависят от величин  $h$ . Для этого возьмем какую-нибудь другую прямую  $A_1D_1$  из гомоцентрического пучка, исходящего из бесконечно удаленной точки  $A_1$ . Эта прямая, как и прямая  $A_1D$ , также будет параллельна оси. Точке пересечения прямой  $A_1D_1$  с главной плоскостью  $H$  соответствует на главной плоскости  $H'$  некоторая точка  $D_1'$ , причем отрезок  $B'D_1'$  будет равен отрезку  $BD_1$  (вследствие постоянства увеличения). Так как точки  $A_1$  и  $F'$ , а также  $D_1$  и  $D_1'$  суть сопряженные, то и прямые  $A_1D_1$  и  $D_1'F'$  также будут сопряженными. Поскольку расстояние  $f'$  осталось неизменным, то, полагая  $BD_1 = h_1$ , можем написать

$$f' = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'} = \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha_1'}. \quad (3)$$

Совершенно аналогичную картину получим и для переднего фокусного расстояния  $f$ .

Перейдем к выводу формулы Ньютона (рис. 4). Пусть  $y$  будет некоторый отрезок в нормальной плоскости первого пространства. Определим сопряженный ему отрезок  $y'$  во втором пространстве. Для этого необходимо определить положение точки  $C'$  (конца изображения  $y'$ ), сопряженной точке  $C$  (концу отрезка  $y$ ). Представляя точку  $C$  как вершину какого-то гомоцентрического пучка, рассмотрим две прямые из этого пучка: прямую  $CD$ , параллельную оси, и прямую  $CD_1$ , проходящую через передний фокус  $F$ . Нетрудно видеть, что сопряженными им прямыми во втором пространстве будут прямая  $D'C'$ , проходящая через фокус  $F'$  (сопряженная  $CD$ ), и  $D_1'C'$ , параллельная оси. Пересечение этих прямых определит нам вершину сопряженного гомоцентрического

пучка, т. е. точку  $C'$ , сопряженную точке  $C$ . Из треугольников  $B'D'F'$  и  $A'C'F'$  следует

$$\frac{A'C'}{B'D'} = \frac{F'A'}{B'F'} = \frac{x'}{f'}, \quad (4)$$

но вследствие того, что  $A'C' = -y'$  и  $B'D' = BD = y$ , можно написать

$$-\frac{y'}{y} = \frac{x'}{f'} = -V. \quad (5)$$

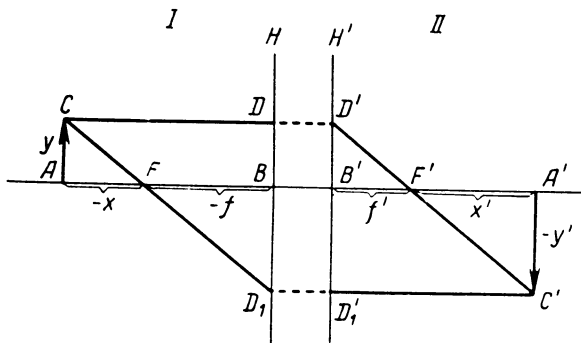


Рис. 4

Аналогично из треугольников  $ACF$  и  $BD_1F$  найдем

$$-\frac{y'}{y} = -\frac{f}{-x} = -V, \quad (6)$$

причем отрезки  $x$  и  $x'$  отсчитывают от точек фокусов. Сопоставляя (5) и (6), находим

$$V = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (7)$$

Эта формула носит название формулы линейного увеличения. Кроме того, из (7) следует равенство

$$xx' = ff', \quad (8)$$

которое называется формулой Ньютона.

### § 3. Формула отрезков от главных точек. Угловое и продольное увеличение

Прежде чем перейти к непосредственному разбору уголовного увеличения, вследствие малости угла  $\alpha$  обозначим  $\operatorname{tg} \alpha$  через  $\alpha$ . Однако во всех дальнейших рассуждениях под  $\alpha$  будем понимать не угловую величину, а тангенс угла, и следовательно, при пере-

ходе от формул солинейного сродства к формулам оптики Гаусса вид формул останется без изменения. В сомнительных же случаях или при наличии каких-либо иных тригонометрических функций, например  $\sin$  или  $\cos$ , будем снова обращаться к общепринятому обозначению тангенса.

Нами была рассмотрена формула Ньютона, выражающая зависимость отрезков  $x$  и  $x'$ , заключенных между точками  $F$  и  $A$ ,  $F'$  и  $A'$  (рис. 4). Теперь установим связь между отрезками  $b$  и  $b'$  (рис. 5), заключенными между точками  $B$  и  $A$ ,  $B'$  и  $A'$ .

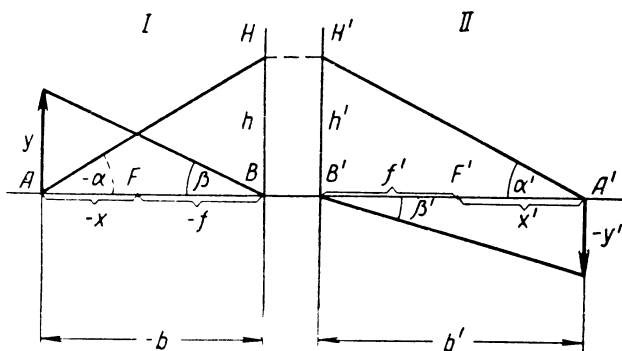


Рис. 5

Из рис. 5 имеем

$$-b = -x - f; \quad b' = x' + f'. \quad (9)$$

Определяя из (9) значения  $x$  и  $x'$  и подставляя их в (8), найдем

$$bb' - fb - b'f + ff' = ff',$$

откуда после некоторых преобразований получим

$$1 = \frac{f}{b} + \frac{f'}{b'}. \quad (10)$$

Определим отношение  $\frac{b'}{b}$ . На основании (9) следует

$$\frac{b'}{b} = \frac{x' + f'}{x + f}$$

или, заменяя  $x$  через  $x'$  на основании (8), получаем

$$\frac{b'}{b} = \frac{x' + f'}{x'f + ff'} \quad x' = \frac{x'}{f}. \quad (11)$$

Умножая и деля правую часть (11) на (8) и пользуясь (7) находим

$$\frac{b'}{b} = \frac{x'}{f} = \frac{f'}{x} = -\frac{f'}{f} V. \quad (12)$$

Кроме того, из рис. 5 следует

$$-\alpha = \frac{h}{-b}; \quad \alpha' = \frac{h'}{b'} = \frac{h}{b}; \quad \beta = \frac{y}{-b}; \quad \beta' = -\frac{y'}{b'}. \quad (13)$$

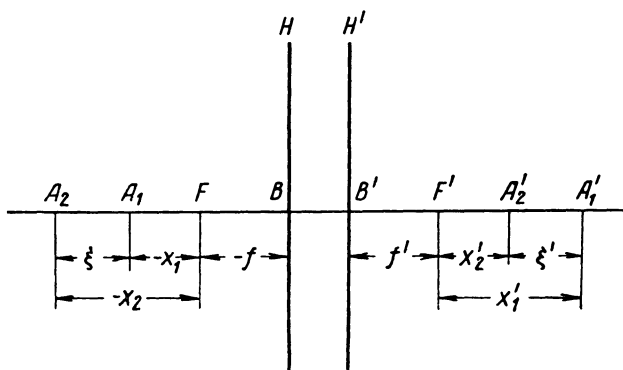


Рис. 6

Поэтому угловое увеличение  $W$  в сопряженных точках  $A$  и  $A'$  на основании (13) и (12) будет

$$W = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{b}{b'} = \frac{f}{x'} = \frac{x}{f'} = -\frac{f}{f'V}. \quad (14)$$

Угловое же увеличение  $W_1$  в главных точках  $B$  и  $B'$  будет

$$W_1 = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{by'}{b'y} = WV = -\frac{f}{f'}. \quad (15)$$

Перейдем к определению продольного увеличения (рис. 6). Предположим, что имеем в первом пространстве две произвольные точки  $A_2$  и  $A_1$ , определяющие собою некоторый отрезок  $\xi$ , отсчитываемый хотя бы от точки  $A_2$ . Очевидно, что во втором пространстве будут существовать две точки  $A_2'$  и  $A_1'$ , сопряженные точкам  $A_2$  и  $A_1$  и определяющие некоторый отрезок  $\xi'$ ; началом отрезка  $\xi'$  будем считать точку  $A_2'$ , сопряженную начальной точке  $A_2$  отрезка  $\xi$ . Этот отрезок  $\xi'$  является сопряженным отрезку  $\xi$ , и отношение отрезка  $\xi'$  к отрезку  $\xi$  будем называть продольным увеличением  $Q$ .

Из рис. 6 следует

$$\xi - x_1 = -x_2; \quad \xi' + x_2' = x_1' \quad (16)$$

или

$$\xi = x_1 - x_2; \quad \xi' = x_1' - x_2', \quad (17)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — суть отрезки от переднего фокуса  $F$  до произвольных точек  $A_1$  и  $A_2$ , а  $x_1'$  и  $x_2'$  — отрезки от заднего фокуса  $F'$  до сопряженных точек  $A_1'$  и  $A_2'$ .

Выразим отрезки  $x_1'$  и  $x_2'$  через отрезки  $x_1$  и  $x_2$  и фокусные расстояния по формуле Ньютона (8).

Имеем

$$x_1' = \frac{ff'}{x_1}; \quad x_2' = \frac{ff'}{x_2}. \quad (18)$$

Вычитая из первого равенства второе, найдем

$$x_1' - x_2' = ff' \left( \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) = - \frac{ff'}{x_1 x_2} (x_1 - x_2), \quad (19)$$

откуда следует, с учетом (17), что

$$Q = \frac{\xi'}{\xi} = \frac{x_1' - x_2'}{x_1 - x_2} = - \frac{ff'}{x_1 x_2}. \quad (20)$$

Обозначая линейные увеличения в точках  $A_1$  и  $A_1'$ ,  $A_2$  и  $A_2'$  соответственно через  $V_1$  и  $V_2$ , можно (20) представить в виде

$$Q = - \frac{f'f^2}{f x_1 x_2} = - \frac{f'}{f} V_1 V_2. \quad (21)$$

В случае, если точка  $A_2$  неограниченно приближается к точке  $A_1$ , то отрезок  $x_2$  стремится к величине отрезка  $x_1$ , а увеличение  $V_2$  неограниченно приближается к  $V_1$ . В пределе, когда точка  $A_2$  совпадает с точкой  $A_1$ , продольное увеличение  $Q$  переходит в продольное увеличение в точках (элементарное продольное увеличение), обозначаемое через  $q$ . Тогда, так как  $V_2$  станет равным  $V_1$ , можем написать

$$q = \lim_{\xi \rightarrow 0} Q = - \frac{f'}{f} V_1 \lim_{\xi \rightarrow 0} V_2 = - \frac{f'}{f} V_1^2, \quad (22)$$

или на основании (14), заменяя  $V_1$  через  $V$ ,

$$q = \frac{V}{W} \quad (23)$$

или

$$W = \frac{V}{q}, \quad (24)$$

откуда следует, что угловое увеличение равно отношению линейного увеличения к продольному увеличению в точке.

Возвратимся к формуле (14). Полагая угловое увеличение равным единице, определим так называемые узловые точки. Для узловых точек на основании (14) будем иметь

$$x = f' \quad \text{и} \quad x' = f. \quad (25)$$

Далее из (14), помня, что  $V = \frac{y'}{y}$ , получаем следующее замечательное соотношение

$$y' x' f' = -y \alpha f, \quad (26)$$

из которого впоследствии получим инвариант Лагранжа—Гельмгольца.

#### § 4. Сложная система. Телескопическая система

Из формулы (14) следует, что

$$\alpha' = W \alpha = -\frac{f \alpha}{f' V}. \quad (27)$$

Пользуясь (7) и определяя  $-x$  из (9), найдем величину

$$\frac{1}{V} = -\frac{x}{f} = \frac{f-b}{f} = 1 - \frac{b}{f}. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (27) и помня, что из (13) произведение  $\alpha b = h$ , получаем

$$\alpha' = -\frac{f}{f'} \alpha + \frac{b \alpha}{f'} = -\frac{f}{f'} \alpha + h \varphi, \quad (29)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{f'} \quad (30)$$

и называется силой системы. Предположим, что имеем сложную систему, состоящую из ряда простых систем. Рассмотрим две какие-либо последовательно расположенные системы с номерами  $s$  и  $s+1$ , имеющие общую ось  $OX$  (рис. 7). Из рис. 7 нетрудно видеть, что пространство изображений после системы  $s$  является пространством предметов для  $s+1$  системы и вследствие этого тангенс угла выхода  $\alpha'_s$  прямой из  $s$  системы является тангенсом угла входа той же самой прямой для  $s+1$  системы. Вместе с тем на основании (29) можно легко определить тангенс угла выхода прямой из системы  $s$ , зная тангенс угла входа  $\alpha_s$ , высоту  $h_s$  и фокусные расстояния  $f_s$  и  $f'_s$ . Действительно

$$\alpha_{s+1} = \alpha'_s = -\frac{f'_s}{f_s} \alpha_s + h_s \varphi_s. \quad (31)$$

Чтобы можно было определить тангенс угла выхода после  $s+1$  системы, необходимо определить  $h_{s+1}$  (фокусные расстояния

всех систем полагаем известными, равно как и расстояние  $d_s$  между системами). Из рис. 7 имеем

$$\frac{h_s - h_{s+1}}{d_s} = \alpha_{s+1} \quad (32)$$

или

$$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s. \quad (33)$$

Пользуясь последовательно (31) и (33) для целого ряда систем, составляющих в совокупности сложную систему, и зная координаты какой-либо прямой перед этой системой, всегда можно

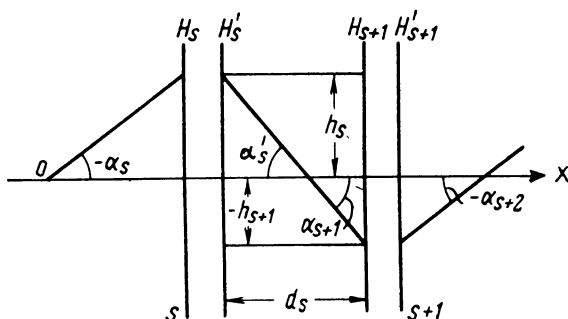


Рис. 7

определить координаты сопряженной прямой после всей сложной системы. Если же прямая, расположенная перед сложной системой, параллельна оси и удалена на какое-то расстояние  $h$  от нее, то, определив тангенс угла сопряженной прямой после всей системы и пользуясь правилами определения фокусных расстояний на основании формулы (2), легко можно определить заднее фокусное расстояние всей системы. Проследив обратным путем прямую, параллельную оси после всей системы, определим переднее фокусное расстояние.

Имея для ряда составляющих систем последнюю высоту  $h_m$  и последний угол  $\alpha_{m+1}$ , нетрудно определить величину последнего отрезка  $s'_m$  от задней главной плоскости последней системы.

Действительно, согласно чертежу, можно написать

$$s' = s'_m = \frac{h_m}{\alpha_{m+1}}. \quad (34)$$

Так как  $\alpha_{m+1}$  можно представить согласно (31), то формула (34) преобразуется

$$s' = \frac{h_m}{-\alpha_m \frac{f_m}{f'_m} + h_m \varphi_m} = \frac{1}{\varphi_m - \frac{\alpha_m}{h_m} \frac{f_m}{f'_m}}. \quad (35)$$



Но согласно (32)

$$s' = \frac{1}{\varphi_m - \frac{f_m}{f_m'} \cdot \frac{\alpha_m}{h_{m-1} - \alpha_m d_{m-1}}} = \frac{1}{\varphi_m + \frac{f_m}{f_m'} \cdot \frac{1}{d_{m-1} - \frac{h_{m-1}}{\alpha_m}}}, \quad (36)$$

где отношение  $\frac{h_{m-1}}{\alpha_m}$  есть не что иное, как отрезок  $s'_{m-1}$  после предпоследней системы; поэтому мы имеем право снова воспользоваться уже известной нам формулой (35) и т. д.; этот процесс

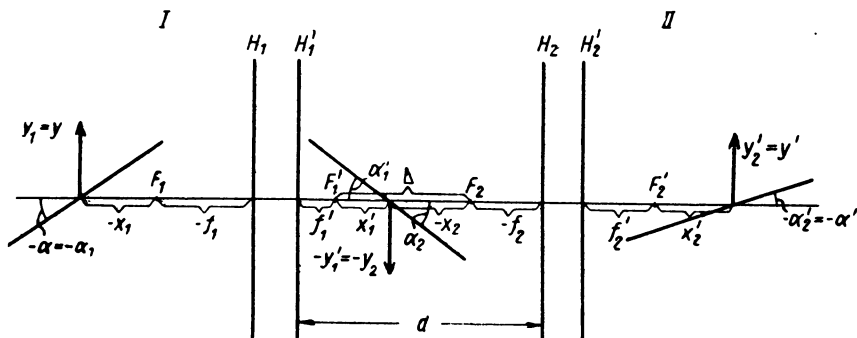


Рис. 8

закончится тогда, когда мы придем к первой из составляющих систем; поэтому окончательно можно записать

$$s' = \frac{1}{\varphi_m + \frac{f_m}{f_m'} \cdot \frac{1}{d_{m-1} - \frac{1}{\varphi_{m-1} + \frac{f_{m-1}}{f_{m-1}'} \cdot \frac{1}{d_{m-2} - \dots - \frac{1}{\varphi_1 - \frac{f_1}{f_1'} s_1}}}}}. \quad (37)$$

Полученная формула впервые была выведена А. П. Дмитриевым. Эта формула приобретает особенно простой вид, когда все составляющие системы имеют отношения  $\frac{f}{f'} = -1$ .

Перейдем к разбору телескопической системы, определяя ее как систему с постоянным линейным увеличением  $V$ . Предположим, что на рис. 8 имеем две системы с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_1'$  (для I системы) и  $f_2$  и  $f_2'$  (для II).

Допустим, что перед I системой имеем предмет  $y_1 = y$  на расстоянии  $x_1$  от ее переднего фокуса  $F_1$ . Тогда изображение  $y_1'$  этого предмета будет расположено на расстоянии  $x_1'$  от заднего фокуса  $F_1'$  системы I. Это изображение  $y_1'$  после I системы будет предметом  $y_2$  для II системы, а следовательно,  $y_1' = y_2$ . Пусть это изображение будет расположено на расстоянии  $x_2$  от переднего фокуса  $F_2$  системы II, тогда его изображением будет  $y' = y_2'$ , расположенное на расстоянии  $x_2'$  от заднего фокуса  $F_2'$  системы II.

Нетрудно видеть, что изображение  $y_2' = y'$  будет в свою очередь также и изображением предмета  $y_1 = y$ , полученного через всю сложную систему, составленную из систем I и II.

Обозначив затем расстояние между задней главной плоскостью  $H_1'$  системы I и передней главной плоскостью  $H_2$  системы II через  $d$ , а оптический интервал, равный расстоянию между фокусами  $F_1'$  и  $F_2$ , — через  $\Delta$ , напомним выражение для линейных увеличений каждой из составляющих систем отдельно.

На основании (7) будем иметь:

$$V_1 = \frac{y_1'}{y_1} = -\frac{f_1}{x_1} = -\frac{x_1'}{f_1'}; \quad V_2 = \frac{y_2'}{y_2} = -\frac{f_2}{x_2} = -\frac{x_2'}{f_2'}. \quad (38)$$

Перемножив (38), получим

$$V_1 V_2 = \frac{y_1' y_2'}{y_1 y_2} = \frac{x_1' f_2}{f_1' x_2}. \quad (39)$$

Кроме того, помня, что  $y_1 = y$ ,  $y_1' = y_2$  и  $y_2' = y'$  можно написать

$$V_1 V_2 = \frac{y_1' y_2'}{y y_1'} = \frac{y'}{y} = V = \frac{f_2 x_1'}{f_1' x_2}, \quad (40)$$

т. е. линейное увеличение всей системы равно произведению линейных увеличений составляющих систем.

Далее из рис. 8 следует, что оптический интервал

$$\Delta = x_1' - x_2, \quad (41)$$

откуда

$$x_1' = \Delta + x_2. \quad (42)$$

Налагая на линейное увеличение всей системы условие постоянства и вставляя (42) в (40), найдем

$$V = \frac{f_2}{f_1'} \left( 1 + \frac{\Delta}{x_2} \right) = \text{const.} \quad (43)$$

Нетрудно представить себе, что каждому значению  $x_1$  соответствует по формуле Ньютона некоторое вполне определенное зна-

чение  $x_1'$  и вследствие (42) некоторое вполне определенное значение  $x_2$ . Поэтому условие постоянства линейного увеличения всей системы независимо от положения предмета возможно только в том случае, когда множитель  $1 + \frac{\Delta}{x_2}$  в (43) окажется независимым от  $x_2$ . Это условие выполнимо только тогда, когда оптический интервал  $\Delta$  равен нулю, а следовательно, фокусы  $F_1'$  и  $F_2$  совпадают.

В этом случае линейное увеличение

$$V = \frac{f_2}{f_1'} = \text{const} \quad (44)$$

и

$$\Delta = 0. \quad (45)$$

Далее из рис. 8 следует, что,

$$d = f_1' + \Delta - f_2. \quad (46)$$

Так как для телескопической системы  $V = \text{const}$ ;  $\Delta = 0$ , то

$$d = f_1' - f_2, \quad (47)$$

т. е. расстояние между составляющими системами должно быть равно разности между задним фокусным расстоянием передней системы и передним фокусным расстоянием задней системы.

Перейдем к рассмотрению углового увеличения телескопической системы. Напишем угловые увеличения для составляющих систем:

$$W_1 = \frac{\alpha_1'}{\alpha_1} = -\frac{f_1}{f_1' V_1}; \quad W_2 = \frac{\alpha_2'}{\alpha_2} = -\frac{f_2}{f_2' V_2}. \quad (48)$$

Перемножая (48), имея в виду (44) и помня, что  $\alpha_1 = \alpha$ ,  $\alpha_1' = \alpha_2$  и  $\alpha_2' = \alpha'$ , получаем

$$\begin{aligned} W_1 W_2 &= \frac{\alpha_1' \alpha_2'}{\alpha_1 \alpha_2} = \frac{\alpha'}{\alpha} = W = \frac{f_1 f_2}{f_1' f_2' V_1 V_2} = \frac{f_1 f_2}{f_1' f_2' V} = \\ &= \frac{f_1 f_2 f_1'}{f_1' f_2' f_2} = \frac{f_1}{f_2'} = \text{const}, \end{aligned} \quad (49)$$

т. е. угловое увеличение телескопической системы постоянно и равно отношению переднего фокусного расстояния системы I и заднего фокусного расстояния последней системы.

Перейдем к определению продольного увеличения. Из рис. 9 имеем

$$\xi = \frac{y}{\alpha}, \quad (50)$$

$$\xi' = \frac{y'}{\alpha'}, \quad (51)$$

причем (как и ранее в § 3)  $\xi$  — отрезок между некоторыми произвольными точками  $A_2$  и  $A_1$ , а  $\xi'$  — сопряженный ему отрезок между точками  $A_2'$  и  $A_1'$ , сопряженными точкам  $A_2$  и  $A_1$ .

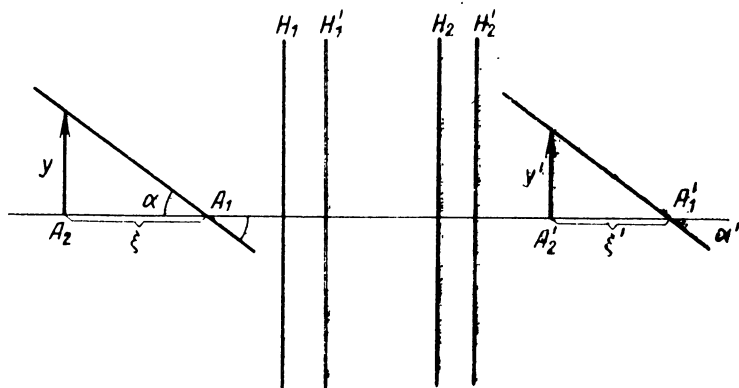


Рис. 9

Поскольку продольное увеличение  $Q$  равно отношению отрезков  $\xi'$  и  $\xi$ , то, пользуясь (50) и (51), найдем

$$Q = \frac{\xi'}{\xi} = \frac{y' \alpha}{y \alpha'} = \frac{V}{W} = \frac{f_2 f_2'}{f_1 f_1'} = \text{const}, \quad (52)$$

т. е. что продольное увеличение телескопической системы постоянно и равно отношению произведения обоих фокусных расстояний II системы к произведению обоих фокусных расстояний I системы или что продольное увеличение равно отношению линейного увеличения к угловому.

Определим фокусные расстояния телескопической системы. Для любой системы по формуле (7)

$$V = -\frac{x'}{f'}.$$

В нашем случае линейное увеличение постоянно и не зависит от величины  $x'$ , поэтому

$$\frac{dV}{dx'} = 0 = -\frac{1}{f'}. \quad (53)$$

Это возможно лишь в случае  $f' = \infty$ . Переворачивая систему, совершенно аналогично находим, что и  $f = \infty$ .

# ОПТИКА НУЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ (ОПТИКА ГАУССА)

## § 5. Инвариант Аббе. Инвариант Лагранжа—Гельмгольца

Пусть две среды I и II с показателями преломления  $n$  и  $n'$  разделены некоторой преломляющей поверхностью  $P$  (рис. 10), а  $ON$  — есть нормаль к этой поверхности в точке преломления луча  $AN$ . По закону Снеллиуса—Декарта имеем

$$n \sin i = n' \sin i', \quad (54)$$

где  $i$  и  $i'$  — углы, образованные соответственно падающим и преломленным лучами с нормалью. При малых  $i$  закон преломления представляется в следующем виде

$$ni = n'i'. \quad (55)$$

Пусть радиус сферической поверхности равен  $r$ , причем радиус считается положительным, если он направлен от вершины поверхности вправо;  $A$  — светящаяся точка, лежащая на оси  $AO$ ;  $O$  —

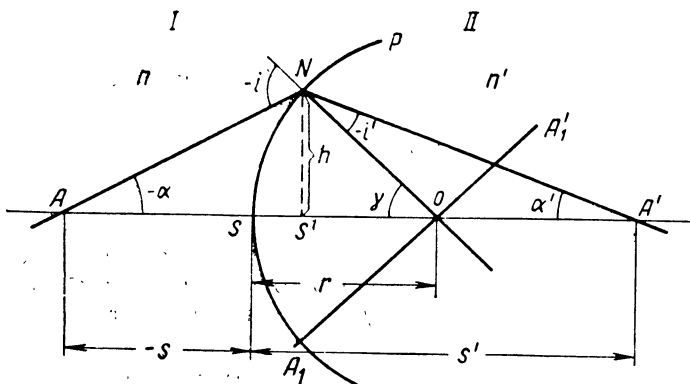


Рис. 10

центр нашей преломляющей поверхности. Проведем из точки  $A$  некоторый произвольный луч  $ANA'$ , преломленный в точке  $N$  и образующий малые углы  $i$  и  $i'$  с нормалью, а с осью — угол  $\alpha$ ; тогда  $i'$ , угол  $\gamma$ , образованный нормалью  $ON$  и осью  $AO$ , и угол  $\alpha'$ , полученный от пересечения преломленного луча  $NA'$  с осью, а также и величина  $h$  будут малы.

Действительно, пренебрегая отрезком  $SS'$  как величиной высшего порядка малости, из треугольников  $ANS'$ ,  $NS'O$  и  $NS'A'$  следует

$$\alpha = \frac{h}{s}; \quad \gamma = \frac{h}{r}; \quad \alpha' = \frac{h}{s'}, \quad (56)$$

т. е. вследствие малости  $\alpha$ , мало  $h$ , а следовательно, и значения  $\gamma$  и  $\alpha'$ .

Из треугольников  $ANO$  и  $NOA'$  находим:

$$-i = \gamma - \alpha; \quad \gamma = -i' + \alpha'. \quad (57)$$

Определяя из (57) значения  $i$  и  $i'$ , а затем подставляя это в (55), найдем

$$n(\alpha - \gamma) = n'(\alpha' - \gamma). \quad (58)$$

Заменяя  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\alpha'$  в (58) на основании (56), получаем после сокращения на  $h$  так называемый инвариант Аббе

$$n\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{r}\right) = n'\left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{r}\right). \quad (59)$$

Из (59) следует, что положение точки  $A'$  определяется исключительно положением точки  $A$  и постоянными величинами и совершенно не зависит (конечно, только для случая малых углов) от величины углов, образованных с осью. Иначе говоря, всякий луч (образующий малые углы с осью), проходящий через точку  $A$ , непременно пройдет и через точку  $A'$ , что как раз и является условием сопряженности точек  $A$  и  $A'$ , выбранных совершенно произвольно.

Проделав те же самые рассуждения для какой-либо другой произвольной оси, например  $A_1A_1'$ , также можно прийти к выводу, что гомоцентрическому пучку лучей, исходящих из точки  $A_1$ , будет соответствовать пучок, имеющий вершину в точке  $A_1'$ , сопряженной точке  $A_1$ . Таким образом, нетрудно установить, что пространства I и II обладают всеми свойствами солинейного сродства для так называемых нулевых (параксиальных) лучей, обладающих малыми углами пересечения с осью и малыми углами падения и преломления.

Перейдем к определению фокусных расстояний одной преломляющей поверхности. Вследствие того, что высота  $h$  принадлежит как I, так и II пространству, обе главные плоскости должны проходить через точку  $N$  или, пренебрегая  $SS'$ , должны быть касательными к преломляющей поверхности в точке  $S$ . Если отнести точку  $A$  в бесконечность, т. е. придать отрезку  $s$  значение, равное бесконечности, положение точки  $A'$  будет соответствовать положению заднего фокуса, а величина отрезка  $s'$  — заднему фокусному расстоянию  $f'$ .

На основании (59) напомним

$$-\frac{n}{r} = n'\left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{r}\right), \quad (60)$$

откуда

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (61)$$

Совершенно аналогично, полагая в (59)  $s' = \infty$ , определяем

$$f = \frac{nr}{n-n'} . \quad (62)$$

Разделив (61) на (62), находим

$$-\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} . \quad (63)$$

Из (26) следует, что

$$\frac{y' \alpha'}{y \alpha} = -\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'} , \quad (64)$$

откуда получаем инвариант Лагранжа—Гельмгольца

$$y' \alpha' n' = y \alpha n . \quad (65)$$

Предположим, что наша преломляющая поверхность  $S$  является поверхностью некоторой системы (рис. 11).

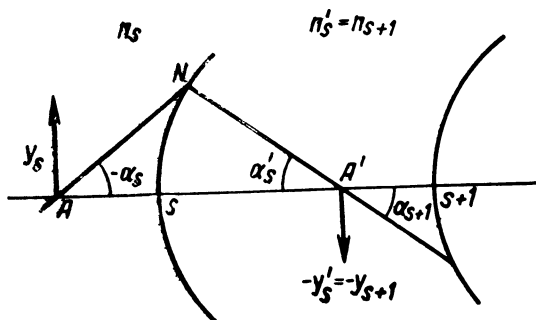


Рис. 11

Нетрудно видеть, что показатель преломления  $n_{s+1}$  перед  $s+1$  поверхностью будет показателем преломления  $n'_s$  после поверхности  $S$ . Как и ранее, будем иметь равенство  $\alpha_{s+1} = \alpha'_s$  и  $y_{s+1} = y'_s$  (предметом для последующей поверхности является изображение от предыдущей). В силу этого можно написать

$$\begin{aligned} y'_s \alpha'_s n'_s &= y_s \alpha_s n_s = y_{s+1} \alpha_{s+1} n_{s+1} = \dots = y_1 \alpha_1 n_1 = \dots = \\ &= y'_m \alpha'_m n'_m , \end{aligned} \quad (66)$$

где величины  $y'_m$ ,  $\alpha'_m$ ,  $n'_m$  соответствуют значениям  $y'$ ,  $\alpha'$  и  $n'$ , полученным после прохождения лучом всей системы. Кроме того, для всей системы справедливо также равенство (26). Разделив (26) на (64), получим

$$\frac{f'}{n'_m} = -\frac{f}{n_1} \quad (67)$$

или

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n_1}{n_m'} = -\frac{n}{n'}, \quad (68)$$

т. е. отношение фокусных расстояний системы равно отношению показателей преломления до и после системы. В случае, если система находится в воздухе, то

$$n_1 = n_m' = 1 \quad (69)$$

и тогда

$$-f = f'. \quad (70)$$

Если в (31)  $-\frac{f_s}{f_s'}$  заменить отношением  $\frac{n_s}{n_{s+1}}$ , а значение  $f'$  подставить из (61), то на основании (64) найдем

$$\alpha_{s+1} = \frac{n_s}{n_{s+1}} \alpha_s + h_s \frac{n_{s+1} - n_s}{n_{s+1} r_s}. \quad (71)$$

Формула же (33) остается без изменения

$$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s.$$

Таким образом, формулы (71) и (33) дают возможность последовательно определить величины  $\alpha_s$  и  $h_s$ , если известны постоянные системы (показатели преломления стекол, радиусы кривизны поверхностей, толщины линз и воздушные промежутки между линзами), а следовательно, фокусные расстояния и увеличение всей системы. Следует иметь в виду, что величины  $h$  и  $\alpha$  могут быть и конечными величинами, взятыми из теории солинейного сродства в том случае, если их употреблять для вычисления отрезков на оси системы и для вычисления увеличений.

## § 6. Простая линза в воздухе. Система из двух линз

Предположим, что имеем простую линзу в воздухе, т. е. две преломляющие поверхности с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , причем

$$n_1 = n_2 = 1.$$

Обозначим показатель преломления стекла  $n_2$  через  $n$ , а толщину линзы  $d_1$  — через  $d$  (рис. 12). Полагая, как это делали в § 2, что  $\alpha_1 = 0$ , определим на основании (71)

$$\alpha_2 = h_1 \frac{n-1}{nr_1},$$

а на основании (33)

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d = h_1 \left( 1 - \frac{n-1}{nr_1} d \right).$$



Пользуясь снова (71), находим

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + h_2 \frac{n_3 - n_2}{n_3 r_2} = n h_1 \frac{n-1}{n r_1} + h_1 \left(1 - \frac{n-1}{n r_1} d\right) \frac{1-n}{r_2} = \\ &= h_1 \left[ (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n r_1 r_2} d \right].\end{aligned}\quad (72)$$

Деля обе части на  $h_1$  и помня, что  $\frac{h_1}{\alpha_3} = f'$ , находим

$$\varphi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n r_1 r_2} d. \quad (73)$$

Переднее фокусное расстояние  $f$  нетрудно определить из (70).

Решим численный пример. Дано:  $r_1 = \infty$  (первая поверхность — плоскость);  $f' = 100$  мм, показатель преломления  $n = 1,5163$  (бо-

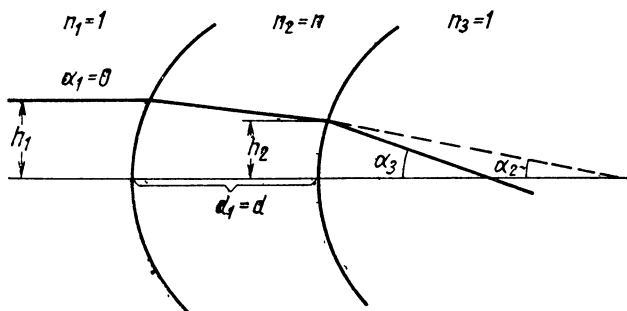


Рис. 12

росиликатный крон, сорт К-8). Определить величину  $r_2$ . Из (73) следует

$$\frac{1}{100} = - \frac{0,5163}{r_2},$$

откуда

$$r_2 = -51,63 \text{ мм.}$$

Радиус  $r_2$  имеет знак минус. Это означает, что центр второй поверхности расположен влево от ее вершины, как это показано на рис. 13. Нетрудно видеть, что получим плоско-выпуклую линзу.

В случае, если  $d = 0$  (или практически достаточно мало), а следовательно,  $h_2 = h_1 = h$ , получим упрощенное выражение для силы линзы

$$\varphi = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (74)$$

В этом случае, как и в случае одной поверхности, главные плоскости совпадают с самой линзой.

Займемся системой из двух линз в воздухе (рис. 14). На основании (70) имеем

$$f_1 = -f'_1; \quad f_2 = -f'_2. \quad (75)$$

В этом случае формула (31) будет иметь вид

$$\alpha_{s+1} = \alpha_s + h_s \varphi_s. \quad (76)$$

Полагая  $\alpha_1 = 0$ , находим

$$\alpha_2 = h_1 \varphi_1. \quad (77)$$

Определяем

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d = h_1 (1 - \varphi_1 d). \quad (78)$$

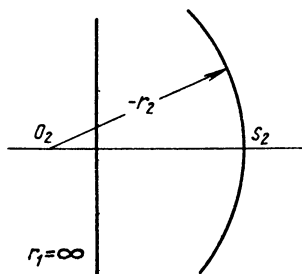


Рис. 13

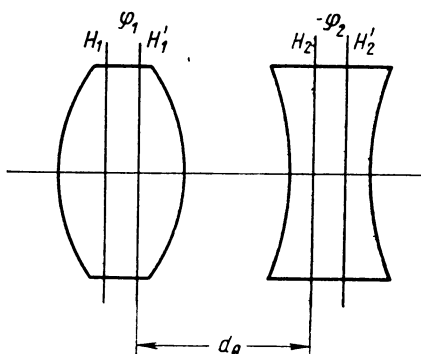


Рис. 14

Далее находим

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \varphi_2 = h_1 [\varphi_1 + (1 - \varphi_1 d) \varphi_2] \quad (79)$$

или

$$\alpha_3 = h_1 (\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d), \quad (80)$$

откуда сила сложной системы

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{\alpha_3}{h_1} = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d. \quad (81)$$

## § 7. Инварианты вдоль лучей

В § 2 дается понятие о фокусных расстояниях как об отрезках от главных точек до фокальных точек, причем имело место соотношение (8)

$$xx' = ff' = \text{const.}$$

Однако следует иметь в виду, что приведенная формула, определяя единообразно зависимость между величинами  $x$  и  $x'$ , не определяет вместе с тем однозначно величин  $f$  и  $f'$  и требует только постоянства произведения этих величин; причем неопределенность такого рода легко можно устранить наложением какого-либо добавочного условия, например условия определения углового увеличения соотношением (14)

$$W = \frac{f}{x'} = \frac{x}{f'}. \quad (82)$$

Пользуясь высказанными соображениями, основные формулы солинейного сродства можно легко применить к случаю нецентрированной системы, оперируя с величинами отрезков вдоль осей и с угловыми величинами, но вместе с тем опустив совсем понятие о сопряженных плоскостях.

Инварианты Гульстранда вдоль луча. Аналогично проделанному нами в § 5 выводу инварианта Аббе, связывающего вершинные отрезки  $s$  и  $s'$  вдоль оси для параксиальных (нулевых) лучей, могут быть легко выведены подобные же инварианты, связывающие отрезки вдоль действительного луча, образующего большие углы падения и преломления с нормалью к преломляющей поверхности.

Предположим, что мы рассматриваем меридиональное сечение некоторой поверхности  $S$  радиуса  $r$  (рис. 15,  $a$ );  $n$  и  $n'$  — показатели преломления соответственно до и после преломляющей поверхности;  $t$  и  $t'$  — отрезки, заключенные между точкой  $N$  и соответственно точками пересечения  $A$  и  $A'$  луча  $AKA'$ , идущего в меридиональной плоскости вблизи основного луча  $ANA'$ , образующего углы  $i$  и  $i'$  падения и преломления с нормалью  $ON$ . Из рис. 15 следует, полагая  $d\tau$  малым, что

$$LN = td\tau. \quad (83)$$

Далее из треугольников  $AON$  и  $A'ON$ :

$$-i = \gamma - \tau, \quad (84)$$

$$\gamma' = \tau' - i'. \quad (85)$$

Дифференцируя (84) и (85), находим, помня, что  $d\gamma' = d\gamma$

$$d\tau - di = d\gamma = d\gamma' = d\tau' - di'. \quad (86)$$

Дифференцируя формулу (54), которая выражает закон преломления Снеллиуса—Декарта, находим

$$n \cos i \, di = n' \cos i' \, di'. \quad (87)$$

Формулы (86) и (87) показывают, что если  $d\tau$  и  $di$  малы, то и величины  $d\gamma$ ,  $di'$  и  $d\tau'$  также малы. Поэтому из рис. 15, а следует, что

$$NM = t' d\tau', \quad (88)$$

$$NK = rd\gamma, \quad (89)$$

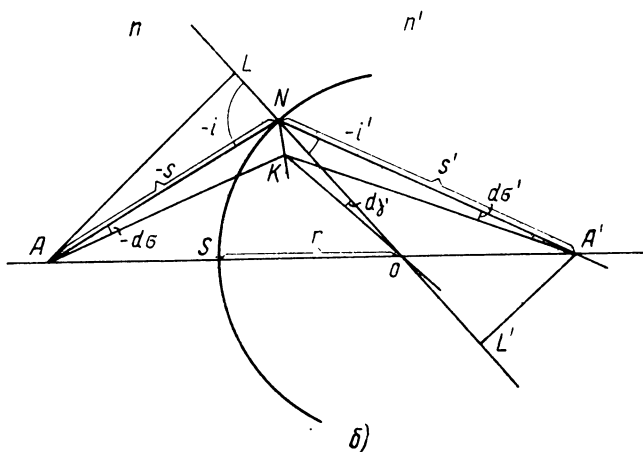
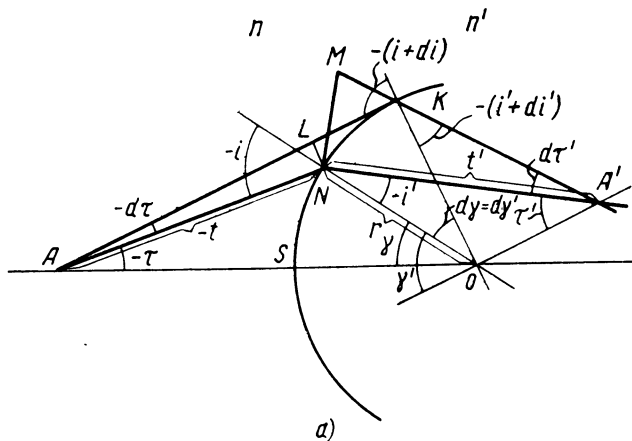


Рис. 15

а из треугольников  $NLK$  и  $NMK$ , пренебрегая ошибками высшего порядка малости,

$$NK = \frac{NL}{\cos i} = \frac{NM}{\cos i'} = rd\gamma. \quad (90)$$

Подставляя в (87) значения  $di$  и  $di'$  из (86), найдем

$$n \cos i (d\gamma - d\tau) = n' \cos i' (d\gamma - d\tau'). \quad (91)$$

Заменяя далее  $d\tau$  и  $d\tau'$  на основании (83), (88) и (90), получаем

$$n \cos i \left( d\gamma - \frac{r \cos i d\gamma}{t} \right) = n' \cos i' \left( d\gamma - \frac{r \cos i' d\gamma}{t'} \right) \quad (92)$$

и окончательно

$$n \cos i \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{t} \right) = n' \cos i' \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i'}{t'} \right) . \quad (93)$$

Выражение (93) известно под названием инварианта Гульстранда для меридионального луча. При  $i = i' = 0$  выражение (93) переходит в уже известный нам ранее инвариант Аббе для нулевых лучей (59).

Инвариант Гульстранда для лучей, идущих в сагиттальной плоскости. На рис. 15,б точки  $A$  и  $A'$  — точки пересечения сагиттального луча  $AKA'$ , идущего вблизи основного луча  $ANA'$ . Положение точки  $K$  преломления сагиттального луча находится путем поворота всей меридиональной плоскости вокруг прямой  $AOA'$ , проходящей через центр  $O$  преломления поверхности. Точка пересечения этой поверхности с преломленным лучом и определяет положение сагиттального изображения  $A'$  точки  $A$ .

Из рис. 15,б имеем

$$NK = sd\sigma \quad (94)$$

или

$$NK = rd\gamma = s'd\sigma', \quad (95)$$

а из треугольников  $ANL$  и  $A'NL'$  соответственно

$$AL = s \sin i \quad (96)$$

и

$$A'L' = -s' \sin i'. \quad (97)$$

Из треугольников  $ALO$  и  $A'L'O$

$$\frac{AL}{A'L'} = -\frac{r - s \cos i}{s' \cos i' - r} . \quad (98)$$

Разделив (96) на (97) и помня закон преломления, находим

$$\frac{AL}{A'L'} = -\frac{s \sin i}{s' \sin i'} = -\frac{sn'}{s'n} . \quad (99)$$

Приравнявая (98) и (99), после некоторых преобразований получаем выражение, называемое сагиттальным инвариантом. Гульстранда, которое при  $i = i' = 0$  переходит в (59),

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

Полагая в (93) последовательно  $t = \infty$  и затем  $t' = \infty$ , найдем расстояния  $T_F'$  и  $T_F$  задней и передней меридиональных фокальных точек от точки преломления луча:

$$T_F' = \frac{n'r \cos^2 i'}{n' \cos i' - n \cos i}, \quad (100)$$

$$T_F = \frac{nr \cos^2 i}{n \cos i - n' \cos i'}. \quad (101)$$

Аналогично для сагиттального луча:

$$S_F' = \frac{n'r}{n' \cos i' - n \cos i}, \quad (102)$$

$$S_F = \frac{nr}{n \cos i - n' \cos i'}. \quad (103)$$

Преобразовывая (93), имеем

$$\frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} = \frac{n' \cos^2 i'}{t'} - \frac{n \cos^2 i}{t} \quad (104)$$

и, пользуясь (100) и (101), окончательно находим

$$1 = \frac{T_F'}{t'} + \frac{T_F}{t}. \quad (105)$$

Совершенно аналогично, пользуясь (99), (102) и (103), получаем

$$1 = \frac{S_F'}{s'} + \frac{S_F}{s}. \quad (106)$$

Выражения (105) и (106) соответствуют формуле (10).

Далее из (105) и (106), полагая

$$t = T_F + x_t; \quad t' = T_F' + x_t'; \quad s = S_F + x_s; \quad s' = S_F' + x_s', \quad (107)$$

найдем

$$x_t x_t' = T_F T_F' = \text{const}; \quad x_s x_s' = S_F S_F' = \text{const}. \quad (108)$$

Это выражение соответствует формуле Ньютона (8).

Определим фокусные расстояния  $f_t$  и  $f_t'$ , исходя из соотношения (14), определяющего угловое увеличение

$$W_t = \frac{d\tau'}{d\tau} = \frac{f_t}{x_t'} = \frac{x_t}{f_t'}. \quad (109)$$

На основании (83), (88) и (90) имеем

$$W_t = \frac{d\tau'}{d\tau} = \frac{t \cos i'}{t' \cos i} = \frac{\cos i'}{\cos i} \frac{T_F + x_t}{T_F' + x_t'}, \quad (110)$$

откуда, пользуясь (108), находим

$$W_t = \frac{\cos i'}{\cos i} \cdot \frac{x_t}{T_F'} = \frac{x_t}{f_t'}, \quad (111)$$

а затем

$$f_t' = \frac{\cos i}{\cos i'} T_F' \quad (112)$$

или, так как

$$T_F T_F' = x_t x_t' = f_t f_t', \quad (113)$$

$$f_t = \frac{\cos i'}{\cos i} T_F. \quad (114)$$

Деля (112) на (114) и помня (100) и (101), получаем

$$\frac{f_t'}{f_t} = -\frac{n'}{n}. \quad (115)$$

Таким образом, выражение (115) соответствует (63). Для сагиттального луча находим, основываясь на (95),

$$W_s = \frac{d\sigma'}{d\sigma} = \frac{s}{s'} = \frac{f_s}{x_s'} = \frac{x_s}{f_s'} \quad (116)$$

или, пользуясь (107),

$$W_s = \frac{d\sigma'}{d\sigma} = \frac{S_F + x_s}{S_F' + x_s'} = \frac{x_s}{S_F'} = \frac{x_s}{f_s'}, \quad (117)$$

откуда

$$f_s' = S_F', \quad (118)$$

а аналогично предыдущему

$$f_s = S_F. \quad (119)$$

Итак, на основе (102) и (103) найдем соотношение

$$\frac{f_s'}{f_s} = -\frac{n'}{n}, \quad (120)$$

которое соответствует (63). Неравенство величин  $f_t$  и  $T_F$ ,  $f_t'$  и  $T_F'$  является следствием отсутствия симметрии вокруг преломленного луча в меридиональной плоскости (для сагиттального луча вследствие симметрии возможно равенство  $f_s = S_F$  и  $f_s' = S_F'$ ).

Проведенные рассуждения остаются в силе для всех остальных поверхностей нашей системы. Таким образом, рассматривая ход некоторого определенного луча сквозь всю систему, легко можно убедиться, что сагиттальное и меридиональное изображения как точек, так и лучей, близких основному, будут точно также следовать законам солинейного сродства.

## Глава III

### ГЛАЗ

#### § 8. Устройство глаза. Аккомодация. Разрешающая сила глаза

Во многих случаях изображение, даваемое оптической системой, непосредственно рассматривается глазом, который служит как бы продолжением оптической системы (например, изображение, даваемое оптикой визира, стереоскопа и т. п.), и потому необходимо некоторое знакомство с устройством глаза (рис. 16).

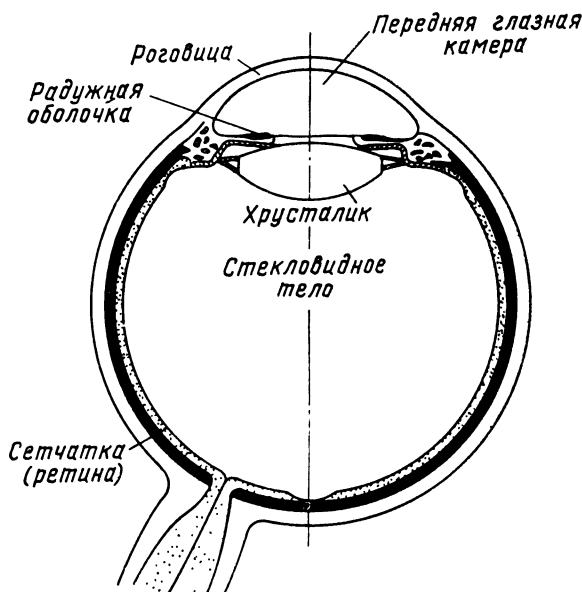


Рис. 16

В передней части глаза расположена твердая прозрачная роговая оболочка, или так называемая роговица. За роговицей находится передняя камера, ограниченная с задней стороны непрозрачной радужной оболочкой с отверстием в ней, называемым зрачком. Передняя камера заполнена прозрачной водянистой жидкостью. Позади радужной оболочки помещается хрусталик, состоящий из прозрачного хрящевидного вещества слоистого строения и могущий сжиматься и растягиваться под действием охватывающей его мышцы. Кроме того, величина зрачка (отверстие в радужной оболочке) также может изменяться в пределах от 2 до 7 мм под действием мышц, из которых составлена радужная оболочка. Часть глазного яблока за хрусталиком, ограниченная с



задней стороны ретиной (сетчатой оболочкой или сетчаткой), заполнена стекловидным телом. Сетчатая оболочка состоит из большого числа светочувствительных элементов, палочек и колбочек, являющихся окончаниями зрительных нервов и передающих по ним зрительное впечатление (ощущение света) в мозг. Показатели преломления роговицы, жидкости, помещающейся в передней камере, и стекловидного тела мало различаются и близки к показателю преломления воды. Таким образом, действие хрусталика подобно действию линзы, погруженной в воду. Задний фокус роговицы и хрусталика (оптической системы глаза) расположен (в случае нормального глаза) на сетчатке в том случае, когда мышцы хрусталика не напряжены. Совершенно очевидно, что в таком состоянии глаз приспособлен к рассмотрению весьма удаленных точек, или, как говорят, глаз аккомодирован на бесконечность. В случае же, когда хрусталик сжат своими мышцами, задний фокус оптической системы глаза смещается с сетчатки и на нее попадают изображения точек, расположенных на конечном расстоянии от глаза. В этом случае говорят, что глаз аккомодирован на конечное расстояние.

В случае, если изображения от каких-либо двух точек попадут на один элемент (колбочку) сетчатки, элемент получает только одно раздражение, и таким образом получается впечатление как от одной точки. Глаз, как говорят, не разрешает наблюдаемые две точки.

В случае же, если изображения от этих двух точек попадут на две колбочки, то получим зрительное впечатление двух точек.

Нетрудно видеть, что разрешение точек глазом зависит от расстояния между изображениями точек на сетчатке и от диаметра колбочек.

Поясним сказанное, пользуясь рис. 17. На этом рисунке точки  $A$  и  $A_1$  — наблюдаемые точки;  $A'$  и  $A_1'$  — их изображения на сетчатке;  $F$  и  $F'$  — передний и задний фокусы оптической системы глаза;  $K$  и  $K'$  — узловыe точки.

Величина диаметра колбочек близка (по Гельмгольцу) к  $0,005$  мм, поэтому, если расстояние  $A'A_1' = -y'$  между изображениями двух рассматриваемых точек не менее  $0,005$  мм, то глаз еще способен их разрешить.

Определим величину наименьшего угла  $\beta$ , под которым еще возможно разрешение точек  $A$  и  $A_1$ . Полагая точки  $K$  и  $K'$  узловыми, тем самым установим, что  $\angle \beta = \angle \beta'$ , а значение  $x' = f$ , т. е. равно переднему фокусному расстоянию глаза (25).

Таким образом, пользуясь рисунком и пренебрегая величиной  $F'A'$  по отношению к величине переднего фокусного расстояния, находим

$$\beta = \beta' = \frac{A'A_1'}{-f}, \quad (121)$$

а при  $f = -15,4$  мм (по Гельмгольцу)

$$\beta \cong \frac{0,005}{15,4} \cong 0,0003,$$

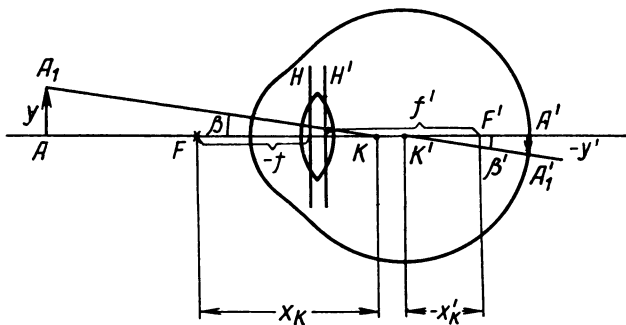


Рис. 17

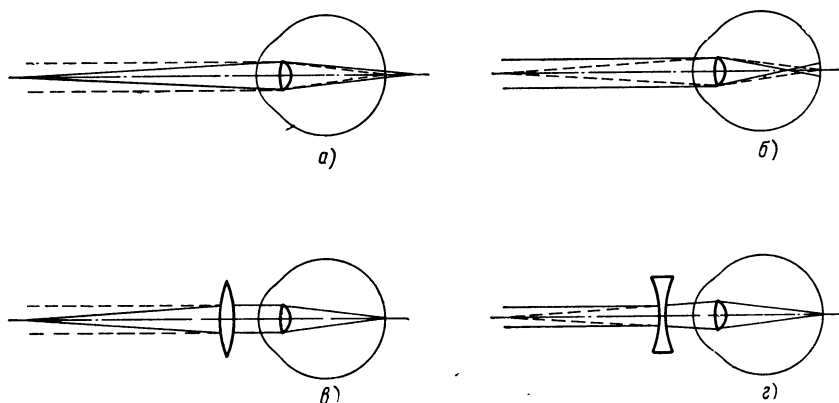


Рис. 18

ИЛИ В МИНУТАХ

$$\beta \cong 1'.$$

Перейдем к рассмотрению рефракции глаза. Основными недостатками глаза являются:

1. Дальнозоркость, или отсутствие аккомодации, когда глаз получает на сетчатке изображения только от удаленных предметов вследствие потери упругости (в старости) мышц хрусталика. Изображения же близких предметов находятся за сетчаткой. Исправляется этот недостаток при помощи положительной линзы, располагаемой перед глазом (рис. 18, *а*, и *в*).

2. Близорукость обычно является следствием того, что камера близорукого глаза длиннее камеры нормального глаза и поэтому изображения удаленных предметов находятся перед сетчаткой. Изображения же близких предметов попадают на сетчатку (рис. 18, б).

Исправляется близорукость при помощи отрицательной линзы. Такая отрицательная линза переносит изображение от удаленных предметов на конечное расстояние (рис. 18, г).

Расстояние наилучшего зрения для глаза при визировании на конечное расстояние условно принимается равным 250 мм, т. е. когда аккомодация еще не перенапряжена.

---

## Глава IV

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

#### § 9 Зрачки и люки. Виньетирование

До сих пор, рассматривая ту или иную оптическую систему, полагали, что углы всех лучей с осью системы малы, а также малы предмет, изображение и диаметры линз системы.

На самом же деле диаметры линз и изображения оптических систем нельзя считать малыми.

Так как и в этом случае для хорошей системы изображение должно оставаться плоским, резким и неискаженным, то можно полагать, что система будет удовлетворять законам теории солинейного сродства (которые были установлены нами еще до принятия допущений о малости углов лучей с осью оптической системы).

Поэтому при больших углах и высотах пользуются всеми формулами солинейного сродства.

До сих пор мы рассматривали оптические системы, совершенно не обращая внимания на то, каким образом ограничивается ход лучей через систему.

Так как всякий оптический прибор имеет конечные размеры, то и его оптическая система будет каким-то образом ограничивать телесные углы входящих в нее световых пучков, обычно называемых апертурными пучками.

Это ограничение апертурных пучков может осуществляться различными элементами системы; нередко такое ограничение производится некоторой круглой диафрагмой, расположенной впереди системы с центром на ее оси; в сложных системах апертурные пучки могут быть ограничены диафрагмой, расположенной между линзами системы (такую диафрагму называют действующей или апертурной диафрагмой). Ограничивающие диафрагмы могут иметь

некруглую форму; ограничение пучков можно осуществлять двумя (или более) различными диафрагмами, расположенными в разных местах системы.

В пространстве предметов всегда может быть найдено изображение апертурной диафрагмы (диафрагм, если их несколько) через часть системы, которая расположена перед диафрагмой; это изображение апертурной диафрагмы будет ограничивать в пространстве предметов входящие в систему апертурные световые пучки точно так же, как это делала бы материальная диафрагма.

Таким образом, всегда можно найти в пространстве предметов материальные элементы или изображения материальных элементов, ограничивающие входящие в систему апертурные пучки лучей; этим элементам в общем случае может быть присвоено наименование входного зрачка системы.

С одинаковым успехом можно было бы найти материальные элементы или изображения материальных элементов, ограничивающих выходящие из системы апертурные пучки лучей в пространстве изображений; этим элементам естественно присвоить название выходного зрачка системы.

Заметим, что входной и выходной зрачки всегда являются изображениями один другого.

Предположим, что на месте выходного зрачка помещена какая-то материальная диафрагма, а на месте входного зрачка  $MN$  не имеется никакой диафрагмы (рис. 19).

Проследим, например, ход луча  $PQ$ , который должен быть ограничен входным зрачком. Нетрудно видеть, что сопряженный этому лучу луч  $Q'P'$  будет задержан диафрагмой  $M'N'$ , стоящей на месте выходного зрачка. Все же лучи, которые ранее были пропущены входным зрачком, например главный луч  $PC$ , соединяющий точку  $P$  с центром зрачка, будут пропущены и выходным зрачком. Таким образом, роль входного зрачка будет играть в нашем случае нематериальное отверстие  $MN$ , сопряженное выходному зрачку  $M'N'$ . Вполне возможен случай, когда оба зрачка нематериальны (например, когда оба зрачка сопряжены диафрагме, помещенной между линзами).

Напишем инвариант Лагранжа—Гельмгольца для зрачков аналогично (65)

$$\rho \beta n = \rho' \beta' n'. \quad (122)$$

В случае, если зрачки находятся в главных плоскостях (например, в симметричных фотообъективах), имеем линейное увеличение в зрачках

$$V_0 = \frac{\rho'}{\rho} = 1. \quad (123)$$

Кроме того, поскольку система находится в воздухе, когда  $n' = n = 1$ , то

$$\beta = \beta', \quad (124)$$

т. е. углы, образованные входящим и выходящим главными лучами с осью, равны.

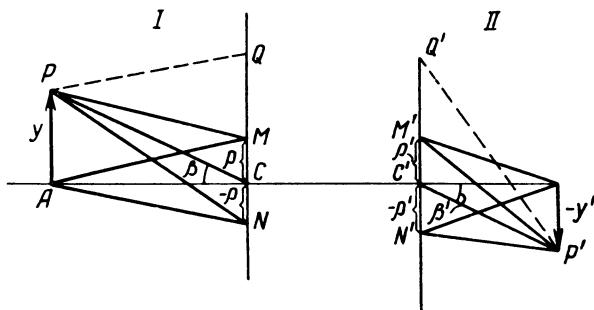


Рис. 19

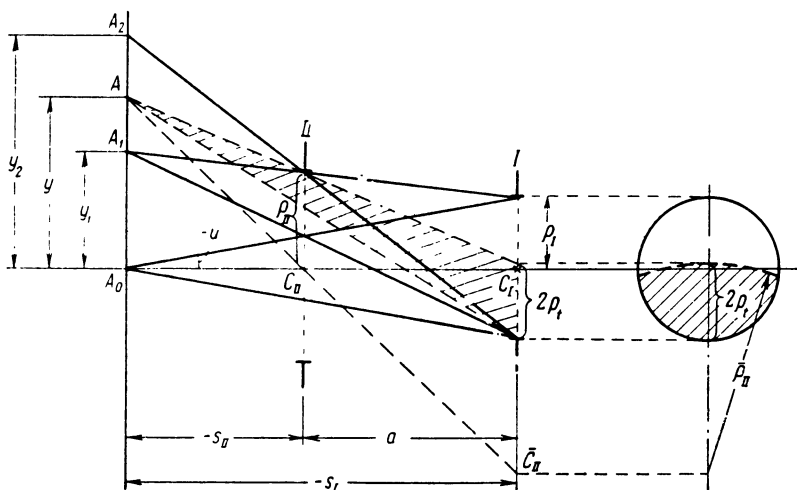


Рис. 20

Предположим теперь, что в пространстве предметов имеются две материальные диафрагмы (рис. 20) *I* и *II*. Расстояние между диафрагмами примем равным  $a$ ; расстояния от центров *I* и *II* диафрагмы до предмета примем равными соответственно —  $s_I$  и  $s_{II}$ , а радиусы отверстий диафрагм —  $\rho_I$  и  $\rho_{II}$ .

Нетрудно представить себе, что если отверстие *II* диафрагмы больше, чем сечение осевого пучка, ограничиваемого *I* диафраг-

мой, то эта  $II$  диафрагма не сможет ограничивать собою пучки лучей, проходящие в отверстие  $I$  диафрагмы до тех пор, пока точка  $A$  на предметной плоскости не займет некоторое, вполне определенное положение  $A_1$  на расстоянии  $y_1$ . Начиная с этого момента,  $II$  диафрагма начнет срезать наклонный пучок лучей и срежет его совсем тогда, когда точка  $A$  займет положение  $A_2$  на расстоянии  $y_2$  от оси.

Это явление срезания наклонного пучка принято называть геометрическим виньетированием или просто виньетированием.

На рис. 20 справа показано сечение пучка в плоскости  $I$  диафрагмы для некоторого положения точки  $A$  между точками  $A_1$  и  $A_2$ . Нетрудно себе представить, что дуга, срезающая часть наклонного пучка, будет иметь радиус кривизны  $\bar{\rho}_{II}$ , являющийся конической проекцией радиуса  $\rho_{II}$  отверстия  $II$  диафрагмы на плоскость  $I$  диафрагмы из центра проекции, расположенного в точке  $A$ .

В соответствии с этим можно записать

$$\frac{y + \rho_I - 2\rho_I}{s_I} = \frac{y - \rho_{II}}{s_{II}}, \quad (125)$$

откуда нетрудно получить выражение для меридионального диаметра

$$2\rho_I = y + \rho_I - \frac{s_I}{s_{II}}(y - \rho_{II}) \quad (126)$$

или

$$2\rho_I = \left(1 - \frac{s_I}{s_{II}}\right)y + \rho_I + \frac{s_I}{s_{II}}\rho_{II} = \left(1 - \frac{s_I}{s_{II}}\right)y + \rho_I + \bar{\rho}_{II}. \quad (127)$$

Формула (127) показывает нам, что изменение меридионального диаметра сечения пучка в плоскости зрачка будет линейной функцией относительно величины предмета; необходимо отметить, что формула (127) будет справедлива лишь в интервале значений  $y$  между  $y_1$  и  $y_2$  — начала и конца виньетирования. Эти значения легко могут быть определены из чертежа:

$$\frac{y_1 - \rho_I}{s_I} = \frac{y_1 - \rho_{II}}{s_{II}}; \quad \frac{y_2 + \rho_I}{s_I} = \frac{y_2 - \rho_{II}}{s_{II}}, \quad (128)$$

откуда

$$y_1 = \frac{\rho_I - \frac{s_I}{s_{II}}\rho_{II}}{1 - \frac{s_I}{s_{II}}} = \frac{\rho_I - \bar{\rho}_{II}}{1 - \frac{s_I}{s_{II}}}; \quad y_2 = \frac{-\rho_I - \frac{s_I}{s_{II}}\rho_{II}}{1 - \frac{s_I}{s_{II}}} = \frac{-\rho_I - \bar{\rho}_{II}}{1 - \frac{s_I}{s_{II}}}. \quad (129)$$

В частном случае

$$\rho_I = \frac{s_I}{s_{II}}\rho_{II} = \bar{\rho}_{II} \quad (130)$$

когда отверстие  $II$  диафрагмы касается апертурного пучка, граница начала виньетирования будет располагаться на оси системы.

В частном случае, если предмет расположен в бесконечности, величины  $y$ ,  $s_I$  и  $s_{II}$  обращаются в  $\infty$  и все наши формулы (127)—(130) переходят в неопределенности. Эти неопределенности легко раскрыть, перейдя от величин  $y$  к тангенсам полевых углов  $\beta$ . После таких преобразований найдем:

$$2\rho_t = -a \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \rho_I + \rho_{II} \quad (131)$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\rho_{II} - \rho_I}{a}; \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{\rho_{II} + \rho_I}{a} \quad (132)$$

График линейного виньетирования при наличии двух диафрагм представлен на рис. 21 ломаной линией, составленной из двух пря-

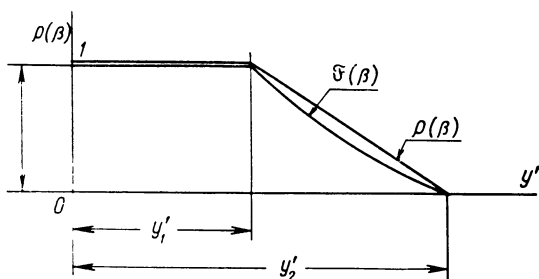


Рис. 21

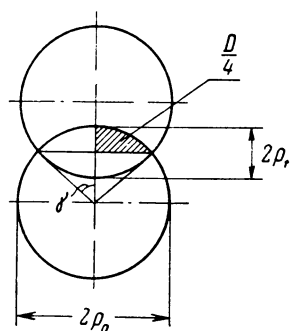


Рис. 22

молинейных отрезков: параллельного оси (для значений  $y$  от нуля до  $y_1$ ) и пересекающего ось  $y$  в точке  $y_2$ .

Для расчета светораспределения по полю зрения необходимо знать величину  $D$  площади сечения наклонного пучка или отношение этой площади к площади  $D_0$  отверстия зрачка входа, называемое виньетированием по площади  $\mathcal{F}(\beta)$ .

Вычисление площади  $D_0$  не вызывает затруднений; значение же площади  $D$  наиболее легко вычислить в том случае, если отображение дуги, срезающей наклонный пучок, будет иметь радиус, равный радиусу отверстия диафрагмы, в плоскости которой определяется площадь сечения пучка. Эта картина представлена на рис. 22.

Пользуясь чертежом, определим четвертую часть искомой площади  $D$ , как половины площади сегмента, стягиваемого углом  $2\gamma$ . Находим

$$\frac{D}{4} = \frac{\rho_0^2}{2} \gamma - \frac{\rho_0^2 \sin \gamma \cos \gamma}{2}, \quad (133)$$

откуда

$$D = \rho_0^2 (2\gamma - \sin 2\gamma) \quad (134)$$

и функция виньетирования по площади  $\mathcal{F}(\beta)$  будет

$$\mathcal{F}(\beta) = \frac{D}{D_0} = \frac{2\gamma - \sin 2\gamma}{\pi} \quad (135)$$

Установим зависимость между линейным виньетированием (или виньетированием по диаметру)  $\rho(\beta) = \frac{2\rho_t}{2\rho_0}$  и виньетированием по площади.

Задавая функции линейного виньетирования ряд значений, равных 1,0; 0,9; 0,8 и т. д., можно определить соответствующие им значения углов  $\gamma$ , так как величины  $\rho_t$  и  $\gamma$ , согласно чертежу, можно выразить зависимостями:

$$\rho_t = \rho_0 (1 - \cos \gamma); \quad \cos \gamma = 1 - \frac{\rho_t}{\rho_0} = 1 - \rho(\beta). \quad (136)$$

Получив же значения углов  $\gamma$ , уже нетрудно вычислить соответствующие значения функции  $\mathcal{F}(\beta)$  по формуле (135).

Эти значения могут быть сведены в таблицу

$\rho(\beta)$	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500	0,400	0,300	0,200	0,100
$\mathcal{F}(\beta)$	1,000	0,873	0,747	0,624	0,505	0,391	0,285	0,188	0,104	0,037

При рассмотрении этой таблицы легко заметить, что в интервале значений  $\rho(\beta)$  от 0,7 до 0,2 функция  $\mathcal{F}(\beta)$  виньетирования по площади приобретает значения, меньшие значений  $\rho(\beta)$  приблизительно на 0,1.

Таким образом, в этом интервале можно дать приближенную зависимость

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{F}(\beta) &= \rho(\beta) - 0,1 \\ 0,7 &\geq \rho(\beta) \geq 0,2 \end{aligned} \right\} \quad (137)$$

В некоторых случаях (например, для зеркально-линзовых объектов) встречаются экраны, перекрывающие собою центральную часть оптической системы; по своей природе это явление, называемое экранированием, аналогично явлению виньетирования, а потому и анализируется таким же способом.

Однако не будем выводить специальных формул для расчета экранирования и ограничимся лишь рассмотрением практического расчета экранирования для двухзеркального объектива системы Кассегрена.

Примем следующие числовые данные:

$$\begin{array}{llll} r_1 = -300 & n_1 = 1 & f' = 300 \text{ мм} & V_2 = 2 \\ d = -100 & n_2 = -1 & s' = 100 \text{ „} & \\ r_2 = -200 & n_3 = 1 & & \end{array}$$



Диаметр объектива примем равным 90 мм.

Схема объектива представлена на рис. 23, а. В числовых данных нами было принято отрицательное значение для толщины  $d$  и отрицательное значение для показателя преломления  $n_2 = -1$ .

Этот прием позволяет нам привести случай отражения к частному случаю преломления и использовать для него все ранее выведенные формулы.

Задавшись значением первой высоты  $h_1 = 45$  и пользуясь просчетом луча по формулам (71) и (33), можно определить высоту на второй поверхности, равной 15 мм; таким образом, второе зеркало, расположенное в ходе лучей, падающих на первое зеркало, будет играть роль экрана.

Диаметр отверстия в первом зеркале обычно принимают равным диаметру второго зеркала; это отверстие можно рассматривать как второй экран, но уже расположенный в плоскости первого зеркала.

Можно построить отображение второго зеркала в обратном ходе через первое зеркало; это отображение мы можем рассматривать как вторую диафрагму (первой диафрагмой будет оправа первого зеркала), ограничивающую входящие в систему пучки лучей; при этом диаметр второй диафрагмы равен диаметру зрачка входа.

Для удобства рассмотрения работы системы Кассегрена ее можно представить в развернутом виде (рис. 23, а), где толщина  $d$  уже будет иметь положительное значение и отраженные лучи после развертки сохраняют первоначальное направление.

На развертке первое зеркало можно рассматривать как систему с положительной силой  $\varphi_1 = \frac{1}{150}$ ; второе зеркало — как систему с отрицательной силой  $\varphi_2 = -\frac{1}{150}$ .

В соответствии с этим нетрудно определить положение отображения второго зеркала через первое, пользуясь формулой Ньютона, приняв величину  $x_1'$ , согласно чертежу, равной  $-50,0$ , т. е.  $\frac{1}{3}$  фокусного расстояния первого зеркала. Тогда значение

$$x_1 = -\frac{f_1'^2}{x_1'} = \frac{150 \cdot 150}{50} = 450,$$

а значение

$$a = x_1 + f_1 = 450 - 150 = 300 \text{ мм.}$$

Величина предельного угла  $\beta$  поля зрения определится отношением

$$\beta = \frac{-y'}{f'} = -\frac{h:3}{f'} = -\frac{45:3}{300} = -0,05.$$

Пользуясь всеми этими величинами, можно выделить картину виньетирования и экранирования отдельно (рис. 23, б).

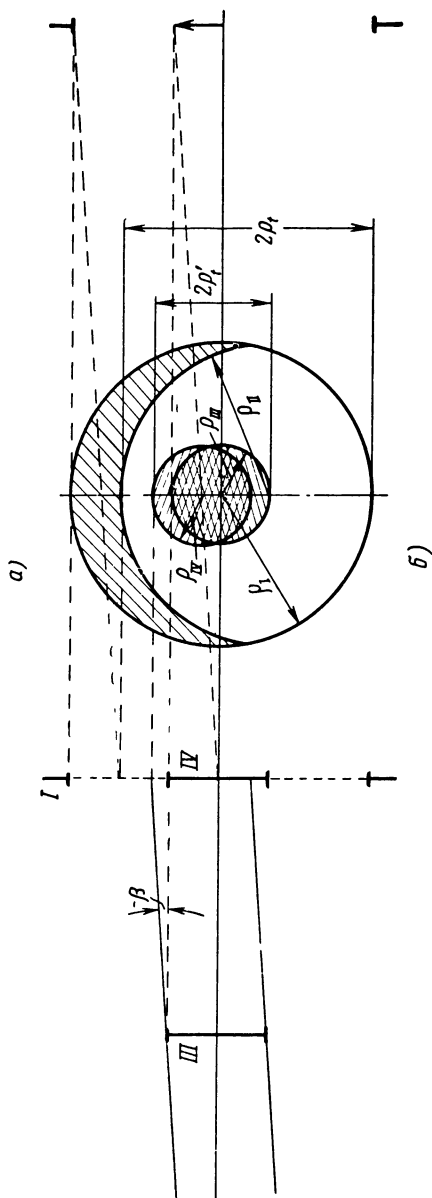
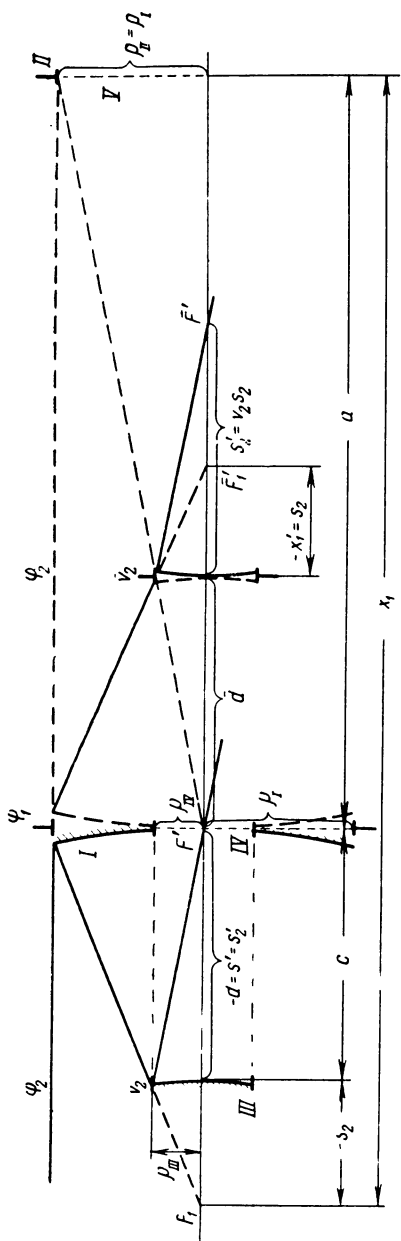


Рис. 23

Первоначально определяем виньетирование без учета экранирования. Величина виньетирования по диаметру определяется по формулам:

$$2 \rho_t = 2 \rho_0 - a \operatorname{tg} \beta = 90 - 300 \cdot 0,05 = 75,$$

$$\rho(\beta) = \frac{75}{90} = 0,833.$$

Величина экранирования, как это нетрудно видеть из чертежа, будет равна удвоенной площади  $D_0$  экрана за вычетом взаимного перекрытия обоих экранов (аналогичного виньетированию). Интерполируя по таблице, получаем

$$D' = 2 D_0' - 0,78 D_0' = 1,22 D_0'.$$

Но так как

$$D_0' = \frac{D_0}{9},$$

то площадь экранирования получается равной

$$D' = \frac{1,22}{9} D_0.$$

Вычитая эту площадь из площади  $D$ , получаем

$$D - D' = 0,78 D_0 - \frac{1,22}{9} D_0 = 0,65 D_0.$$

## § 10. Видимое увеличение

Рассматривая какие-либо два предмета, подобные один другому, но не равные по величине, можно так подобрать расстояния до этих предметов, что оба предмета будут казаться нам одинаковыми по величине. Нетрудно убедиться, что о кажущейся величине предмета нам приходится судить по величине изображения предмета на сетчатке глаза, или что то же, по величине угла, под которым виден предмет, так как этот угол определяет собою величину изображения на сетчатке (рис. 24). Далее нетрудно видеть, что линейная величина изображения определяется не углом  $\gamma$ , а его тангенсом.

Предположим, что невооруженным глазом видим какой-либо предмет под некоторым углом  $\gamma$ , а изображение его через оптическую систему под углом  $\gamma'$ . Тогда получим видимое увеличение  $\Gamma$ , как отношение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (138)$$

Рассмотрим определение видимого увеличения лупы. На рис. 25 в точке  $A$  на расстоянии  $x$  от переднего фокуса  $F$  лупы расположен предмет  $y$ ; в точке  $A'$  на расстоянии  $x'$  от заднего фокуса  $F'$  — его изображение  $y'$ . Глаз наблюдателя расположен на расстоянии  $\xi$  от плоскости предмета. Согласно чертежу можно написать

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{y' \xi}{y \xi'} = V \frac{\xi}{\xi'} = -\frac{\xi x'}{f' \xi'} . \quad (139)$$

Но величина  $\xi'$  может быть выражена через расстояние  $L$  между предметом и изображением или через расстояние  $a$  между

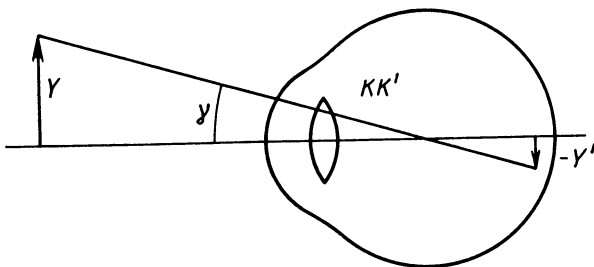


Рис. 24

задним фокусом  $F'$  и зрачком глаза

$$\xi' = \xi - L = a - x' . \quad (140)$$

В соответствии с этим формула (139) примет вид

$$\Gamma = V \frac{\xi}{\xi'} = \frac{V}{1 - \frac{L}{\xi}} = \frac{\xi}{f'} \left( 1 - \frac{a}{\xi'} \right) . \quad (141)$$

Обратим внимание на следующее обстоятельство.

Величина  $L$  для короткофокусной линзы может быть малой по отношению к расстоянию до предмета. Тогда формула (141) переходит в следующую приближенную формулу

$$\Gamma \cong V . \quad (142)$$

Однако, величина  $\xi'$  должна быть всегда положительной (изображение должно находиться перед глазом, так как в обратном случае глаз не сможет аккомодировать на изображение), поэтому для повышения видимого увеличения  $\Gamma$  выгодно второй член в скобках приравнять нулю, т. е. сделать отрезок равным бесконечности.

С этой целью предмет следует расположить в передней фокальной плоскости лупы; тогда формула (141) перейдет в хорошо из-



Совершенно одинаковые по своим размерам светящиеся элементарные участки в равных условиях могут излучать разное количество световой энергии, обусловливаемое различной интенсивностью излучения или, как это принято называть в оптике и светотехнике, различной яркостью.

Яркость принято обозначать буквой  $B$ . Количество световой энергии, которое излучает элемент  $ds$  в единицу времени, или мощность светового излучения, называют световым потоком и обозначают буквой  $F$  (или в случае элементарного светового потока  $dF$ ).

Ограничивая часть пространства, в котором будем рассматривать излучение, очевидно, ограничим и количество световой энергии в этой части пространства, т. е. величину светового потока. Таким образом, приходим к выводу, что величина светового потока зависит от величины телесного угла  $d\omega$  — части пространства, в которой наблюдается световое излучение.

Изменяя площади светящихся элементов, обладающих различной яркостью, всегда можно подобрать такие их площади, когда эти элементы будут посылать в одном и том же телесном угле равные световые потоки. В этом случае говорят, что такие светящиеся элементы имеют равную в данном направлении силу света  $I$ .

При повороте светящегося элемента относительно направления, в котором рассматривается излучение, площадь элемента будет проектироваться уменьшенной для этого направления пропорционально косинусу угла поворота элемента.

Если при этом яркость элемента сохранится неизменной, то излучаемый световой поток также уменьшится пропорционально косинусу угла поворота элемента.

Все эти соображения позволяют нам написать общее выражение для элементарного светового потока в следующем виде

$$dF = B d\omega \cos i ds. \quad (145)$$

Величина телесного угла  $d\omega$  (в стерadianах)\* измеряется отношением площади, вырезаемой телесным углом на сфере с центром в светящемся элементе, к квадрату ее радиуса.

Если излучение происходит по всем направлениям без ограничения, то тогда величина телесного угла определится отношением поверхности сферы к квадрату ее радиуса и равна  $4\pi$  стерadian.

Чтобы можно было выполнять световые измерения, необходимо одну какую-либо из трех световых величин, входящих в формулу (145), выбрать за основную и создать для нее световой эталон.

---

\* Стерadian (стер) — телесный угол, вырезающий на сфере, описанной вокруг вершины угла, поверхность, площадь которой равна квадрату радиуса сферы.

Такой величиной в настоящее время принято считать силу света  $I$ , единицей измерения которой принята свеча.

В 1948 г. Девятая генеральная конференция по мерам и весам дала следующее определение: «Свеча — это такая сила света, при которой яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины равна 60 свечам на один квадратный сантиметр».

Исходя из формулы (145) и полагая угол  $i = 0$ , легко определить величину

$$B = \frac{dF}{d\omega ds} = \frac{I}{ds} \quad (146)$$

За единицу яркости принят нит ( $\text{нт}$ )\*, равный яркости по-

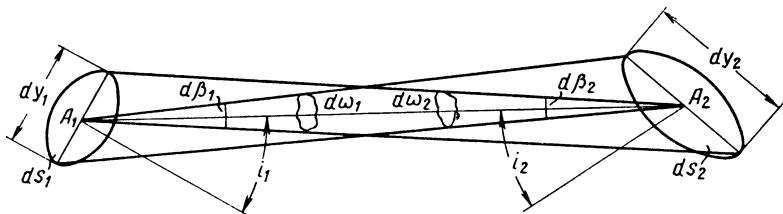


Рис. 26

верхности, один квадратный метр которой дает по направлению своей нормали силу света в одну свечу.

Световой поток, излучаемый источником света в одну свечу в телесном угле в один стерадиан, служит единицей светового потока и называется люменом.

Кроме этих основных величин, в светотехнике и фотометрии встречаемся еще с двумя величинами — освещенностью и отражающей способностью, или альбедо.

Величина освещенности  $E$  определяется отношением величины светового потока, падающего на какую-либо поверхность, к величине площади этой поверхности. За единицу освещенности принят люкс, равный освещенности, создаваемой световым потоком в один люмен, равномерно распределенным на поверхности в один квадратный метр.

Величина отражающей способности диффузно рассеивающей поверхности безразмерна; если идеально рассеивающая поверхность отражает световой поток без потерь, то альбедо  $A$  такой поверхности равна единице.

На рис. 26 представлены: элемент  $ds_1$  и элемент  $ds_2$ ; оба элемента наклонены к прямой  $A_1A_2$  под углами  $i_1$  и  $i_2$ ; телесные углы

\* Препятствия единица яркости стильб равна  $10^4 \text{ нт} = \frac{1 \text{ св}}{1 \text{ см}^2}$ .

$d\omega_1$  и  $d\omega_2$  определим, исходя из ограничения их контурами элементов  $ds_2$  и  $ds_1$ .

Определим величину светового потока, протекающего от элемента  $ds_1$  через элемент  $ds_2$ . Согласно формуле (145) можно написать

$$dF = Bd\omega_1 \cos i_1 ds_1 = B \frac{\cos i_2 ds_2}{[A_1 A_2]^2} \cos i_1 ds_1 = Bd\omega_2 \cos i_2 ds_2. \quad (147)$$

Из сопоставления правой и левой частей формулы (147) нетрудно видеть, что, полагая светящимся элементом элемент  $ds_2$ , можно определить световой поток, излучаемый этим элементом через элемент  $ds_1$ , но при условии соблюдения равенства яркостей обоих элементов.

Таким образом, выражение (147) является инвариантным. Существенно заметить, что величина яркости в этом выражении сохраняется постоянной, совершенно независимо от величины и положения второго из рассматриваемых элементов. Формулу (147), определяющую световой поток, проходящий через две элементарные площадки, иногда называют формулой, определяющей световой поток, протекающий по световой трубке через элементы  $ds_1$  и  $ds_2$ .

Можно представить себе, что нормали к обоим элементам в световой трубке лежат в одной и той же плоскости; рассматривая сечения  $dy_1$  и  $dy_2$  этих элементов в плоскости их нормалей (плоскости чертежа) и вводя плоские элементарные углы  $d\beta_1$  и  $d\beta_2$  в той же плоскости, можно расстояние  $A_1 A_2$  выразить через диаметры элементов и соответственные плоские элементарные углы и углы нормалей  $i_1$  и  $i_2$ , т. е.

$$A_1 A_2 = \frac{dy_1 \cos i_1}{d\beta_2} = \frac{dy_2 \cos i_2}{d\beta_1}. \quad (148)$$

Из (148) нетрудно получить следующий инвариант

$$dy_1 \cos i_1 d\beta_1 = dy_2 \cos i_2 d\beta_2. \quad (149)$$

Обратимся к случаю преломления световой трубки на преломляющей поверхности, разделяющей две среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$  (рис. 27).

На основании закона преломления можно написать равенство

$$n \sin \alpha = n' \sin \alpha', \quad (150)$$

после дифференцирования которого находим зависимость между элементарными плоскими углами  $d\alpha$  и  $d\alpha'$

$$n \cos \alpha d\alpha = n' \cos \alpha' d\alpha'. \quad (151)$$

Обращаясь к (149), можем для пространства с показателем преломления  $n$  принять в качестве второго элемента некоторый участок самой преломляющей поверхности  $ds$ ; в равной степени



можно для второго пространства с показателем преломления  $n'$  принять в качестве элемента предмета тот же самый элемент  $ds$  преломляющей поверхности.

Тогда, дважды пользуясь формулой (149), в формуле (151) можем заменить произведения вида  $\cos \alpha d\alpha$  и в результате получить

$$n \frac{dy}{ds} \cos i d\beta = n' \frac{dy'}{ds} \cos i' d\beta', \quad (152)$$

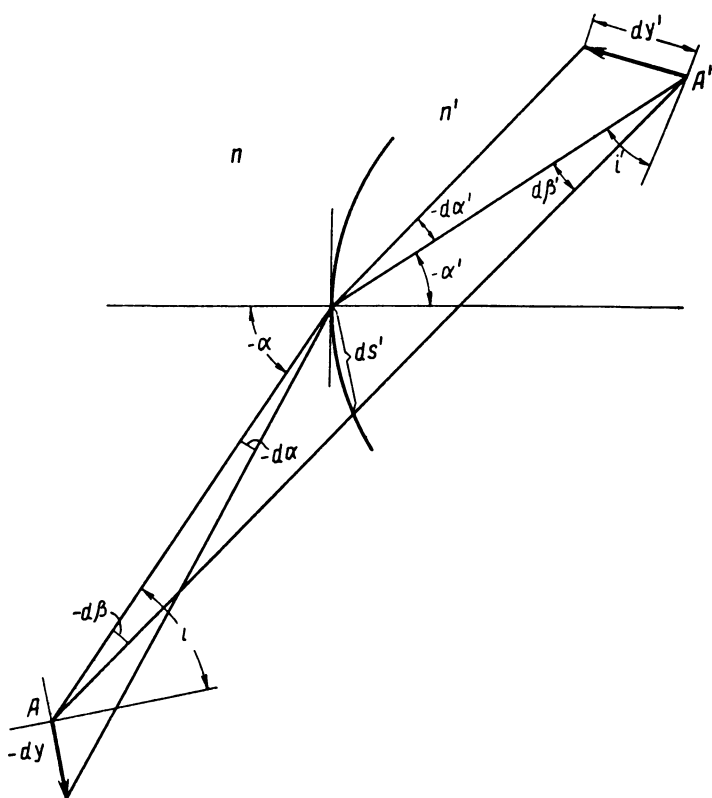


Рис. 27

откуда после сокращения на величину  $ds$  найдем инвариант Штраубеля

$$n dy \cos i d\beta = n' dy' \cos i' d\beta'. \quad (153)$$

Инвариант Штраубеля был получен нами для случая хода лучей в той же плоскости, в которой лежали и нормали к обоим элементам  $dy$  и  $dy'$ , т. е. для случая хода лучей в меридиональной плоскости.

Докажем, что инвариант Штраубеля сохраняет свою справедливость и для хода луча в сагиттальной плоскости.

На рис. 28 элементы  $dy_s$  и  $dy'_s$  образованы путем поворота плоскости рисунка вокруг нормали к преломляющей поверхности  $A_0A_0'$  на некоторый элементарный угол  $d\gamma$ . Тогда

$$d\alpha_s = \frac{dy_s}{AN} = \frac{y d\gamma}{AN} = \frac{AN \sin \alpha}{AN} d\gamma = \sin \alpha d\gamma \quad (154)$$

и аналогично

$$d\alpha'_s = \sin \alpha' d\gamma. \quad (155)$$

Из (154) и (155) получаем

$$n d\alpha_s = n' d\alpha'_s. \quad (156)$$

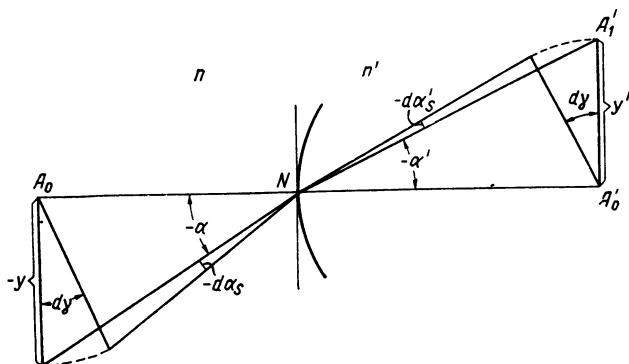


Рис. 28

На основании формулы (149), используемой дважды, находим

$$d\alpha_s = \frac{dy_s d\beta_s}{ds}; \quad d\alpha'_s = \frac{dy'_s d\beta'_s}{ds}, \quad (157)$$

откуда после сокращения на величину  $ds$

$$n dy_s d\beta_s = n' dy'_s d\beta'_s. \quad (158)$$

Выражение (158) также соответствует инварианту Штраубеля.

Перейдем к определению понятия светосилы. Предположим, что при помощи некоторой оптической системы хотим получить изображение какого то элемента светящейся поверхности.

Нас, очевидно, будет интересовать величина освещенности на изображении этого элемента. Обращаясь к определению освещенности, видим, что величина освещенности равна отношению величины светового потока, рисующего изображение нашего элемента, к площади этого изображения. Поэтому из общего выражения для светового потока (147) получим

$$E = \frac{dF}{ds_2} = B d\omega_2 \cos i_2. \quad (159)$$

Из (159) следует, что величина освещенности  $E$  зависит от величины телесного угла  $d\omega_2$ , угла  $i_2$  наклона изображения к оси пучка и от величины яркости  $B$ , т. е. от величины интенсивности излучения (свойства изображаемого предмета).

Стремясь к определению светосилы, как некоторого свойства самой оптической системы, мы, очевидно, должны будем исключить из рассмотрения величину яркости, которая характеризует свойства предмета. Поэтому светосилу системы определяем как отношение освещенности изображения элемента какого-либо предмета к его яркости

$$H = \frac{E}{B} = \cos i_2 d\omega_2. \quad (160)$$

Формула (160) дает наиболее общее выражение для светосилы оптической системы.

Переходя к частному случаю светосилы системы, когда телесный угол мал, а предмет, лежащий на оси системы, перпендикулярен оси, можем определить светосилу через величину телесного угла светового пучка, выходящего из оптической системы.

В случае, когда выходной зрачок системы имеет форму круга с центром на оси системы и когда плоскость зрачка перпендикулярна оси, величина выходного телесного угла определится отношением площади зрачка к квадрату расстояния его от изображения, т. е.

$$H = d\omega' = \frac{\pi \rho'^2}{\xi'^2}. \quad (161)$$

Однако величина отношения радиуса зрачка выхода к расстоянию между зрачком и изображением представляет собою не что иное, как величину элементарного выходного апертурного угла, поэтому (161) можно переписать в виде

$$H = d\omega' = \pi u'^2. \quad (162)$$

Эта формула и представляет собой выражение для светосилы централизованной оптической системы без учета потерь света в самой системе. Полагая, что в системе вследствие поглощения света в стекле и вследствие отражения от поверхностей линз потеряется некоторое количество световой энергии, в формулу (162) должны будем ввести некоторый постоянный коэффициент  $\tau$ , называемый коэффициентом пропускания системы. Тогда (162) примет вид

$$H = \pi \tau u'^2. \quad (163)$$

Таким образом, светосила системы в узких пучках определяется произведением квадрата выходной апертуры на коэффициент пропускания и на величину  $\pi$ .

В частном случае, когда предмет находится в бесконечности, величина выходного апертурного угла определяется отношением

радиуса  $\rho$  входного зрачка системы к ее фокусному расстоянию. Тогда вид формулы (163) будет

$$H = \pi \tau \frac{\rho^2}{f'^2} = \frac{\pi \tau}{4} \left( \frac{2\rho}{f'} \right)^2. \quad (164)$$

Следовательно, светосила системы при предмете, лежащем в бесконечности, пропорциональна квадрату относительного отверстия (квадрату отношения диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию) системы.

Нередко это отношение (а не его квадрат) называют в обыденной жизни ошибочно светосилой.

Перейдем к рассмотрению светосилы в случае широкого осевого пучка. На рис. 29:  $ds$  — элемент предмета;  $u$  — апертурный угол пучка лучей, входящего в оптическую систему;  $d\omega$  — телесный угол, образуемый при помощи элементарного апертурного угла  $d\vartheta$  и элементарного угла поворота  $d\gamma$  вокруг оси системы.

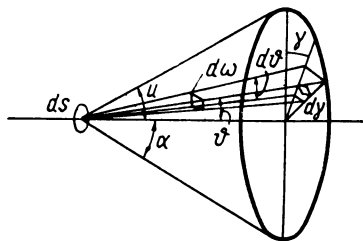


Рис. 29

Определим величину элементарного светового потока, входящего в нашу оптическую систему. Согласно (147), можно написать

$$dF = B d\omega \cos \vartheta ds. \quad (165)$$

Выражая телесный угол  $d\omega$  через элементарные углы  $d\vartheta$  и  $d\gamma$ , получаем значение

$$d\omega = \operatorname{tg} \vartheta \cos \vartheta d\vartheta d\gamma = \sin \vartheta d\vartheta d\gamma. \quad (166)$$

Пользуясь (165) и (166) и интегрируя по всему входному телесному углу, величину светового потока, вошедшего в систему, можно определить по формуле

$$F = \int_0^{2\pi} d\gamma \int_0^u B \sin \vartheta \cos \vartheta d\vartheta ds. \quad (167)$$

Полагая яркость  $B$  постоянной по всем направлениям и выполняя интегрирование, находим

$$F = \pi B \sin^2 u ds. \quad (168)$$

Допуская, что наша система изображает элемент  $ds$  в виде элемента  $ds'$  одной и той же величины для любого из элементарных пучков, входящих в широкий осевой пучок лучей, рассматри-

ваемый нами аналогично (168), можем написать выражение для светового потока, выходящего из нашей оптической системы

$$F' = \pi B \sin^2 u' ds'. \quad (169)$$

До сих пор говорилось о световых пучках, идущих как до, так и после системы в воздухе. Нетрудно представить себе, что при переходе светового пучка из воздуха в стекло (например, когда предмет размещен на поверхности стекла) произойдет изменение апертурного угла без изменения величины светового потока; поэтому в случае, когда будем рассматривать величину светового потока, идущего в среде с показателем преломления, отличным от единицы, согласно закону преломления должны ввести в (168) и (169) квадраты показателей преломления (так как синусы апертурных углов входят в эти формулы в квадратах). Таким образом, формулы (168) и (169) примут вид

$$F = \pi B n^2 \sin^2 u ds, \quad (170)$$

$$F' = \pi B n'^2 \sin^2 u' ds'. \quad (171)$$

Если же учесть прозрачность оптической системы, то

$$F = \pi \tau B n^2 \sin^2 u ds'. \quad (172)$$

Деля (172) на величину  $ds'$ , найдем величину освещенности изображения

$$E = \frac{F}{ds'} = \pi \tau B n'^2 \sin^2 u', \quad (173)$$

а деля далее (173) на яркость предмета  $B$ , получаем светосилу системы для широкого осевого пучка

$$H = \frac{E}{B} = \pi \tau n'^2 \sin^2 u'. \quad (174)$$

Возвратимся к формулам (170) и (171). Полагая прозрачность системы  $\tau = 1$ , можно приравнять выражения для входящего и выходящего из системы световых потоков, т. е.

$$F = F' \quad (175)$$

или после сокращений

$$n^2 \sin^2 u ds = n'^2 \sin^2 u' ds'. \quad (176)$$

Но отношение площадей элементов предмета и изображения равно отношению их линейных размеров, взятому в квадрате, т. е. квадрату линейного увеличения. Таким образом, приходим к следующему замечательному выражению, известному под наименованием условия Аббе (или сокращенно закона синусов)

$$V = \frac{dy'}{dy} = \frac{n \sin u}{n' \sin u'}. \quad (177)$$

Условие синусов получено при постоянстве величины изображения для всех лучей широкого осевого пучка; поэтому естественно нарушение условия синусов повлечет нарушение постоянства величины изображения; в изображении возникает абберрация, известная под названием *комы*.

Нетрудно видеть, что при малых углах  $u$  и  $u'$  условие синусов переходит в инвариант Лагранжа—Гельмгольца.

Рассмотрим светосилу системы, работающей совместно с глазом, например светосилу телескопической системы. В этом случае должны оценивать величину освещенности, создаваемой оптической системой на сетчатке нашего глаза; при этом вполне естественно предположить, что глаз работает без аккомодации. Будем рассматривать случай телескопической системы, которая используется для наблюдения удаленных предметов, когда предмет и изображение находятся на бесконечности.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом нами случае показатель преломления последней среды не равен единице, так как последняя среда — стекловидное тело, заполняющее собою камеру глаза, отличается от воздуха. Поэтому воспользуемся наиболее общим выражением (174).

Обратимся к условию синусов (177). Полагая нашу систему скорректированной (что необходимо для получения достаточно хорошего изображения на сетчатке глаза), мы вправе воспользоваться этим условием для определения величины входного апертурного угла  $u'$ .

Пользуясь формулой для линейного увеличения, находим

$$-n'f \sin u' = nx \sin u. \quad (178)$$

В интересующем нас случае удаленного предмета правая часть формулы (178) обращается в неопределенность; для раскрытия этой неопределенности можем при больших значениях  $x$  определить высоту  $h$  входящего в систему луча на передней фокальной плоскости системы.

Эта высота, равная произведению тангенса входного апертурного угла на расстояние  $x$  предмета от переднего фокуса, при обращении величины  $x$  в бесконечность сохранится неизменной.

Таким образом, можно написать

$$-\frac{n'f}{n} = f' = \frac{h}{\sin u'}. \quad (179)$$

Определяя из (179) величину  $\sin u'$  и зная величины фокусного расстояния всей системы совместно с глазом, а также высоту входящего в эту совокупную систему луча и высоту  $\rho'$  луча, входящего в глаз, будем иметь

$$\sin u' = \frac{h}{f'} = \frac{\rho'}{f'_{\text{глаз}}}. \quad (180)$$

Подставляя в (174) значение (180), получаем

$$H = \pi \tau n'^2 \frac{\rho'^2}{f_{\text{гл}}^2} \quad (181)$$

Величины  $n'$  и  $f_{\text{гл}}'$ , характеризующие глаз, являются постоянными величинами. Поэтому выгодно для упрощения формул исключить эти величины, принимая для светосилы телескопической системы условную величину

$$H_1 = \frac{H}{n'^2} f_{\text{гл}}^2 = \pi \tau \rho'^2 \quad (182)$$

Таким образом, величина светосилы телескопической системы будет определяться квадратом  $\rho'$  радиуса зрачка выхода телескопической или иной оптической системы, работающей совместно с глазом.

Следует сейчас же отметить, что величина светосилы системы, работающей совместно с глазом, не может превышать значений, соответствующих наибольшему радиусу зрачка глаза, так как при выходном зрачке системы, большем зрачка глаза, роль выходного зрачка системы станет играть зрачок глаза, если работаем оптической системой совместно с глазом.

## § 12. Потери света в оптических системах. Формулы Френеля. Просветление оптики. Закон Ламберта

Потери света на поглощение в стекле. Даже наилучшие сорта оптического стекла не вполне прозрачны для проходящего через стекло света; яркость пучка лучей, распространяющегося в какой-либо среде, уменьшается с увеличением пути, пройденного светом в этой среде. Полагая яркость в некоторой точке пути равной  $B$ , а яркость в некоторой бесконечно близкой точке, отстоящей на расстоянии  $dl$  от первой, пониженной на величину  $dB$  (пропорционально  $B$  и  $dl$ ), можем написать

$$dB = -kBdl, \quad (183)$$

откуда

$$\int \frac{dB}{B} = \lg B = -kl + c. \quad (184)$$

Полагая  $l=0$ , находим

$$c = \lg B_{l=0} = \lg B_0. \quad (185)$$

Таким образом,

$$B = B_0 e^{-kl}. \quad (186)$$

Заменяя  $e^{-k}$  через коэффициент пропускания  $\tau$ , получаем

$$B = B_0 \tau^l. \quad (187)$$

Полагая  $l = 1$  см, для величины падения яркости на 1 см найдем

$$\Delta B = B - B_0 = B_0(1 - \tau). \quad (188)$$

Величина  $1 - \tau$  называется коэффициентом поглощения.

При прохождении света через преломляющую поверхность, разделяющую две среды с показателями  $n$  и  $n'$ , часть света не преломляется, а отражается от преломляющей поверхности, являясь тем самым потерями преломленного светового потока.

Принимая количество световой энергии, падающей на преломляющую поверхность, за единицу, получаем для количества энергии отраженной части следующее выражение, носящее название формулы Френеля

$$r = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\operatorname{tg}^2(i - i')}{\operatorname{tg}^2(i + i')} \right\}, \quad (189)$$

где углы  $i$  и  $i'$  суть углы падения и преломления лучей. Пользуясь законом преломления Снеллиуса—Декарта,

$$n \sin i = n' \sin i', \quad (190)$$

после простых тригонометрических преобразований для случая нормального падения светового потока на преломляющую поверхность, когда  $i = i' = 0$ , получаем

$$r = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2}. \quad (191)$$

В случае преломления светового потока на поверхности, разделяющей среды с показателями  $n = 1$ ,  $n' = 1,5$  (воздух-стекло), нетрудно определить количество отраженного света

$$r = \frac{(1,5 - 1)^2}{(1,5 + 1)^2} = 0,04,$$

т. е. на поверхности, разделяющей воздух и стекло, теряется около 4% светового потока.

Потери света на поверхностях склейки флинта ( $n = 1,6$ ) с кроном ( $n = 1,5$ ) едва достигают величины  $r = 0,001$ , т. е. 0,1%, которой вполне можно пренебречь при подсчетах потерь света в системе на отражение.

В табл. 1 приведены данные, характеризующие зависимость потерь света на отражение от величины угла падения лучей для случая поверхности, разделяющей воздух ( $n = 1$ ) и тяжелый флинт ( $n = 1,6289$ ).

Из приведенной таблицы нетрудно видеть, что количество отраженного света очень быстро возрастает при углах падения  $70^\circ$  и больше. Для грубого определения потерь света на отражение



Т а б л и ц а 1

Угол падения	0°	30°	45°	60°	70°	80°	85°	90°
Количество отра- женного света, %	5,7	5,9	6,8	10,9	19,2	40,4	62,3	100

в системе, имеющей  $m$  поверхностей, разделяющих стекло и воздух, примем потери на отражение от одной поверхности в среднем равными 5%. Тогда можно пользоваться формулой

$$k \% = (1 - 0,95^m) 100 \% . \quad (192)$$

Так, например, для объектива, имеющего восемь поверхностей стекла, соприкасающихся с воздухом, получаем

$$k \% = (1 - 0,95^8) 100 \% = 33,5 \% .$$

Просветление оптики. Потери света на отражение от поверхностей линз оптической системы, как это только что видели, могут достигать весьма ощутимых величин. Кроме того, свет после двух отражений от поверхностей линз системы, может попасть на основное изображение и весьма существенно снизить контрастность изображения.

Однако в настоящее время потери света на отражение могут быть весьма значительно снижены путем просветления оптики.

Физическая сущность просветления оптики заключается в следующем. На поверхность, разделяющую стекло и воздух, наносят каким-либо способом тонкую пленку толщиной в  $1/4$  длины световой волны в пленке, причем коэффициент преломления такой пленки подбирается с таким расчетом, чтобы световые потоки, отраженные от поверхности раздела стекло—пленка и от поверхности раздела пленка—воздух, были по возможности равны (рис. 30).

Нетрудно представить себе, что таких два отраженных световых потока должны быть когерентными; в силу этого оба потока будут интерферировать между собою.

Вполне понятно, что в том случае, когда разность фаз этих двух интерферирующих потоков будет составлять полволны (а для этого и необходимо иметь толщину просветляющей пленки, как уже говорилось, равной  $1/4$  световой волны в пленке), оба отраженных потока будут взаимно погашаться, т. е. световая энергия данной длины волны не сможет отразиться от нашей просветленной поверхности.

Практически, однако, ни коэффициенты преломления, ни толщины просветляющих пленок не могут быть подобраны в строгом соответствии с приведенными выше соображениями; более того, если бы нам и удалось достигнуть полного гашения для отраженных световых потоков какой-либо одной определенной дли-

ны волны, то для других длин волн потребовалось бы уже иная толщина слоя просветляющей пленки и, таким образом, для других участков спектра строгое гашение света будет нарушенным.

Обычно стремятся обеспечить наиболее полное гашение (просветление) для желтой части спектра; в красной и синей частях спектра снижение величины отраженного света будет несколько меньшим, нежели в желтой части спектра; в силу этого просветленная поверхность при рассматривании в отраженных лучах приобретает характерную голубовато-фиолетовую окраску.

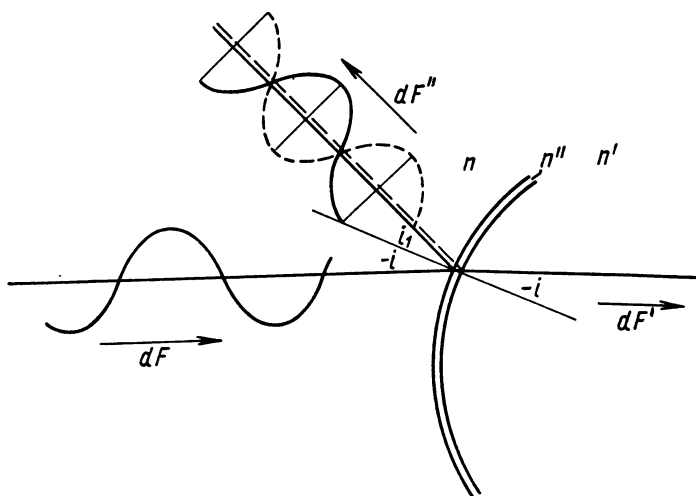


Рис. 30

Существует несколько различных способов получения просветляющих пленок; наиболее простым из них является так называемое химическое просветление, осуществляемое погружением просветляемой линзы на определенное время в раствор уксусной кислоты; при этом достигается снижение потерь света на отражение примерно до 2%; вторым способом, получившим в настоящее время несравненно более широкое распространение, является так называемое физическое просветление, осуществляемое посредством испарения фтористого магния в вакууме; этот способ обеспечивает снижение отраженного светового потока до 1%. В последнее время стали распространяться более совершенные двухслойное и даже трехслойное просветления.

Эффект просветления получается различным для различных сортов оптического стекла; для иллюстрации изменения эффекта просветления приведем значения величин отраженных световых потоков для различных сортов оптического стекла, просветленных как химическим, так и физическим способами (табл. 2).

Займемся рассмотрением вопроса об освещенности (светосиле) для элементов предмета и изображения вне оси системы (закон Ламберта). Предположим, что имеем два одинаковых элемента

Таблица 2

Относительная величина отраженного потока			
просветление химическое		просветление физическое	
$n_D$	$R, \%$	$n_D$	$R, \%$
1,50 — 1,52	3 — 2,7	до 1,55	1,6
1,56 — 1,60	2,2 — 2,0	1,55 — 1,60	1,4
1,61 — 1,64	2 — 1,7	1,60 — 1,65	1,0
1,65 — 1,70	1,7 — 1,4	1,65 — 1,70	0,9
1,71 — 1,75	1,3 — 1,1	Свыше 1,70	0,6

$ds_0$  и  $ds$  плоскости, перпендикулярной оси и обладающей одинаковой яркостью во всех своих точках (рис. 31), причем элемент  $ds_0$  расположен на оси системы в точке  $A_0$ , а элемент  $ds$  — в точке  $A$ . Световой поток  $dF$ , попадающий из элемента в оптическую

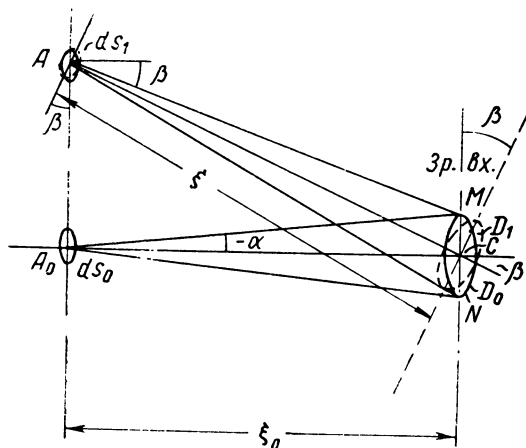


Рис. 31

систему, аналогично предыдущему, будет пропорционален площади поперечного сечения светового потока в зрачке входа, площади проекции  $ds_1$  элемента  $ds$  на плоскость, перпендикулярную направлению  $AC$  светового потока, и обратно пропорционален квадрату расстояния  $\xi$  от центра  $A$  элемента  $ds$  до центра  $C$  зрачка входа. Таким образом, можно написать

$$dF = B \frac{D_1}{\xi^2} ds_1. \quad (193)$$

Перейдем к определению величин  $D_1$ ,  $\xi$  и  $ds_1$ . Из рис. 31 следует, что площадь поперечного сечения пучка есть не что иное, как проекция площади  $D$  зрачка входа на плоскость, перпендикулярную направлению  $AC$  светового потока. Поэтому

$$D_1 = D \cos \beta. \quad (194)$$

Аналогично определяется  $ds_1$  как проекция  $ds$

$$ds_1 = ds \cos \beta. \quad (195)$$

Далее из треугольника  $A_0AC$  следует

$$\xi = \frac{\xi_0}{\cos \beta}. \quad (196)$$

Подставляя (194), (195) и (196) в (193), получаем

$$dF = B \frac{D}{\xi_0^2} \cos^4 \beta ds. \quad (197)$$

В случае, если элемент  $ds$  переходит в положение элемента  $ds_0$ , угол  $\beta = 0$ ,  $D = D_0$ , то (197) будет иметь вид

$$dF_0 = B \frac{D_0}{\xi_0^2} ds_0. \quad (198)$$

Деля (197) на (198), находим

$$\frac{dF}{dF_0} = \frac{D}{D_0} \cos^4 \beta = \mathfrak{F}(\beta) \cos^4 \beta, \quad (199)$$

где  $\mathfrak{F}(\beta)$  — некоторая функция от  $\beta$ , определяющая виньетирование  $\frac{D}{D_0}$ .

Перейдем к определению освещенностей  $E$  и  $E_0$  для элементов  $ds'$  и  $ds'_0$ . Пользуясь (146), находим

$$E = \frac{dF}{ds'}; \quad E_0 = \frac{dF_0}{ds'_0}. \quad (200)$$

Составим отношение освещенностей  $E$  и  $E_0$ , равное светораспределению

$$\Phi(\beta) = \frac{E}{E_0} = \frac{dF}{dF_0} \cdot \frac{ds'_0}{ds'}. \quad (201)$$

Нетрудно видеть, что вследствие равенства элементов  $ds$  и  $ds_0$  (по условию) и постоянства линейного увеличения элементы  $ds'$  и  $ds'_0$  также будут равны, откуда их отношение будет равно единице. Поэтому на основании (201), (199) и  $\frac{ds'_0}{ds'} = 1$  получаем

$$\Phi(\beta) = \frac{E}{E_0} = \frac{dF}{dF_0} = \mathfrak{F}(\beta) \cos^4 \beta. \quad (202)$$

При отсутствии виньетирования  $\mathfrak{F}(\beta) = \text{const} \doteq 1$  находим следующее выражение для светораспределения

$$\Phi(\beta) = \frac{E}{E_0} = \cos^4 \beta. \quad (203)$$

Необходимо отметить, что принципиально вполне возможно получать значения функции виньетирования  $\mathfrak{F}(\beta)$  большими единицы; в этих случаях падение освещенности  $\Phi(\beta)$  будет протекать медленнее, чем по закону четвертой степени косинуса полевого угла.

Чтобы получить функции виньетирования со значениями, большими единицы, необходимо сохранить определенные соотношения для исправления аберраций части системы, разделяющей пространство предметов и пространство, в котором размещена материальная апертурная диафрагма.

Заметим, что для ряда сверхширокоугольных объективов (типа Руссар) были получены функции светораспределения со значениями  $\mathfrak{F}(\beta) \approx \frac{1}{\cos \beta}$  и даже  $\mathfrak{F}(\beta) \approx \frac{1}{\cos^3 \beta}$ .

## Глава V

### УЧЕНИЕ ОБ АБЕРРАЦИЯХ

#### § 13. Общие соображения. Принцип Ферма

До сих пор во всех наших рассуждениях считалось, что гомоцентрическому пучку лучей в пространстве предметов соответствует также гомоцентрический пучок лучей в пространстве изображений. Кроме того, нами было доказано, что для одной преломляющей поверхности (а следовательно, и для любой центрированной оптической системы) для всех лучей, образующих достаточно малые углы падения и преломления на преломляющих поверхностях и образующих также достаточно малые углы лучей с осью системы, условие сопряженности гомоцентрических пучков выполняется автоматически.

Перейдем к рассмотрению пучков, лучи которых не образуют малых углов с осью системы и малых углов падения и преломления, т. е., как говорят, к рассмотрению широкого пучка лучей.

Совершенно естественно, что для широких пучков лучей в общем случае уже не будет наблюдаться гомоцентричность пучков лучей, выходящих из оптической системы; эти нарушения гомоцентричности, а также и несоответствие положения точек реального изображения законам солинейного сродства мы будем называть аберрациями того или иного рода.

Вместе с тем негомоцентричность пучка может быть охарактеризована величинами различного вида; мы можем, например, оценивать нарушения гомоцентричности в плоскости сечения пучка перпендикулярно его оси (поперечные aberrации), или по размещению точек пересеченных лучей пучка с его осью в продольном направлении, или при помощи различного рода коэффициентов и т. п.

Среди различных форм aberrаций особый интерес представляют отступления поверхности, нормальной лучам пучка, или, как говорят, волновой поверхности от сферической формы; эти отступления называют волновой формой aberrаций или сокращенно волновыми aberrациями.

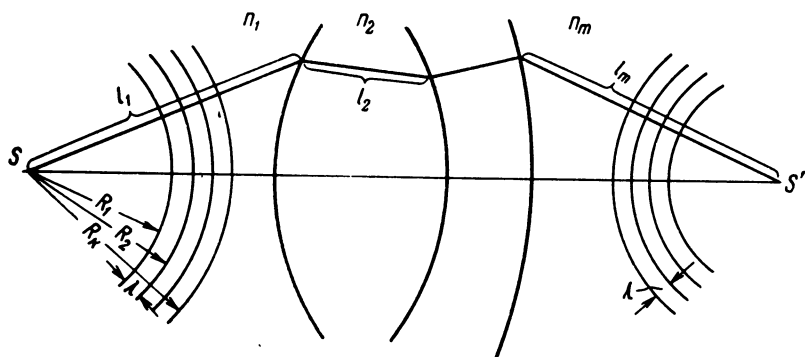


Рис. 32

Ценностью волновой формы представления aberrаций является возможность связать геометрические aberrации с распределением световой энергии в пятне рассеяния с учетом волновой природы света (дифракционное изображение).

Представим себе, что в оптически однородной среде имеется светящаяся точка  $S$ .

С точки зрения волновой теории света эту светящуюся точку можно рассматривать как источник световых колебаний, имеющих определенную амплитуду  $a$ , частоту  $\omega$ , период колебания  $T$  и скорость распространения  $c$ , одинаковую по всем направлениям. Колебательный процесс может быть представлен формулой

$$U = a \cos \frac{2\pi}{T} t. \quad (204)$$

Если задавать времени  $t$  ряд значений  $t_1 = T$ ;  $t_2 = 2T$ ; ...  $t_k = kT$  и т. д., то нетрудно видеть, что согласно формуле (204) колебательный процесс будет находиться в эти моменты в одной и той же фазе колебания, так как значение величины  $U$  для целых значений  $k$  будет сохраняться неизменным.

Вместе с тем за время  $t_1$ ;  $t_2$  ...  $t_k$  световые возмущения, распространяющиеся из точки  $S$  (рис. 32), пройдут расстояния

$R_1 = t_1 c$ ,  $R_2 = t_2 c \dots R_k = t_k c$ . Составляя разности этих расстояний, видим, что эти разности будут равны произведению

$$cT = \lambda, \quad (205)$$

которое определяет нам длину волны света в данной среде.

Множества точек, в которых наблюдается одна и та же фаза колебания, составляют систему эквидистантных друг другу поверхностей, называемых волновыми поверхностями. В рассматриваемом нами случае излучения от светящейся точки в однородном пространстве волновые поверхности представят собой семейство сфер, центром которых служит источник света.

Заметим, что волновые поверхности можно считать расположенными в пространстве неподвижно; световая волна, расходящаяся от источника света, будет последовательно совпадать со всеми волновыми поверхностями в те моменты, когда будет одна и та же фаза колебания. Представим себе, что на пути распространения света находится какая-либо оптическая система, составленная из ряда преломляющих поверхностей (рис. 33).

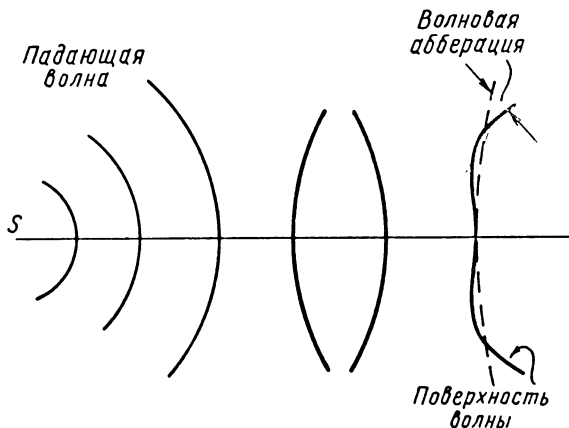


Рис. 33

При прохождении света через первую и последующие поверхности оптической системы скорость его распространения, а также и форма волновых поверхностей будут изменяться в соответствии с изменением показателя преломления. При этом в момент перехода через преломляющую поверхность волновая поверхность будет претерпевать излом.

Совершенно очевидно, что в результате всех преломлений при прохождении света через оптическую систему форма волновой поверхности по выходе из системы уже не будет сферической; возникшие отступления от идеальной сферы и будут волновыми аберациями.

Если бы оптическая система была идеально скорректирована, то тогда и выходящая волновая поверхность также должна была бы иметь строго сферическую форму с центром в точке изображения (рис. 32).

Нетрудно видеть, что между двумя любыми волновыми поверхностями всегда будет наблюдаться (по любому из лучей) одинаковое число промежуточных волновых поверхностей.

В частном же случае идеальной системы нетрудно усмотреть, что и числа волновых поверхностей между источником света и какой-либо наперед выбранной волновой поверхностью также должны быть одинаковыми вдоль любых лучей, равно как и числа волновых поверхностей между произвольной волновой поверхностью после системы и точкой изображения. В результате можно сделать вывод, что для идеальной оптической системы число волн между точкой предмета и точкой изображения будет одинаковым для всех лучей.

Это положение носит название принципа Ферма. Выразим этот принцип аналитически. Если принять, что на отдельных участках рассматриваемого луча  $l_1, l_2, \dots, l_m$  с показателями преломления  $n_1, n_2, \dots, n_m$  будет находиться  $N_1, N_2, \dots, N_m$  волновых поверхностей, можно выразить числа  $N$  как отношения отрезков  $l$  к соответствующим длинам волн  $\lambda$ :

$$N_1 = \frac{l_1}{\lambda_1} = \frac{l_1 n_1}{\lambda_0}; \quad N_2 = \frac{l_2}{\lambda_2} = \frac{l_2 n_2}{\lambda_0}; \quad \dots \quad N_m = \frac{l_m n_m}{\lambda_0}. \quad (206)$$

Суммируя величины  $N_1, N_2, \dots, N_m$ , можем записать

$$N = \sum N_i = \frac{1}{\lambda_0} \sum l_i n_i = \text{const}. \quad (207)$$

Эта сумма называется оптической длиной хода луча. Из формулы (207) следует, что оптическая длина хода вдоль любого из лучей должна быть постоянной величиной.

#### § 14. Переход от волновых aberrаций к лучевым

На рис. 34 представлен участок волновой поверхности, заключенный между координатными плоскостями  $XOY$  и  $XOZ$ . В точке  $M$  с координатами  $(x_1, y_1$  и  $z_1)$  этой волновой поверхности восстановлена нормаль, пересекающая плоскость  $ZOY$  в точке  $M_0$  с координатами  $y_0$  и  $z_0$ . Уравнение волновой поверхности представим в виде

$$x = f(y, z). \quad (208)$$

Напишем уравнения следов пересечения волновой поверхности с плоскостями  $y = y_1$  и  $z = z_1$

$$\left. \begin{aligned} x &= f(z, y = y_1 = \text{const}) \\ x &= f(z = z_1 = \text{const}, y) \end{aligned} \right\}. \quad (209)$$



Уравнения нормалей к этим следам в точке  $M$  волновой поверхности имеют вид:

$$X - x_1 = - \frac{Z - z_1}{\frac{\partial f}{\partial z}}; \quad X - x_1 = - \frac{Y - y_1}{\frac{\partial f}{\partial y}}. \quad (210)$$

Система этих двух уравнений определяет проекции нормали к волновой поверхности в точке  $M$  на обе координатные плоскости.

Приравнявая текущую координату  $X=0$ , найдем координаты  $z_0 = \sigma_t$  и  $y_0 = \sigma_s$  точки пересечения нормали с плоскостью  $ZOY$

$$\sigma_t = \frac{\partial f}{\partial z} x_1 + z_1; \quad \sigma_s = \frac{\partial f}{\partial y} x_1 + y_1, \quad (211)$$

которые представляют собой поперечные аберрации для луча (нормали), проходившего через точку  $M$ .

Нас будет интересовать зависимость величин поперечных аберраций не от координат самой волновой поверхности, а от отступлений волновой по-

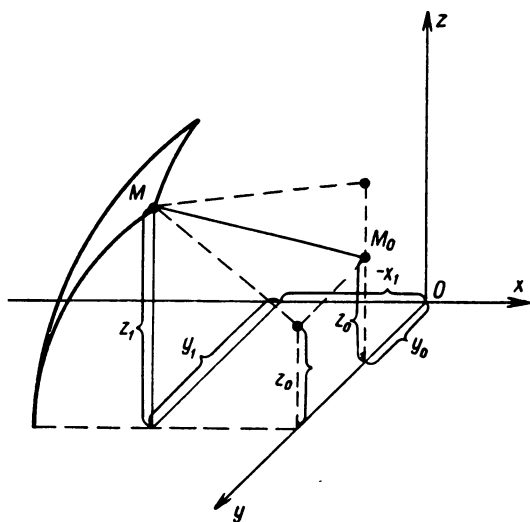


Рис. 34

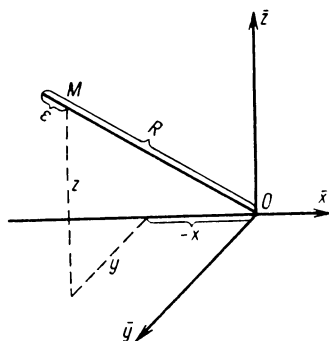


Рис. 35

верхности от сферы — от волновых аберраций.

Соединяя точку  $M$  с началом координат  $O$  прямой линией, мы можем на этой прямой отложить отрезок  $R$ , равный радиусу сферы сравнения; отстояние  $\epsilon$  точки  $M$  от этой сферы и примем за величину волновой аберрации (рис. 35).

Выразим величину расстояния точки  $M$  от начала координат

$$(R - \epsilon)^2 = x^2 + y^2 + z^2. \quad (212)$$

При помощи дифференцирования этого выражения получаем, пренебрегая членом, умноженным на малую величину  $\epsilon$ ,

$$-2R \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 2 \frac{\partial f}{\partial z} x + 2z = 2\sigma_t; \quad -2R \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 2 \frac{\partial f}{\partial y} x + 2y = 2\sigma_s. \quad (213)$$

Но величины  $y$  и  $z$  могут быть выражены приближенно через  $R$  и соответственные апертурные углы  $u_i$  и  $u_s$ ,

$$z \approx Ru_i; \quad y \approx Ru_s. \quad (214)$$

После подстановки (214) формулы (213) преобразуются:

$$-\sigma_t = \frac{\partial \epsilon}{\partial u_i}; \quad -\sigma_s = \frac{\partial \epsilon}{\partial u_s}. \quad (215)$$

Величина волновой аберрации  $\epsilon$  может быть представлена в виде разложения в ряд по апертурным углам  $u_i$  и  $u_s$ .

Учитывая симметрию относительно меридиональной плоскости, можно написать

$$\epsilon = \epsilon_0 + Au_i + A'_i u_i^2 + A_s u_s^2 + A'' u_i^3 + C'' u_i u_s^2 + \dots \quad (216)$$

В этом выражении постоянная  $\epsilon_0$  может быть исключена выбором соответственной сферы сравнения; член же  $Au_i$ , возникающий при смещении центра сферы сравнения с оси пучка, может быть приравнен нулю, если принять, что это смещение отсутствует. Тогда два члена, содержащие вторые степени апертурных углов, определяют собой меридиональное и сагиттальное искривления изображения; члены с третьими степенями апертурных углов определяют кому, члены с четвертыми степенями—сферическую аберрацию.

Величины самих коэффициентов  $A'_i$ ,  $A'_s$ ,  $A''$  и т. д. в общем случае будут зависеть от величины предмета  $y$  или полевого угла  $\beta$ ; при небольших полях зрения можно ограничиться приближенными зависимостями, пренебрегая членами, в которых сумма показателей степеней апертурных и полевых углов будет более четырех. В этом случае коэффициенты, характеризующие меридиональное и сагиттальное искривления изображения, будут зависеть от второй степени полевого угла или величины предмета. Для членов, определяющих собой кому, коэффициенты будут зависеть линейно, а коэффициенты, определяющие сферическую аберрацию, окажутся постоянными. Следовательно, величина сферической аберрации в любой точке поля и в том числе на оси системы будет постоянна и центрична относительно оси пучка.

Из этого следует, что существует один независимый коэффициент сферической аберрации. Точно так же можно показать (но мы это делать не будем), что и для комы будет существовать лишь один независимый коэффициент.

Поперечные аберрации, как уже говорилось, соответствуют частным производным волновой аберрации по апертурным углам.

Вместе с тем представляется возможным установить зависимость между коэффициентами, определяющими поперечные аберрации III порядка, и параметрами, определяющими конструктивные элементы оптической системы.

Эти зависимости, известные под названием формул Зейделя\*, приводятся без выводов:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= -\frac{1}{2n'} [u_t' (u_t'^2 + u_s'^2) S_I + (3u_t'^2 + u_s'^2) \beta_1 S_{II} + \\ &\quad + u_t' \beta_1^2 (3S_{III} + J^2 S_{VI}) + \beta_1^3 S_V] \\ \sigma_s &= -\frac{1}{2n'} [u_s' (u_t'^2 + u_s'^2) S_I + 2u_t' u_s' \beta_1 S_{II} + \\ &\quad + u_s' \beta_1^2 (S_{III} + J^2 S_{IV})] \end{aligned} \right\}. \quad (217)$$

В этих формулах углы для нулевого луча будут  $\alpha_1 = 0$  и  $\alpha' = 1$ ; высота  $h_1 = 1$ ; фокусное расстояние всей системы  $f'$  будет в силу этого также равно единице. Угол второго нулевого луча, определяющего положение зрачков,  $\beta_0 = 1$ .

Инвариант  $J$  равен

$$J = n' \alpha' y' = -n_1 f' = -n_1. \quad (218)$$

В частном случае, если  $n_1 = 1$ , величина  $J$  будет равна минус единице.

Суммы  $S_I$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{III}$ ,  $S_{IV}$  и  $S_V$  можно представить в следующей форме

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \Sigma h_s P_s \\ S_{II} &= \frac{H_1}{h_1} \Sigma h_s P_s + J \Sigma (h_s S_s P_s - W_s) \\ S_{III} &= \left( \frac{H_1}{h_1} \right)^2 \Sigma h_s P_s + 2J \frac{H_1}{h_1} \Sigma (h_s S_s P_s - W_s) + \\ &\quad + J^2 \Sigma \left( h_s S_s^2 P_s - 2S_s W_s + \frac{1}{h_s} \Delta_s \frac{\alpha}{n} \right) \\ S_{IV} &= \Sigma \frac{1}{h_s} \Delta_s \frac{\alpha n}{nn'} = -\Sigma \frac{1}{r_s} \Delta_s \frac{1}{n} \\ S_V &= \left( \frac{H_1}{h_1} \right)^3 \Sigma h_s P_s + 3 \left( \frac{H_1}{h_1} \right)^2 J \Sigma (h_s S_s P_s - W_s) + \\ &\quad + 3 \frac{H_1}{h_1} J^2 \Sigma \left( h_s S_s^2 P_s - 2S_s W_s + \frac{1}{h_s} \Delta_s \frac{\alpha}{n} \right) + \\ &\quad + \frac{H_1}{h_1} J^2 \Sigma \frac{1}{h_s} \Delta_s \frac{\alpha n}{nn'} + J^3 \Sigma \left[ h_s S_s^3 P_s - 3S_s^2 W_s + \right. \\ &\quad \left. + \frac{S_s}{h_s} \left( 3 \Delta_s \frac{\alpha}{n} + \Delta_s \alpha n \right) - \frac{1}{h_s^2} \Delta_s \frac{1}{h^2} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (219)$$

\* Г. Г. Слюсарев. Метод расчета оптических систем. ОНТИ, 1937.

где

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \frac{(\alpha_{s+1} - \alpha_s)^2}{\left(\frac{1}{n_{s+1}} - \frac{1}{n_s}\right)^2} \left( \frac{\alpha_{s+1}}{n_{s+1}} - \frac{\alpha_s}{n_s} \right) \\ W_s &= \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{\frac{1}{n_{s+1}} - \frac{1}{n_s}} \left( \frac{\alpha_{s+1}}{n_{s+1}} - \frac{\alpha_s}{n_s} \right) \\ S_s &= \sum_2^s \frac{d_{k-1}}{n_k h_k h_{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (220)$$

и  $H_1$  — высота второго нулевого луча на I поверхности; в нашем случае, так как полевой угол  $\beta_0$ , второго нулевого луча был принят равным единице, величина  $H_1$  будет характеризовать положение входного зрачка относительно I поверхности (рис. 36).

Первые четыре зейделевские суммы  $S_I$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{III}$  и  $S_{IV}$  определяют уже упоминавшиеся раньше величины сферической аберрации, комы, собственно астигматизма (расстояние между меридиональным и сагиттальным изображениями) и так называемой кривизны Пецваля (кривизну поля при исправленном астигматизме); пятая же сумма  $S_V$ , как это видно из формулы (217), соответствует лишь одной меридиональной составляющей  $\sigma_t$ , независимой от апертурных углов и не влияющей, таким образом, на внутреннюю структуру пучка лучей.

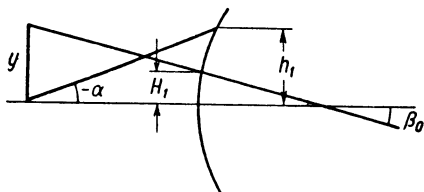


Рис. 36

Это меридиональное смещение пучка лучей, называемое дисторсией, вызывает искажение изображения.

В последующем нас будут интересовать аберрации тонких линз, из которых строится большинство телескопических и визуальных систем, когда влиянием толщин линз можно пренебрегать; в этом случае выражения для зейделевских сумм значительно упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \sum h_s P_s \\ S_{II} &= s_1 \sum h_s P_s + \sum W_s \\ S_{III} &= s_1^2 \sum h_s P_s + 2 s_1 \sum W_s + \sum \Delta_s \frac{\alpha}{n} \\ S_{IV} &= \sum \Delta_s \frac{\alpha n}{nn'} = - \sum \frac{1}{r_s} \Delta_s \frac{1}{n} \\ S_V &= s_1^3 \sum h_s P_s + 3 s_1^2 \sum W_s + 3 s_1 \sum \Delta_s \frac{\alpha}{n} + s_1 \sum \Delta_s \frac{\alpha n}{nn'} \end{aligned} \right\} \quad (221)$$

и приобретают особенно простой вид тогда, когда зрачок входа совпадает с самой системой, т. е. тогда, когда  $s_1 = 0$ .

Для этого случая получаем

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \Sigma h_s P_s; \quad S_{II} = \Sigma W_s; \quad S_{III} = \Sigma \Delta_s \frac{\alpha}{n} = 1 \\ S_{IV} &= \Sigma \Delta_s \frac{\alpha n}{nn'} = - \Sigma \frac{1}{r_s} \Delta_s \frac{1}{n} = \Sigma \frac{\varphi}{n}; \quad S_V = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (222)$$

Нетрудно видеть, что в этом случае третья сумма получается постоянной, а четвертая сумма зависит только от показателей преломления; так как обычно показатели преломления изменяются в нешироких пределах, то четвертую сумму можно приближенно принять также постоянной и равной

$$S_{IV} \cong \frac{\Sigma \varphi}{n} = \frac{1}{n} = 0,67. \quad (223)$$

Возвращаясь к формулам (217), можем дать следующие выражения для астигматизма тонкой линзы; совпадающей со зрачком входа:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= - \frac{1}{2} u_t' \beta_1^2 (3 + 0,67) \\ \sigma_s &= - \frac{1}{2} u_s' \beta_1^2 (1 + 0,67) \end{aligned} \right\}. \quad (224)$$

Разделив величины  $\sigma_t$  и  $\sigma_s$  на  $u_t'$  и  $u_s'$ , мы переходим к продольному астигматизму; учитывая, что наши формулы были даны при фокусном расстоянии, равном единице, можно написать следующие формулы для произвольных фокусных расстояний:

$$x_t = \frac{\sigma_t}{u_t'} = -1,833 \beta_1^2 f'; \quad x_s = \frac{\sigma_s}{u_s'} = -0,835 \beta_1^2 f'. \quad (225)$$

Профессор Г. Г. Слюсарев, учитывая, что обычно в склеенных объективах отрицательные линзы имеют большие, а положительные линзы — меньшие показатели преломления, дал несколько увеличенные значения для коэффициентов в формулах (225), равные соответственно  $-1,85$  и  $-0,85$ .

Возвращаясь к формулам (221), видим, что при одновременном равенстве нулю первой и второй сумм, третья сумма не может обратиться в нуль, и мы не сможем исправить астигматизм.

Наоборот, если нам понадобится обеспечить у тонкой линзы исправление астигматизма, то при исправленной сферической аберрации нам потребуется оставить неисправленной кому; при этом входной зрачок должен быть удален от линзы на вполне определенное расстояние.

## § 15. Сферическая аберрация

Перейдем к рассмотрению отдельных видов aberrаций III порядка.

Обращаясь к выражению поперечной сферической aberrации, можем написать

$$\sigma = -\frac{1}{2} u'^3 \Sigma h P. \quad (226)$$

Разделив это выражение на апертурный угол, получим продольную сферическую aberrацию

$$\Delta s' = \frac{\sigma}{u'} = -\frac{1}{2} u'^2 \Sigma h P. \quad (227)$$

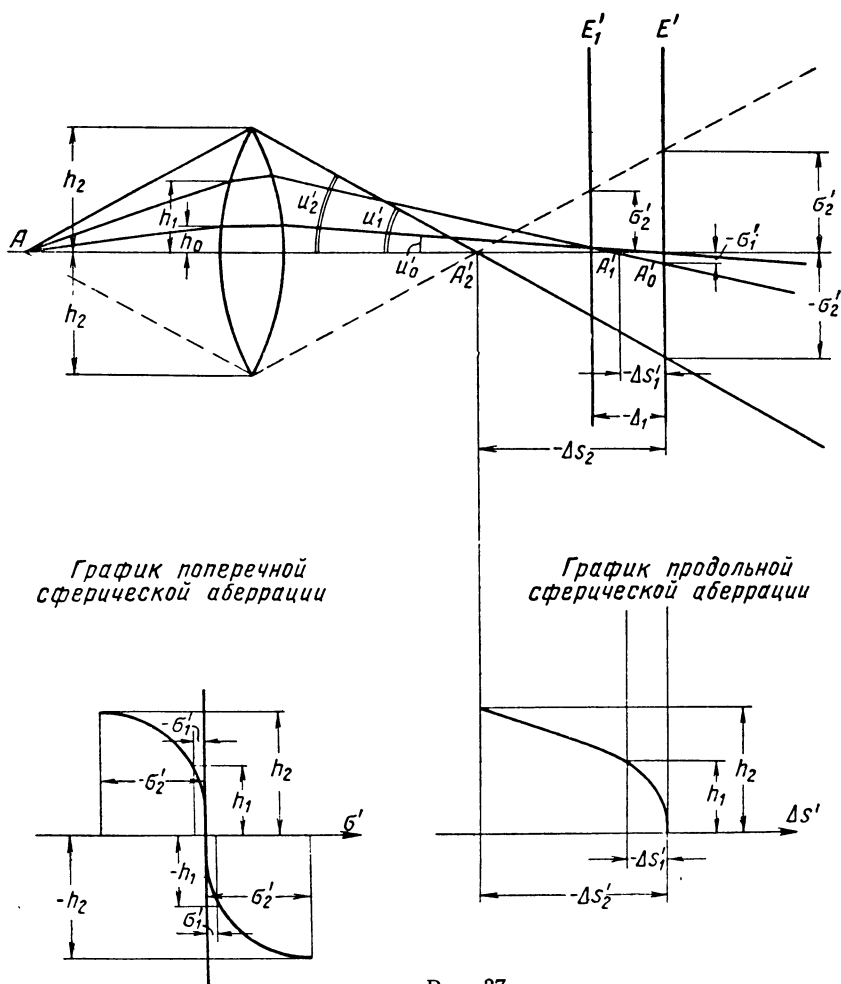


Рис. 37

Сферическая абберация для точки на оси системы представлена на рис. 37. На этом рисунке показан ход пучка лучей, исходящих из некоторой точки  $A$  на оси системы и входящих в нее на высотах  $h_0$ ,  $h_1$  и т. д.

Точки  $A_0'$ ,  $A_1'$  и т. д. пересечения с осью лучей, выходящих из системы, будут располагаться на оси в зависимости от высоты  $h$  входа луча в систему. Расстояния  $\Delta s_1'$ ,  $\Delta s_2'$  и т. д. точек  $A_1'$ ,  $A_2'$  от точки  $A_0'$  (точки пересечения нулевых лучей с осью), являющейся изображением точки  $A$  по законам солинейного сродства, и будут продольной сферической абберацией, а расстояния  $\sigma$  от оси до точек пересечения тех же лучей с плоскостью  $E$ , проходящей через точку  $A_0'$  перпендикулярно оси, явятся поперечными абберациями.

Как продольная, так и поперечная абберации могут быть представлены как функции апертурных углов  $u$  или  $u'$  (что уже было сделано нами ранее).

Нетрудно найти поперечные абберации в некоторой произвольно расположенной плоскости  $E'$  на расстоянии  $\Delta$  от плоскости  $E$ . Согласно чертежа можно написать

$$\sigma' = (\Delta s' - \Delta) \operatorname{tg} u' \approx (\Delta s' - \Delta) u' = \sigma - \Delta u'. \quad (228)$$

## § 16. Кома. Условие синусов Аббе

Обращаясь ко второму члену разложения для поперечных аббераций, можем написать

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= -\frac{1}{2n'}(3u_t'^2 + u_s'^2)\beta_1 S_{II} \\ \sigma_s &= -\frac{1}{2n'} \cdot 2u_t' u_s' \beta_1 S_{II} \end{aligned} \right\}. \quad (229)$$

Исследуя по этим формулам структуру пучка лучей, обладающего комой, приходим к картине, изображенной на рис. 38. На этом рисунке показан контур зрачка круглой формы, через окружность которого проходят лучи 1, 5, 4, 2, 3. Далее показана двойная окружность, в точке 1', 2' которой лучи, прошедшие через точки 1 и 2 окружности зрачка, пересекают плоскость изображения. Главный луч пересекает эту плоскость в точке  $O'$ ; косые (сагиттальные) лучи 3 и 4 пересекают плоскость изображения в точке 3', 4', также лежащей в меридиональной плоскости, но вдвое ближе к главному лучу [что нетрудно установить, задавая последовательно в формулах (229)  $u_s = 0$  и  $u_t = 0$ ].

Луч, проходящий через промежуточную точку 5, пересечет плоскость изображения в точке 5', не лежащей в меридиональной плоскости. Небезынтересно, что при движении точки 5 по контуру окружности зрачка, точка 5' будет двигаться также по окружности, но со скоростью, большей в два раза, и за один обход контура зрачка пройдет эту окружность дважды.

Уменьшая окружность на зрачке, уменьшим и двойную окружность на изображении, но при этом центр двойной окруж-

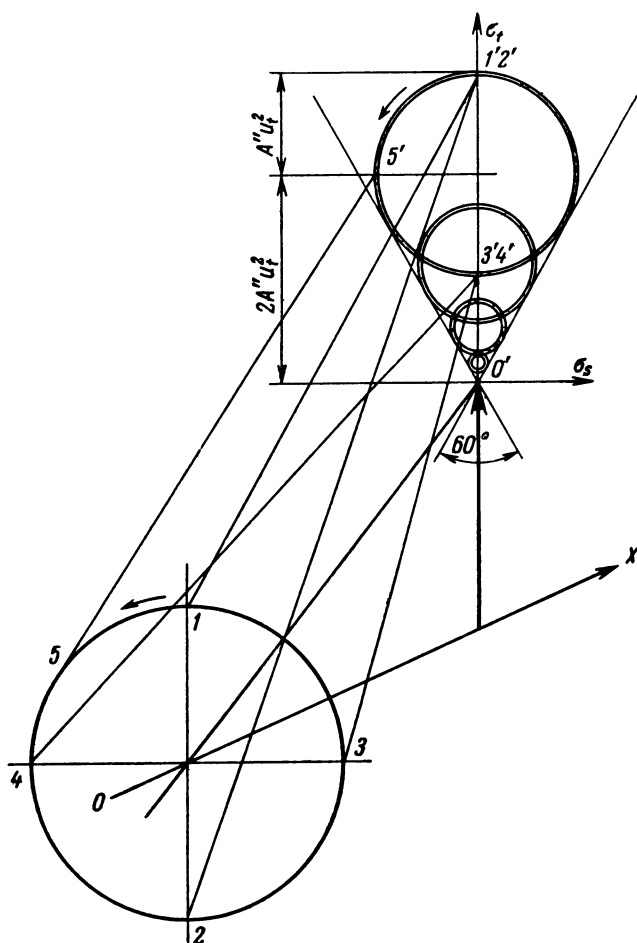


Рис. 38

ности будет соответственно приближаться к главному лучу. В результате этого форма кружка рассеяния при наличии комы будет иметь коматоподобный вид, что и послужило поводом для самого названия «Кома» (греческое — прядь волос).

Необходимо еще раз отметить, что возникновение комы связано с нарушением условия синусов Аббе [формула (177)].

Заметим, что рост поперечной комы пропорционален первой степени величины предмета или полевого угла и второй степени апертурных углов.



## § 17. Астигматизм и кривизна изображения

Взяв третий член разложения для поперечных aberrаций, выделим поперечный астигматизм пучка и кривизну изображения. Согласно формуле (217) можем написать

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= -\frac{1}{2n'} u_t' \beta_1^2 (3S_{III} + J^2 S_{IV}) \\ \sigma_s &= -\frac{1}{2n'} u_s' \beta_1^2 (S_{III} + J^2 S_{IV}) \end{aligned} \right\}. \quad (230)$$

Разделив величины  $\sigma_t$  и  $\sigma_s$  на соответственные апертурные углы, получим величины  $x_t$  и  $x_s$ , определяющие отстояние меридиональной и сагиттальной точек  $A_t'$  и  $A_s'$  на главном луче, так называемый продольный астигматизм.

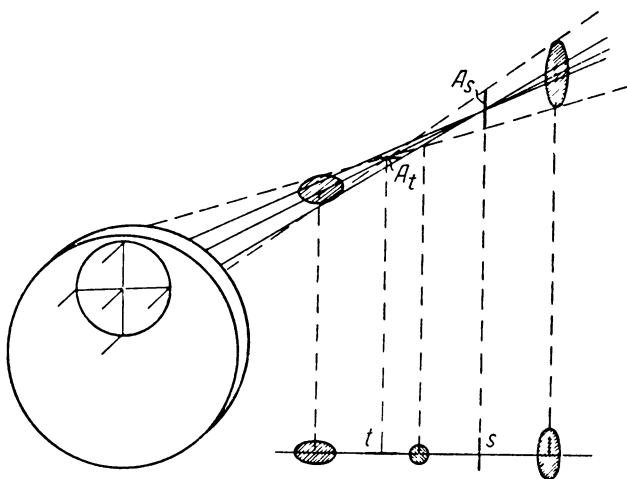


Рис. 39

Следует заметить, что в меридиональной точке  $A_t'$  будут пересекаться лучи, идущие в меридиональной плоскости, сагиттальные же лучи будут пересекаться в сагиттальной точке  $A_s'$ , а вблизи точки  $A_t'$  они будут проходить через некоторый отрезок, перпендикулярный меридиональной плоскости, который явится меридиональным изображением рассматриваемой точки предмета.

Наоборот, в точке  $A_s'$  меридиональные лучи будут проходить через некоторый отрезок, лежащий в меридиональной плоскости, называемый сагиттальным изображением предметной точки  $A$ .

Картина астигматического изображения представлена на рис. 39, причем внизу показаны отдельно картины поперечных aberrаций, получающихся при различных положениях плоскости  $E_0'$  относительно точек  $A_s'$  и  $A_t'$ . Изображение, создаваемое лу-

чами, лежащими в меридиональной плоскости, называется меридиональным, или тангенциальным; изображение, создаваемое лучами, лежащими в плоскости, перпендикулярной меридиональной, называется сагиттальным, или экваториальным, а лучи, создающие его, — сагиттальными, или экваториальными.

Рассмотрим картину изображения предмета в виде креста и ряда concentрических окружностей с центрами на оси системы (рис. 40, а) в том случае, когда поверхность сагиттального изображения (аналогично случаю кривизны поверхности изображения) совпадает с плоскостью изображения  $E'$ , полученной по законам солинейного сродства, а поверхность изображения меридиональных лучей не совпадает с плоскостью  $E'$ .

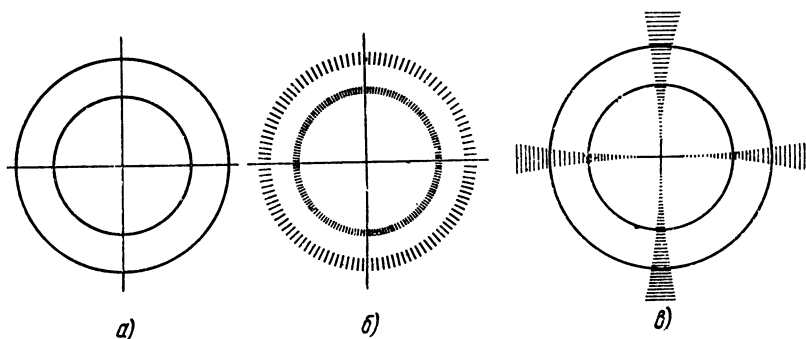


Рис. 40

В этом случае изображением произвольной точки  $P$  является некоторый отрезок, направленный к центру изображения. Поэтому изображения точек, лежащих на радиальных линиях предмета, будут налагаться одно на другое, что вызовет лишь некоторое удлинение радиальных прямых.

Совершенно иная картина получится для точек, лежащих на concentрических окружностях, так как линии, являющиеся изображениями этих точек, уже не будут налагаться, и изображения concentрических окружностей (рис. 40, б) будут размытыми.

В случае, когда поверхность меридионального изображения совпадает с плоскостью  $E'$  и не совпадает с поверхностью сагиттального изображения, размытыми окажутся радиальные прямые. Таким образом, вследствие того, что изображением произвольной точки будет отрезок, направленный перпендикулярно радиусу, произойдет наложение изображений точек, лежащих на окружностях, и окружности будут изображаться резко (рис. 40, в). Нетрудно видеть, что как кривизна, так и астигматизм являются функциями положения  $P$  предмета и в силу этого могут быть представлены как функции угла  $\beta$  или величины изображения  $y'$ . Обычно для характеристики оптической системы приводят не са-

мую величину астигматической разности (расстояния между сагиттальным и меридиональным изображениями), а величину проекции ее на ось, или просто величины проекций на ось расстояний точек сагиттальной и меридиональной поверхностей изображений от плоскости  $E'$  (рис. 41).

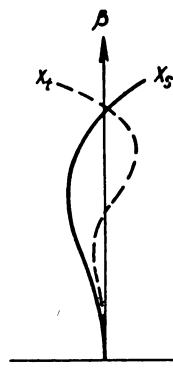


Рис. 41

Определение поперечных aberrаций  $\sigma$  производится совершенно аналогично определению в случае одной только кривизны.

Следует, конечно, иметь в виду, что вычисление величин поперечных aberrаций наклонного пучка сильно усложняется наличием других aberrаций, например комы и сферической aberrации.

## § 18. Дисторсия

Выше описывались aberrации, следствием которых являлось размытие изображения, т. е. изображения точки получались в виде некоторой фигуры рассеяния. Вместе с тем для измерительных целей нам необходимо иметь изображение неискаженным, т. е. полученным строго по законам теории солинейного сродства.

Обозначив через  $V$  реальное линейное увеличение для точки, расположенной на расстоянии  $y$  от оси, и через  $V_0$  линейное увеличение по законам солинейного сродства, назовем дисторсией величину

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} . \quad (231)$$

Заменив  $V$  на  $\frac{y'}{y}$ ,  $V_0$  на  $\frac{y_0'}{y_0}$ , а также учтя, что  $y = y_0$  (положение точки предмета одинаково как для реальной системы, так и для идеальной системы), получим

$$\Delta = \frac{y_0}{y_0'} \left( \frac{y'}{y_0} - \frac{y_0'}{y_0} \right) = \frac{y' - y_0'}{y_0'} = \frac{\Delta y'}{y_0'} , \quad (232)$$

где  $\Delta y' = y' - y_0'$  — некоторая функция, зависящая от  $y_0$  или от величины  $y_0'$ , которая определяет величину идеального изображения и является функцией  $y_0$ . Выражение для дисторсии, полученное таким образом, носит название относительной дисторсии.

Для измерительных целей больший интерес представляет так называемая абсолютная дисторсия

$$\Delta y' = y' - y_0' , \quad (233)$$

выражающая непосредственную разность между изображением реальным и изображением по солинейному сродству (рис. 42, а).

В случае, если  $\Delta < 0$  (относительная дисторсия отрицательна), получаем так называемую бочкообразную дисторсию (рис. 42, б): в случае же, если  $\Delta > 0$ , имеем подушкообразную дисторсию (рис. 42, в).

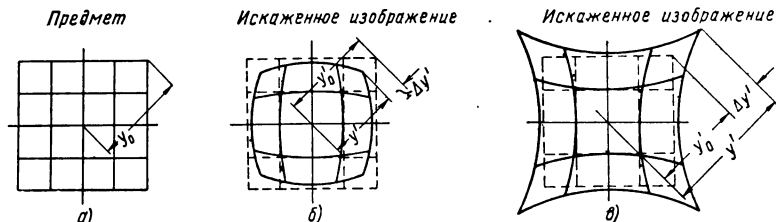


Рис. 42

Вследствие симметрии изображения относительно оптической оси относительная дисторсия  $\Delta$  представляет собой четную функцию  $y_0'$ , а абсолютная дисторсия является нечетной функцией  $y_0'$ .

Зависимость величины  $\Delta y'$  от  $y_0'$  может быть представлена графически (рис. 43), причем по оси абсцисс откладывают величины  $\Delta y'$ , а по оси ординат — величины  $y_0'$ .

Вследствие полного удовлетворения законов солинейного сродства в некотором пространстве около оси системы дисторсия  $\Delta$  будет равна нулю при малых значениях  $y_0'$ , т. е. кривая, выражающая дисторсию как функцию от  $y_0'$ , будет касательной к оси ординат.

Рассмотрим действие дисторсии в телескопической системе, полагая, что и предмет, и изображение расположены на расстояниях  $\xi$  и  $\xi'$  от зрачков системы. В этом случае величина предмета  $y = y_0 = -\xi \operatorname{tg} \beta$ ; величина же реального изображения  $y' = -\xi' \operatorname{tg} \beta'$ . Тогда величина дисторсии

$$\Delta = \frac{y' - y_0'}{y_0'} = \frac{\xi' \operatorname{tg} \beta'}{V \xi \operatorname{tg} \beta} - 1 = \frac{Q \operatorname{tg} \beta'}{V \operatorname{tg} \beta} - 1. \quad (234)$$

Но так как для телескопической системы отношение  $\frac{V}{Q}$  равно видимому увеличению системы, то

$$\Delta = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma \operatorname{tg} \beta} - 1. \quad (235)$$

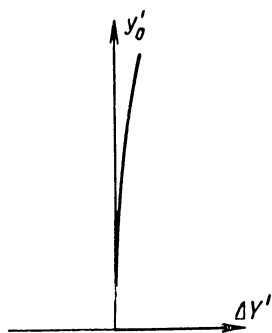


Рис. 43

## § 19. Дисперсия стекла. Хроматизм

В большинстве случаев свет, попадающий в систему, бывает смешанным (не монохроматическим), обычно белым, т. е. содержащим излучения всего видимого (а частично и невидимого) спектра. Таким образом, оптическая система должна давать изображение для лучей, имеющих различную длину волны.

Известно, что показатель преломления оптического стекла зависит от длины волны (цвета) преломляющегося светового потока. Эта зависимость показателей преломления от длины волны света носит название дисперсии. Оптические стекла обладают так называемой нормальной дисперсией, при которой с увеличением длины волны показатель преломления уменьшается. В табл. 3 приведены длины волн, с которыми наиболее часто приходится иметь дело.

Т а б л и ц а 3

Линия спектра	A'	C'	D	F	G'
Длина волны, м м	768,2	656,3	589,3	486,1	434,1

Для обыкновенных стекол (крон К-8) имеем следующие значения показателей преломления ( $n_D$  — для линии D;  $n_C$  — для линии C и  $n_F$  — для линии F):

$$n_D = 1,5163, \quad n_C = 1,51385, \quad n_F = 1,52191, \quad n_F - n_C = 0,00806, \\ \nu = 64,0.$$

Для обыкновенного флинта, например Ф-1, имеем:

$$n_D = 1,6129, \quad n_C = 1,60814, \quad n_F = 1,62474, \quad n_F - n_C = 0,01660, \\ \nu = 36,9.$$

Обычно под дисперсией понимают величины разностей  $n_D - n_C$ ,  $n_F - n_C$  и т. д., причем дисперсию  $n_F - n_C$  называют средней. Указанная выше величина

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (236)$$

называется числом Аббе.

Величину, обратную числу Аббе, называют относительной дисперсией

$$\frac{1}{\nu} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}. \quad (237)$$

Всякая оптическая система обладает для каждой длины волны соответственными показателями преломления, а следовательно,

будет существовать (для каждой длины волны) соответственное положение изображения и значение линейного увеличения, аберраций и т. д.

Рассмотрим влияние несовпадения положения изображения для различных длин волн (цветов) спектра на качество изображения. Такого рода несовпадение цветных изображений называется **хроматизмом**. Несовпадение положений изображений называется **хроматизмом положения**, или **ошибкой против первого условия ахроматизма**, а несовпадение размеров изображений — **хроматизмом увеличения**, или **ошибкой против второго условия ахроматизма**.

Займемся, как это уже было сказано, рассмотрением хроматизма положения (рис. 44). Предположим, что на оси системы имеется некоторая точка  $A$ , испускающая пучок белого света.

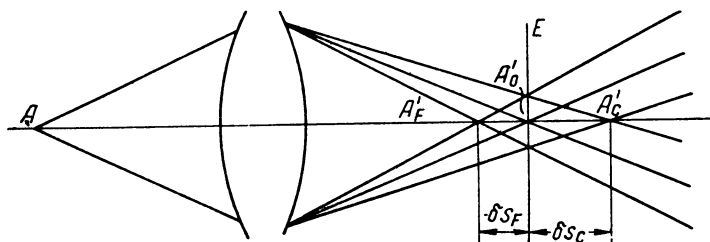


Рис. 44

Пройдя систему, белый свет разложится, и для каждого цвета получим свое изображение точки  $A$ ; для цвета  $F$  — точку  $A'_F$ , для цвета  $D$  — точку  $A'_D$  и т. д. Поставим в точке  $A'_D$  изображения точки  $A$  для цвета  $D$  некоторый экран  $E$ . Нетрудно видеть, что лучи цвета  $C$  и  $F$  дадут на этом экране вместо точек некоторые кружки рассеяния, причем эти кружки рассеяния окажутся окрашенными и создадут цветное размытие изображения. Величину этих кружков рассеяния вычисляют аналогично поперечной сферической аберрации, но с той лишь разницей, что величины  $\delta s'_C$ ,  $\delta s'_F$  и т. д. будут постоянными.

Перейдем к рассмотрению второго условия ахроматизма, полагая что первое условие ахроматизма выполнено, т. е. что положения изображений для различных цветов совпадают (рис. 45). Нетрудно видеть, что невыполнение второго условия ахроматизма — несовпадение соответственных точек цветных изображений — вызывает хроматическое размытие точки изображения в радиальном направлении.

Допустим, что наибольшая хроматическая разность увеличений  $V$  соответствует цветам  $C$  и  $F$ . Составим разность этих увеличений

$$V_F - V_C = \frac{y'_F}{y_F} - \frac{y'_C}{y_C} = \frac{y'_F - y'_C}{y}, \quad (238)$$

так как

$$y = y_0 = y_C = y_F.$$

Пользуясь выражением увеличения  $V_D$  для цвета  $D$ , находим

$$\frac{V_F - V_C}{V_D} = \frac{y_F' - y_C'}{y} \cdot \frac{y}{y_D'} = \frac{y_F' - y_C'}{y_D'} = \frac{\Delta V}{V} = \text{const}, \quad (239)$$

откуда

$$y_F' - y_C' = \frac{\Delta V}{V} y_D'. \quad (240)$$

Из (240) следует, что при малых значениях  $y_D'$  разность  $y_F' - y_C'$  также становится малой, а следовательно, при соблю-

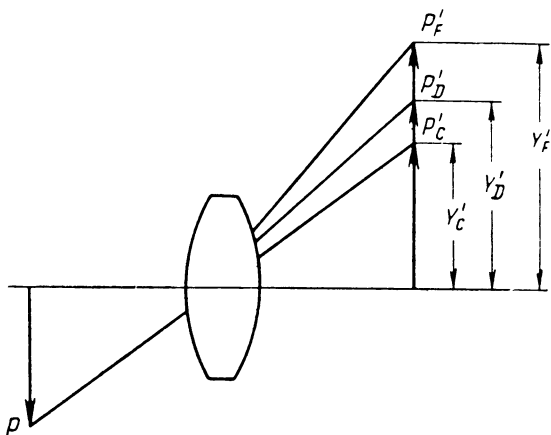


Рис. 45

дении первого условия ахроматизма центральная часть изображения даже и при несоблюдении второго условия ахроматизма оказывается неокрашенной.

Перейдем к случаю объектива. Полагая, что для различных длин волн фокусные расстояния объектива неодинаковы, имеем

$$y_C' = -f_C' \operatorname{tg} \beta; \quad y_F' = -f_F' \operatorname{tg} \beta; \quad y_D' = -f_D' \operatorname{tg} \beta. \quad (241)$$

Составляя выражения  $\frac{y_F' - y_C'}{y_D'}$ , найдем

$$\frac{y_F' - y_C'}{y_D'} = \frac{f_F' - f_C'}{f_D'} = \frac{\Delta f'}{f'}. \quad (242)$$

Займемся рассмотрением хроматизма тонкой линзы в воздухе. Имеем следующее выражение для силы линзы

$$\varphi = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (243)$$

Дифференцируя  $\varphi$  по  $n$  логарифмически и заменив дифференциалы конечными приращениями, находим

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = - \frac{df'}{f'} = \frac{dn}{n - 1} = \frac{1}{\nu}. \quad (244)$$

Откуда следует

$$d\varphi = \frac{\varphi}{\nu} \quad (245)$$

и

$$df' = - \frac{f'}{\nu}, \quad (246)$$

т. е. разности  $\varphi$  и  $f'$  равны отношению силы линзы или ее фокусного расстояния с обратным знаком к числу Аббе. Следует иметь в виду, что для тонкой линзы главные плоскости линзы совпадают с самой линзой и разность фокусных расстояний в этом случае выражает собой и несовпадение изображений при условии, что предмет находится в бесконечности.

Как пример определим несовпадение изображений для цветов  $C$  и  $F$  в случае простой линзы, имеющей фокусное расстояние  $f' = 200$  мм и изготовленной из стекла К-8. Имеем

$$df' = - \frac{f'}{\nu} = - \frac{200 \text{ мм}}{64} = - 3,1 \text{ мм}.$$

Определим хроматизм системы из двух соприкасающихся тонких линз. В этом случае имеем

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (247)$$

Дифференцируя (247), а также помня (245), находим

$$d\varphi = d\varphi_1 + d\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2}. \quad (248)$$

Для устранения хроматизма необходимо, чтобы

$$d\varphi = 0 = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2}, \quad (249)$$

откуда

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = - \frac{\nu_1}{\nu_2}, \quad (250)$$



т. е. отношение сил составляющих систему линз, должно быть равно отношению чисел Аббе для стекол, из которых изготовлены линзы, взятому с обратным знаком. Как пример определим силы линз, изготовленных из сортов стекол К-8 и Ф-1 и составляющих систему с фокусным расстоянием  $f' = 100$ ,  $\varphi = \frac{1}{100}$ . При этих условиях

$$\varphi = \frac{1}{100} = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (251)$$

$$\varphi_1 = -\frac{\nu_1}{\nu_2} \varphi_2 = -\frac{64}{36} \varphi_2, \quad (252)$$

$$\varphi = \frac{1}{100} = -\left(\frac{64}{36} - 1\right) \varphi_2 = -\frac{7}{9} \varphi_2; \quad \varphi_2 = -\frac{9}{7 \cdot 100} = -0,0128,$$

$$f_2' = -78,0; \quad \varphi_1 = \varphi - \varphi_2 = 0,01 + 0,0128 = 0,0228; \quad f_1' = 44,0.$$

**Вторичный спектр.** Система из двух тонких линз может быть ахроматизирована для двух каких-либо линий спектра, например  $C$  и  $F$ . Вместе с тем естественно, что при этом может наблюдаться неполная ахроматизация для какого-либо третьего цвета; однако можно было бы поставить задачу об одновременной ахроматизации системы для трех или большего числа линий спектра или, как говорят, поставить задачу апохроматизации системы.

Решение этой задачи сводится к совместному решению системы двух уравнений (250):

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = -\frac{\nu_1}{\nu_2} = -\frac{\nu_1'}{\nu_2'}, \quad (253)$$

что возможно лишь в том случае, когда у выбранной пары стекол будут одинаковыми отношения, называемые частными относительными дисперсиями,

$$\frac{\nu_1'}{\nu_1} = \frac{\nu_2'}{\nu_2} = \text{const} = \frac{n_I - n_{II}}{n_I - n_{III}} = \vartheta. \quad (254)$$

Эти величины для подавляющего большинства марок оптического стекла изменяются одновременно с изменением числа Аббе почти по линейной зависимости вида

$$\vartheta = a + b \nu,$$

причем величина коэффициента  $b$  практически постоянна; что же касается коэффициента  $a$ , то его значения изменяются в весьма ограниченных пределах.

В силу этого, желая для двух различных марок стекла обеспечить равенство частных относительных дисперсий, нам придется

ся ограничиться близкими значениями чисел Аббе, что весьма затруднит решение самой задачи ахроматизации.

Отсюда вытекает необходимость в создании специальных марок оптического стекла, для которых при равных частных отно-

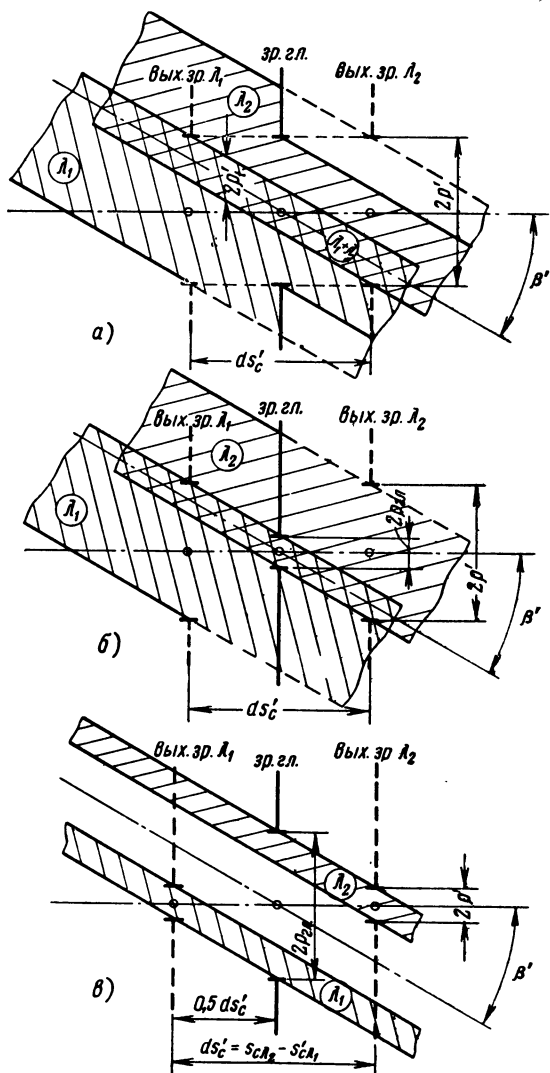


Рис. 46

сительных дисперсиях наблюдалась бы достаточно большая разность чисел Аббе; подобного рода марки стекла носят название стекол с «укороченным вторичным спектром» — курцфлинтов.

Хроматизм в зрачке. В оптических системах, имеющих промежуточное изображение, широко используются коллективные линзы, управляющие положением выходного зрачка; в подавляющем большинстве случаев эти линзы не ахроматизируются, следствием чего является несовпадение выходных зрачков системы для разных участков спектра по положению.

Это влияние носит название хроматизма в зрачках, или III хроматизма.

В тех случаях, когда величина зрачка глаза настолько велика, что может обеспечить прохождение в глаз всех лучей из различных расположенных зрачков, или, наоборот, когда зрачок глаза настолько мал, что целиком укладывается в зону перекрытия пучков лучей, исходящих из различных зрачков, мы не будем ощущать влияния III хроматизма на качество изображения.

Однако в ряде случаев, когда, например, зрачок глаза и выходной зрачок оптической системы будут равны по величине, наличие хроматизма в зрачках приведет к изменению виньетирования для различных участков спектра, следствием чего явится преобладание освещенности изображения для одних участков спектра по отношению к другим.

Такое преобладание освещенности в различных участках спектра вызовет у наблюдателя эффект, напоминающий применение светофильтров в краевой части поля; при этом общая окраска изображения будет изменяться в зависимости от положения зрачка глаза.

Эта картина представлена на рис. 46, где показано срезание наклонных пучков для различных участков спектра при наличии хроматизма в зрачке в трех случаях: *a* — когда зрачок глаза равен выходному зрачку прибора; *b* — когда зрачок глаза меньше и *в* — когда зрачок глаза больше зрачка прибора.

Заметим, что хроматизм в зрачке сильно проявляет себя, когда в осветительных системах проекционных установок применяются неахроматизованные конденсоры.

## § 20. Дифракция. Дифракционная разрешающая сила

Положения геометрической оптики, как известно, не являются достаточными для объяснения всех существующих явлений; так, например, явление дифракции (присутствие света в геометрической тени *a*, рис. 47) противоречит основным законам геометрической оптики и может быть объяснено лишь при рассмотрении его с точки зрения волновой теории света.

Рассмотрим распределение световой энергии в плоскости, проходящей через геометрическое изображение точки, создаваемое идеально корригированной оптической системой.

В этом случае, если центр сферы сравнения совпадет с вершиной пучка лучей — центром волновой поверхности, получится

суммирование световых возмущений от всех элементов волновой поверхности.

Смещая центр сферы сравнения с оси пучка, мы уже не получим в центре сферы сравнения одну и ту же фазу колебания для всей волновой поверхности; в зависимости от величины смещения  $r'$  центра сферы сравнения и величины апертурного угла будет происходить изменение фазы, следствием чего будет попеременно сложение или гашение света.

Изменение освещенности (квадрата суммарной амплитуды) в плоскости изображения для круглого зрачка пропорционально

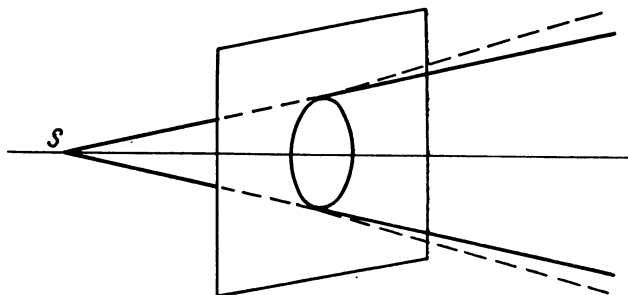


Рис. 47

квадрату отношения бесселевой функции первого порядка к ее аргументу

$$\frac{E}{E_0} = \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2, \quad (255)$$

где

$$x = 2\pi \frac{n'}{\lambda} u_1' r'; \quad (256)$$

график этой функции представлен на рис. 48.

Из рис. 48 следует, что при  $x=0$  имеем максимум количества света; затем количество света при некотором  $x_1$  убывает до нуля, и снова появляется освещенное кольцо вокруг центрального пятна, но количество света в этом кольце настолько мало по сравнению с центральным пятном, что практического интереса уже не представляет. Определим величину радиуса центрального пятна. Величина  $x_1$ , соответствующая первому минимуму, равняется

$$x_1 = 3,8317 = \frac{2\pi u_1' r'}{\lambda} \quad (\text{полагая } n' = 1), \quad (257)$$

откуда

$$r' = -\frac{3,8317}{2\pi u_1'} \lambda. \quad (258)$$

Величина максимального угла

$$u_1' = \frac{\rho'}{\xi'}, \quad (259)$$

где  $2\rho'$  — диаметр выходного зрачка, а  $\xi'$  — расстояние от выходного зрачка до плоскости изображения.

Таким образом,

$$r' = \frac{3,8317 \lambda}{2 \pi \rho'} \xi'. \quad (260)$$

Перейдем к рассмотрению изображений двух точек (рис. 49), частично налегающих одно на другое.

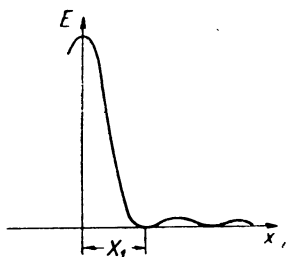


Рис. 48

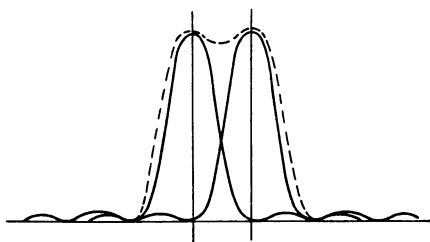


Рис. 49

Картина распределения освещенности в этом случае на рисунке представлена пунктирной линией с некоторым минимумом. Известно, что разность между этим минимумом и соседними максимумами еще ощутима, если  $x_1 = 3,3$  (расстояние между центрами пятен).

Тогда

$$r' = \frac{3,3 \lambda \xi'}{2 \pi \rho'}. \quad (261)$$

Полагая, в случае объектива, что зрачки совпадают с главными плоскостями, а узловые точки — с главными точками, находим

$$\frac{r'}{\xi'} = \beta' = \beta = \frac{3,3 \lambda}{2 \pi \rho}. \quad (262)$$

Полагая  $\lambda = 550 \text{ мμ}$  и выражая  $\rho$  в мм, найдем дифракционную угловую разрешающую силу в секундах

$$\beta'' = \frac{550 \cdot 3,3}{1\,000\,000 \cdot 3,142 \varphi} 206\,000'' = \frac{120''}{2 \rho}.$$

## *ЧАСТЬ ВТОРАЯ*

# **ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

## **Глава VI**

### **ОСНОВЫ ГАБАРИТНОГО РАСЧЕТА**

#### **§ 21. Задача габаритного расчета**

Разработка любой оптической системы приводит к совместному решению трех основных задач: обеспечению действия разрабатываемого прибора, обеспечению физической осуществимости и обеспечению технической осуществимости системы.

Первая из поставленных задач, очевидно, вполне определяется назначением оптической системы и сводится в основном к получению нужного увеличения, поля зрения, светосилы, возможности выполнения тех или иных отсчетов, удобства пользования.

Вторая задача сводится к удовлетворению законов образования изображения.

Третья из основных задач обуславливает создание оптической системы в рамках существующих технических возможностей, предопределяя вместе с тем качество разрабатываемой системы и ее стоимость.

Задача габаритного расчета оптической системы может быть отождествлена с предварительной ее разработкой, преследующей цель получения исходных данных для детальной разработки как механической части всего проектируемого прибора, так и детального расчета отдельных оптических узлов.

Габаритный расчет оптики соответствует эскизному проекту при разработке механической конструкции.

Расшифровывая более детально задачу габаритного расчета, можно сказать, что в габаритный расчет входят:

1. Согласование технических условий, предъявляемых к оптической системе, т. е. согласование увеличений, полей зрения, удаления и величины зрачков, светосилы, размеров системы.

2. Определение составляющих систему элементов и их основных параметров (фокусные расстояния, увеличения, габариты свободных отверстий, поля зрения, апертуры, расстояния между отдельными элементами), подготовка материалов для разработки механической конструкции и исходных данных к детальному абер-

рациональному расчету на исправление аберраций отдельных элементов системы.

3. Анализ взаимодействия как отдельных элементов оптики (выявление возможного исправления аберраций), так и возможностей всей системы.

В этот последний пункт естественно ввести и выбор типов составляющих оптических узлов (окуляры, объективы и т. п.).

Заметим, что анализ коррекционных возможностей отдельных элементов разрабатываемой оптической системы не всегда производится при ее габаритном расчете (хотя это и не представляет особых затруднений); однако игнорирование их очень часто может повести к невозможности получения удовлетворительного качества изображения при выбранных габаритах (так, например, при увеличении апертуры в ряде случаев возможно ухудшение качества изображения, пропорциональное четвертой степени увеличения апертуры); в обратном случае может быть излишнее увеличение габаритов самой системы.

В силу этого следует рекомендовать предварительную оценку коррекционных возможностей элементов разрабатываемой системы уже при ее габаритном расчете.

Такой габаритный расчет аберраций системы обеспечит уверенное и быстрое получение намеченных результатов и избавит от возможных случаев изменения габаритных данных и повторных аберрационных расчетов разрабатываемой системы.

## **§ 22. Элементарный габаритный расчет на основании теории солинейного сродства**

За основу элементарного габаритного расчета оптических систем удобно принять положение, в силу которого отдельные элементы рассчитываемой системы предполагаются свободными от аберраций и удовлетворяющими требованиям теории солинейного сродства.

Такое допущение в достаточной мере оправдывается тем, что при дальнейшем аберрационном расчете отдельные элементы корригируют в большинстве случаев самостоятельно, а следовательно, остаточные аберрации составляющих элементов будут малы.

Однако даже полное отсутствие аберраций не может обеспечить строгого соблюдения всех положений теории солинейного сродства, но в большинстве случаев отступления реального хода лучей по сравнению с ходом лучей, построенным на основе положений теории солинейного сродства, бывают не слишком велики.

Учету этих отступлений посвятим следующий параграф настоящей главы.

Приняв, что ход лучей при габаритном расчете соответствует всем положениям теории солинейного сродства, перейдем к выводам главнейших формул.

Ранее были получены следующие формулы:

$$J = y' \alpha' f' = -y \alpha f; \quad (263)$$

$$\alpha_{s+1} = -\frac{f'_s}{f_s} \alpha_s + h_s \varphi_s; \quad (264)$$

$$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s, \quad (265)$$

в которых

$$s_s = \frac{h_s}{\alpha_s} \quad \text{и} \quad s'_s = \frac{h_s}{\alpha_{s+1}}. \quad (266)$$

За очень редкими исключениями, отдельные элементы системы находятся в воздухе. В силу этого можно принять

$$-f = f'. \quad (267)$$

Тогда формулы (263), (264) и (265) можно упростить:

$$J = y' \alpha' = y \alpha, \quad (268)$$

$$\alpha_{s+1} = \alpha_s + h_s \varphi_s, \quad (269)$$

$$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s. \quad (270)$$

На рис. 50:  $AB = y$  — предмет,  $CD = \rho$  — высота луча на зрачке,  $AD$  — апертурный луч,  $BC$  — полевой луч,  $\alpha$  и  $\beta$  — соответственно апертурный и полевой углы (или их тангенсы). Из рис. 50 имеем

$$AC = \xi = \frac{y}{\beta} = -\frac{\rho}{\alpha}. \quad (271)$$

Таким образом,

$$y \alpha = -\rho \beta. \quad (272)$$

Рис. 50

Имея в виду, что величины  $\rho$  и  $\beta$  по отношению к полевому лучу играют ту же самую роль, что  $y$  и  $\alpha$  по отношению к апертурному лучу, инвариант Лагранжа — Гельмгольца (268) можем представить в виде

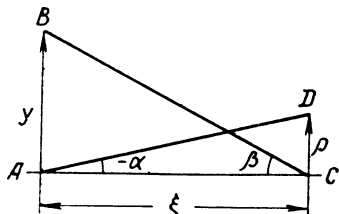
$$y' \alpha' = y \alpha = -\rho \beta = -\rho' \beta'. \quad (273)$$

Однако из (273) следует, что

$$V = \frac{y'}{y} = \frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{1}{W}. \quad (274)$$

Обращаясь к (269) и полагая предмет лежащим в бесконечности ( $\alpha = 0$ ), находим

$$\alpha' = h \varphi = \frac{h}{f'}. \quad (275)$$





Если имеем несколько систем, последовательно расположенных одна за другой, то на основании (275)

$$\alpha_{s+1} = \frac{h_1}{f'}, \quad (276)$$

где  $f'$  — заднее фокусное расстояние всей системы. Но на основании (274)

$$V = V_2 V_3 \dots V_s = \frac{\alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_s}{\alpha_3 \alpha_4 \dots \alpha_{s+1}}. \quad (277)$$

Решая (276) относительно  $f'$ , получаем

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_{s+1}} = \frac{\alpha_s \dots \alpha_3 \alpha_2}{\alpha_{s+1} \dots \alpha_4 \alpha_3} \cdot \frac{h_1}{\alpha_2} = V_s V_{s-1} \dots V_2 \frac{h_1}{\alpha_2} \quad (278)$$

или

$$f' = V f_1', \quad (279)$$

т. е. фокусное расстояние составной системы равно произведению фокусного расстояния I системы на увеличение всех последующих систем (если предмет лежит перед I системой в бесконечности).

Определим увеличение составной системы, когда между составляющими системами апертурный луч идет параллельно оси  $\alpha_2 = 0$  (рис. 51). Нетрудно видеть, что в этом случае апертурный

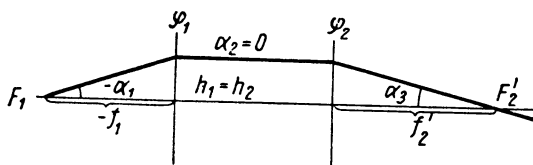


Рис. 51

луч должен проходить через передний фокус  $F_1$  системы I и через задний фокус  $F_2'$  системы II. Определяем:

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{f_1} \quad (280)$$

и

$$\alpha_3 = \frac{h_2}{f_2'}. \quad (281)$$

Находя увеличение  $V$  как отношение  $\alpha_1$  к  $\alpha_3$  и имея в виду, что  $h_1 = h_2$  (в силу равенства  $\alpha_2 = 0$ ), получаем

$$V = \frac{\alpha_1}{\alpha_3} = \frac{h_2}{f_2'} \cdot \frac{f_1}{h_1} = \frac{f_1}{f_2'} = -\frac{f_1'}{f_2'}. \quad (282)$$

Обратимся к формулам для телескопической системы:

$$\frac{\beta'}{\beta} = \frac{\rho}{\rho'} = \Gamma = W = \frac{1}{V} = -\frac{f_1'}{f_2'} = \text{const} \quad (283)$$

и

$$Q = V^2 = \text{const.} \quad (284)$$

В случае, если телескопическая система составлена из трех или большего числа систем, то на основании (278) будем иметь

$$\Gamma = W = \frac{1}{V} = -\frac{f_1'}{f_s} V_2 V_3 V_4 \cdot \dots V_{s-1}. \quad (285)$$

Перейдем к рассмотрению некоторых частных случаев.

1. Габариты параллельных ходов (рис. 52)  $A_1E_1$ ,  $A_2E_2$ ,  $A_3E_3$  представляют пучок лучей, параллельный оси системы (осевой пучок); ходов  $B_1D_1$ ,  $B_2D_2$ ,  $B_3D_3$  — параллельный пучок лучей, но наклонных.

Ширина осевого пучка равна  $2\rho_0$ ; ширина наклонного пучка (перпендикулярно оси системы) —  $2\rho_\beta$ . Определим линейное геометрическое виньетирование как отношение ширины наклонного пучка к ширине осевого пучка. Обозначая виньетирование через  $\rho(\beta)$ , будем иметь

$$\rho(\beta) = \frac{2\rho_\beta}{2\rho_0}. \quad (286)$$

Определим длину  $a$  цилиндрической части габарита хода лучей. Из рис. 52 имеем

$$a = \frac{2\rho_0 - 2\rho_\beta}{\text{tg } \beta}. \quad (287)$$

В большинстве случаев коэффициент виньетирования принимается равным 0,5 (50%); тогда, очевидно, длина цилиндрического габарита будет

$$a_{0,5} = \frac{\rho_0}{\text{tg } \beta}.$$

2. Постоянство виньетирования для любой плоскости, перпендикулярной оси системы. На рис. 53:  $AD = -y$  — предмет;  $HB$  — главные плоскости оптической системы;  $A'D' = y'$  — изображение;  $AMA'$  — крайний луч осевого пучка;  $DLD'$  — главный луч наклонного пучка;  $DKD'$  — крайний луч наклонного пучка, ограничи-

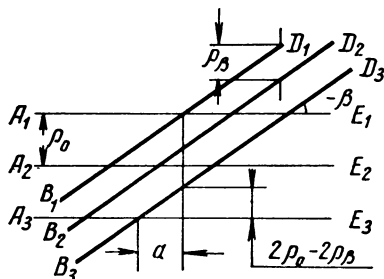


Рис. 52

угольников следует:

$$\frac{\rho_0}{\xi} = \frac{h}{b}; \quad \frac{\rho_\beta}{\xi} = \frac{h_\beta}{b}; \quad \frac{\rho_0''}{l} = \frac{h}{b'}; \quad \frac{\rho''_\beta}{l} = \frac{h_\beta}{b'}, \quad (288)$$

откуда

$$\frac{h_\beta}{h} = \frac{\rho_\beta b}{\xi} \cdot \frac{\xi}{\rho_0 b} = \frac{\rho_\beta}{\rho_0}; \quad \frac{\rho''_\beta}{\rho_0''} = \frac{h_\beta l}{b'} \cdot \frac{b'}{hl} = \frac{h_\beta}{h} \quad (289)$$

ИЛИ

$$\frac{\rho''_{\beta}}{\rho_0''} = \frac{h_{\beta}}{h} = \frac{p_{\beta}}{p_0} \quad (290)$$

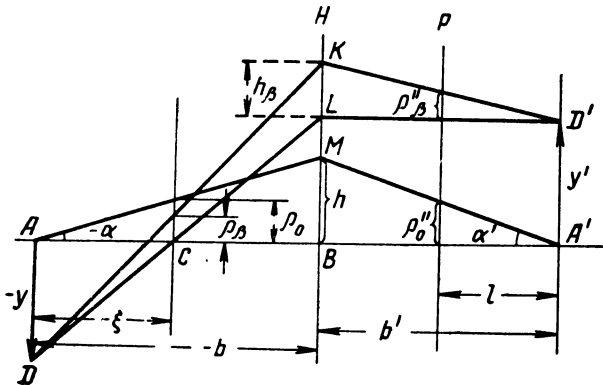


Рис. 53

3. Габаритный расчет объектива. При габаритном расчете объектива могут встретиться следующие характерные случаи.

а. Свободный диаметр объектива равен диаметру изображения; следует определить максимально возможный вынос входного зрачка при заданном виньетировании и предмете, лежащем в бесконечности.

Совершенно очевидно, что диаметр входного зрачка должен быть меньше или равен диаметру изображения (рис. 54), т. е.

$$2 \rho_0 \leq 2 y'. \quad (291)$$

На основании (273)

$$y' \alpha' = -\rho_0 \beta. \quad (292)$$

Но так как

$$\rho_0 = h, \quad (293)$$

то, учитывая (275), из (292) следует

$$y' = -\frac{\rho_0}{\alpha'} \beta = -\beta f'. \quad (294)$$

Заполняя полностью свободный диаметр объектива наклонным пучком, можно написать

$$BE_1 = y' = h_\beta + \rho_\beta, \quad (295)$$

где

$$h_\beta = \beta t. \quad (296)$$

Таким образом,

$$y' = -\beta f' = \beta t + \rho_\beta = \beta t + \rho(\beta) \rho_0, \quad (297)$$

где передний отрезок

$$t = -f' - \frac{\rho_0}{\beta} \rho(\beta) = \frac{y' - \rho(\beta) \rho_0}{\beta}. \quad (298)$$

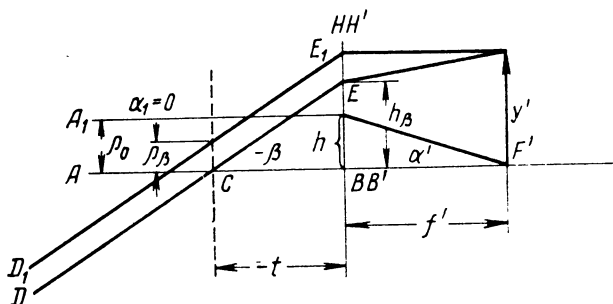


Рис. 54

Относительное отверстие объектива нетрудно определить на основании (275) и (292)

$$\frac{1}{a} = \frac{2h}{f'} = 2\alpha' = -\frac{2\rho_0\beta}{y'}. \quad (299)$$

Следовательно, при заданной величине изображения  $y'$  относительное отверстие объектива будет пропорционально диаметру зрачка входа и тангенсу угла поля зрения  $\beta$ . В случае, если диаметр зрачка входа равен диаметру изображения,

$$2\rho_0 = 2y', \quad (300)$$

то передний отрезок

$$t = (1 - \rho(\beta)) \frac{y'}{\beta}. \quad (301)$$

При 50-процентном виньетировании  $\rho(\beta) = 0,5$ , а передний отрезок  $t$  равен половине фокусного расстояния  $f'$ .

б. Диаметр изображения  $2y'$  меньше свободного диаметра объектива и равен диаметру выходного зрачка (рис. 55). Фокусное расстояние, как и в предыдущем примере, определится на основании (294); точно так же определятся на основании (299) относительное отверстие  $\frac{1}{\alpha}$  и апертурный угол  $\alpha'$ . Длина параллельного габарита

$$C = \frac{y'}{\alpha'} . \quad (302)$$

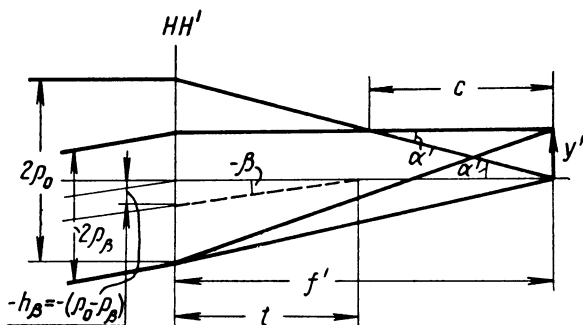


Рис. 55

Точно так же, пользуясь рис. 54, нетрудно найти и виньетирование

$$\rho(\beta) = \frac{2\rho_\beta}{2\rho_0} = \frac{\rho_0 + y'}{2\rho_0} . \quad (303)$$

Без особых затруднений находим и отрезок

$$t = -\frac{\rho_0 - \rho_\beta}{\beta} = (1 - \rho(\beta)) \frac{\rho_0}{\beta} . \quad (304)$$

Отрезок  $t'$  (не показанный на рисунке) в пространстве изображений можно получить по формуле (269), помня, что вместо углов  $\alpha$  следует пользоваться углами  $\beta$  и что  $h_\beta = \rho_0 - \rho_\beta$ , а

$$\beta' = \frac{h_\beta}{t'} = \beta + \frac{h_\beta}{f'} . \quad (305)$$

4. Габаритный расчет оборотной системы с увеличением  $V = -1$  и со свободными диаметрами линз, равными диаметру предмета и изображения (рис. 56). Между линзами имеем параллельный ход лучей; тогда

$$y' = -y = \rho_0 . \quad (306)$$

На основании (282), а также, имея в виду, что  $V = -1$ , найдем

$$\alpha_3 = -\alpha_1; \quad f_2' = -f_1, \quad (307)$$

причем

$$\alpha_3 = \frac{\rho_0}{f_2'}. \quad (308)$$

Аналогично предыдущему легко определить

$$\beta_2 = -\frac{y' \alpha_3}{\rho_0} = -\alpha_3. \quad (309)$$

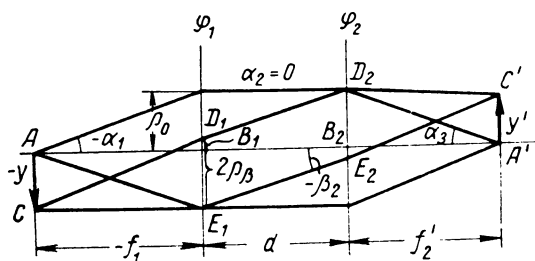


Рис. 56

Для определения виньетирования воспользуемся рис. 56 и учтем, что на рис. 56 значение  $\beta_2$  отрицательно, тогда

$$\rho(\beta) = \frac{2\rho_\beta}{2\rho_0} = \frac{2\rho_0 + \beta_2 d}{2\rho_0}, \quad (310)$$

где

$$d = -\frac{2\rho_0(1 - \rho(\beta))}{\beta_2} = 2(1 - \rho(\beta))f_2'. \quad (311)$$

Таким образом, длина оборотной системы будет

$$L = -f_1 + d + f_2' = d + 2f_2' = 2(2 - \rho(\beta))f_2'. \quad (312)$$

5. Внефокальный коллектив. В сложных оптических системах часто встречается необходимость изменения направления наклонных световых пучков после прохождения (или до прохождения) ими плоскости изображения без увеличения габаритных размеров последующей системы. Действительно, рассматривая ход одного из лучей наклонного пучка, например нижнего луча  $D_1 D_k$  (рис. 57), видим, что этот луч после прохождения изображения  $y_k$  делается верхним лучом пучка; его свободное продолжение, показанное на рисунке пунктиром, привело бы к очень большим габаритам последующей системы  $\varphi_{II}$ .

Требуемое изменение направления наклонных пучков легко осуществляется установкой вблизи (или в самой плоскости) изображения  $y_k$  линзы  $\varphi_k$ , называемой коллективом, или конденсором. Часто коллектив устанавливают не в плоскости изображения, чтобы наблюдатель не мог видеть всех дефектов стекла и поверхностей коллектива (мат, царапины, пузыри и т. п.).

Перейдем к рассмотрению габаритного расчета коллектива, расположенного за изображением. Обусловим равенство диаметра коллектива диаметру последующей системы и зададим высоты  $h_{I\alpha}$  и  $h_{I\beta}$  соответственно апертурного и нижнего луча наклонного пучка в плоскости системы I. Кроме того, будем полагать известным значение инварианта Лагранжа—Гельмгольца  $J = y\alpha$ .

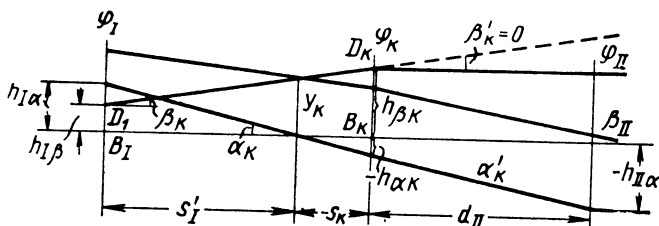


Рис. 57

Задавая значение величины изображения  $y_k$  перед коллективом несколько меньшей высоты  $h_{\beta k}$  рассматриваемого луча наклонного пучка, можно, пользуясь инвариантом Лагранжа—Гельмгольца, написать

$$\alpha_k = \frac{J}{y_k}. \quad (313)$$

Зная  $h_{I\alpha}$ , определяем отрезок

$$s'_I = \frac{h_{I\alpha}}{\alpha_k} = \frac{h_{I\alpha}}{J} y_k. \quad (314)$$

Далее, из рис. 57 можно найти

$$-\beta_k = \frac{y_k - h_{I\beta}}{s'_I} = \frac{y_k - h_{I\beta}}{h_{I\alpha} y_k} J = \frac{h_{\beta k} - y_k}{-s_k}, \quad (315)$$

откуда получаем расстояние коллектива от плоскости изображения

$$-s_k = \frac{h_{\beta k} - y_k}{y_k - h_{I\beta}} \cdot \frac{h_{I\alpha} y_k}{J}. \quad (316)$$

Часто встречаются случаи, когда  $h_{I\beta}$  много меньше  $y_k$  (или имеет обратный знак) и величина отрезка  $s_k$  в основном зависит от величины разности  $h_{\beta k} - y_k$ , т. е. от выбора самой величины

$y_k$ . Решение обратной задачи — определение  $y_k$  по заданному  $s_k$ , — как это видно из (316), будет значительно сложнее (для  $y_k$  будем иметь квадратное уравнение).

Дальнейший ход габаритного расчета не представляет особых затруднений.

Пользуясь (269) для нашего наклонного луча, получаем

$$\varphi_k = \frac{\beta'_k - \beta_k}{h_{\beta k}}. \quad (317)$$

В случае  $\beta'_k = 0$

$$\varphi_k = -\frac{\beta_k}{h_{\beta k}} = -\frac{y_k - h_{1\beta}}{h_{1\alpha} h_{1\beta} y_k} I. \quad (318)$$

Определяем на коллективе высоту апертурного луча, пользуясь (316),

$$h_{\alpha k} = s_k \alpha_k = -\frac{h_{\beta k} - y_k}{y_k - h_{1\beta}} h_{1\alpha} \quad (319)$$

или по формуле (270)

$$h_{\alpha k} = h_{1\alpha} - \alpha_k d_I = h_{1\alpha} - \frac{J}{y_k} (s'_I - s_k). \quad (320)$$

Возвращаясь к (269), определяем

$$\alpha'_k = \alpha_k + h_{\alpha k} \varphi_k. \quad (321)$$

Имея в виду, что высота  $h_{IIx}$  известна (диаметр II системы задан), на основании (270) можно вычислить

$$d_{II} = -\frac{h_{1\alpha} - h_{\alpha k}}{\alpha'_k}. \quad (322)$$

Определением  $d_{II}$  и завершается габаритный расчет коллектива. Рассматривать случай, когда коллектив расположен перед изображением, не будем, так как это почти полное повторение только что проделанных выводов.

### § 23. Уточненный габаритный расчет

Выше упоминалось, что габаритный расчет оптики на основе теории солинейного сродства выполнен при некоторых допущениях; на самом деле образование изображений и ход лучей в оптических системах базируется на законах, несколько отличающихся от положений теории солинейного сродства. Это отличие особенно выявляется тогда, когда системы обладают большими полями или большими апертурами.



Ход лучей во многих случаях весьма удобно определять по формуле, аналогичной формуле Штраубеля,

$$n dy \cos u du = n' dy' \cos u' du', \quad (323)$$

где  $u$  и  $u'$  — реальные апертурные углы.

Рассмотрим несколько характерных случаев.

1. Ортоскопическая (исправленная на дисторсию) телескопическая система. На рис. 58:  $C$  и  $C'$  — центры входного и выходного зрачков,  $\rho_0$  и  $\rho'_0$  — высоты на зрачках луча, входящего в систему параллельно оси,  $\beta$  и  $\beta'$  — полевые углы в пространстве предметов и изображений,  $\rho_t$  и  $\rho'_t$  — ширина наклонного пучка

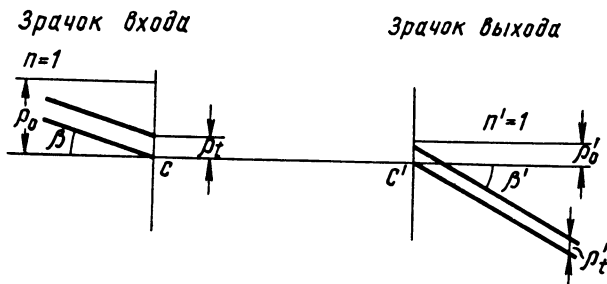


Рис. 58

до и после системы (предполагаются малыми). По условию ортоскопии следует, что видимое увеличение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{1}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho'_0} = \text{const.} \quad (324)$$

Рассматривая зрачки как предмет и изображение, видим, что в (323) вместо величин  $dy$  и  $dy'$  следует взять величины  $\rho_t$  и  $\rho'_t$ , а вместо  $u$  и  $u'$  — соответственно  $\beta$  и  $\beta'$ . Предполагая, что система находится в воздухе, где  $n = n' = 1$  (неравенство  $n$  и  $n'$  единице на практике почти не встречается), уравнение (323) можно переписать

$$\rho_t \cos \beta d\beta = \rho'_t \cos \beta' d\beta'. \quad (325)$$

Дифференцируя (324), получаем

$$\frac{d\beta'}{\cos^2 \beta'} = \frac{1}{V_0} \frac{d\beta}{\cos^2 \beta}. \quad (326)$$

Разделив (325) на (326), находим

$$\rho'_t \cos^3 \beta' = V_0 \rho_t \cos^3 \beta, \quad (327)$$

откуда

$$V_t = \frac{\rho'_t}{\rho_t} = V_0 \frac{\cos^3 \beta}{\cos^3 \beta'}. \quad (328)$$

Линейное увеличение в зрчках для наклонного пучка является функцией угла поля зрения и не равно линейному увеличению для осевого пучка.

Выше определяли виньетирование как отношение сечений наклонного и осевого пучков

$$\rho(\beta) = \frac{\rho_t}{\rho_0}; \quad \rho'(\beta') = \frac{\rho'_t}{\rho'_0}. \quad (329)$$

Следовательно, в рассматриваемом случае виньетирование до и после системы уже не будет оставаться постоянным.

Определим порядок величин.

Зададимся увеличением  $\Gamma = 10\times$  и  $2\beta' = 90^\circ$ . Тогда, очевидно,

$$\operatorname{tg} \beta' = 1; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma} = 0,1; \quad \beta = 5^\circ 43'.$$

Определим  $\cos^3 \beta$  и  $\cos^3 \beta'$ . Для этого находим:

$$\begin{aligned} \cos \beta &= 0,995; & \cos^3 \beta &= 0,985; \\ \cos \beta' &= \frac{\sqrt{2}}{2}; & \cos^3 \beta' &= \frac{\sqrt{2}}{4} = 0,3535; \\ \frac{V_t}{V_0} &= \frac{0,985}{0,3535} = 2,79. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что линейное увеличение в зрчках в рассматриваемом примере изменится почти втрое, что сейчас же повлечет за собой соответственное изменение виньетирования.

Ясно, что подобные изменения существенно отразятся и на габаритном расчете.

2. В качестве второго примера рассмотрим случай, когда линейное увеличение в зрчках в пределах всего поля сохраняется постоянным

$$V_t = V_0 = \text{const.} \quad (330)$$

Вводя (330) в (325), найдем

$$\cos \beta \, d\beta = V_t \cos \beta' \, d\beta' = V_0 \cos \beta' \, d\beta'. \quad (331)$$

После интегрирования (331) получаем

$$\sin \beta = V_0 \sin \beta', \quad (332)$$

т. е. уже знакомое нам условие синусов Аббе.

Нетрудно видеть, что (332) несовместимо с (324) [исключая случаи  $V_0 = \pm 1$ ], а поэтому наша система уже не будет ортоскопичной (будет обладать дисторсией).

Определим дисторсию нашей системы.

Для дисторсии телескопической системы имеем следующее выражение

$$\Delta = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma \operatorname{tg} \beta} - 1. \quad (333)$$

Пользуясь (332) и помня, что  $\Gamma = \frac{1}{V_0}$ , преобразуем (235)

$$\Delta = \frac{\sin \beta' \cos \beta}{\Gamma \sin \beta \cos \beta'} - 1 = \frac{\cos \beta}{\cos \beta'} - 1. \quad (334)$$

Полагая, как и ранее,  $2\beta' = 90^\circ$ , определяем

$$\cos \beta' = \sin \beta' = \frac{\sqrt{2}}{2}; \quad \sin \beta = 0,0707; \quad \beta = 4^\circ 3'; \quad \cos \beta = 0,9975$$

и дисторсию

$$\Delta = \frac{0,9975}{0,7071} - 1 = 0,41 = 41 \%.$$

Совершенно очевидно, что наличие подобной дисторсии нежелательно как из соображений неприемлемости искажений изображения, так и ввиду значительного уменьшения поля зрения самой системы (от  $11^\circ 26'$  до  $8^\circ 6'$ ).

Заметим, что в ряде случаев наличие в окулярной части системы большой дисторсии может оказаться и небесполезным; в частности (это имеет место), при расчете оборотной системы существенно уменьшается инвариант  $I$ , благодаря чему можно уменьшить диаметры линз или увеличить длину оборотной системы.

Практически для уточнения габаритного расчета следует при определении размеров изображения сразу учитывать дисторсию соответствующих элементов системы (например, объектива и окуляра системы); учитывать изменение виньетирования следует главным образом тогда, когда отдельные элементы системы при больших полях хорошо исправлены на дисторсию.

## § 24. Суммирование аберраций

В предшествующих параграфах рассматривались вопросы, посвященные определению основных параметров элементов, составляющих систему, — фокусных расстояний, диаметров полей зрения и т. п.; однако уже в предыдущем параграфе необходимо было знать одну из аберраций — дисторсию.

При выполнении габаритного расчета системы естественно стремление оценить качественные возможности системы — установить, какими остаточными аберрациями может (при рациональном аберрационном расчете) обладать проектируемая система. Часто эта задача разрешается сразу после габаритного расчета;

для этого необходимо лишь знать коррекционные возможности составляющих систему элементов — объективов, оборотных линз, окуляров.

Если условия работы этих элементов не слишком напряжены, то сравнительно нетрудно установить, какими aberrациями они могут обладать и в каких пределах их можно изменять. Поэтому, выбрав все элементы, составляющие систему, и установив возможные величины их aberrаций, подойдем к задаче суммирования aberrаций отдельных элементов и к определению aberrаций всей системы.

Как правило, aberrационный расчет почти никогда не ведется для системы в целом; почти всегда все элементы, составляющие систему, рассчитываются самостоятельно.

Отдельные элементы рассчитывают так, как это наиболее удобно, иногда даже принимая ход лучей противоположным тому, какой будет при работе элемента внутри системы. Так, например, все окуляры рассчитывают при ходе лучей, идущих от глаза (противоположно тому, как это будет на самом деле).

Поэтому во избежание путаницы в дальнейшем, введем сейчас некоторые определения.

Условимся считать прямым то направление хода лучей, в котором производится самостоятельный aberrационный расчет любого из отдельных элементов, составляющих систему; противоположный же ход лучей через каждый из элементов условимся считать обратным.

Таким образом, если какой-либо отдельный элемент входит в систему так, что фактический ход лучей через него будет таким же, как и при самостоятельном расчете элемента, то элемент работает в системе в прямом ходе.

Если элемент при введении его в систему необходимо перевернуть так, чтобы лучи пошли через него обратно тому, как это было при расчете элемента, то элемент работает в системе в обратном ходе.

Заметим, что ориентирование отдельных элементов, имеющих с одной стороны параллельный ход лучей, при работе их в системе производится всегда так, чтобы при самостоятельном расчете элемента параллельные лучки лучей были всегда в х о д я щ и м и (положение предмета в бесконечности). Рассмотрим процесс обращения системы (рис. 59, а, б).

Условимся обращать систему путем поворота ее чертежа в его плоскости на  $180^\circ$ .

Все величины, относящиеся к прямому ходу, будем обозначать стрелкой  $\rightarrow$  вверх; величины, относящиеся к обратному ходу, — стрелкой  $\leftarrow$  обратного направления.

Из рис. 59, а и б следует:

$$\vec{y'} = -\vec{y}; \quad -\vec{y} = \vec{y'}. \quad (335)$$

Составляя линейное увеличение в прямом  $\vec{V}$  и обратном  $\overleftarrow{V}$  ходах, находим

$$\vec{V} = \frac{\vec{y}'}{\vec{y}} = \frac{-\overleftarrow{y}}{-\overleftarrow{y}'} = \frac{1}{\overleftarrow{V}}. \quad (336)$$

По формуле (22) получим, что продольное увеличение

$$q = -\frac{f'}{f} V^2 = \frac{n'}{n} V^2. \quad (337)$$

В нашем случае всегда будем полагать  $n = n' = 1$  (система

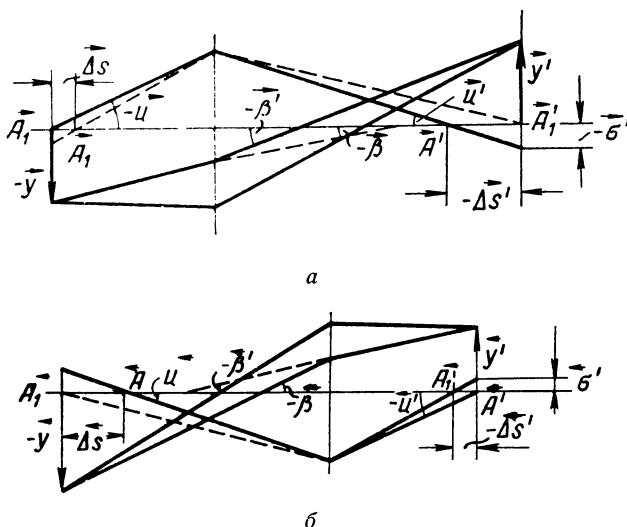


Рис. 59

находится в воздухе). Определим

$$\vec{q} = \vec{V}^2 = \frac{1}{\overleftarrow{V}^2} = \frac{1}{\overleftarrow{q}}. \quad (338)$$

Рассмотрим преобразование углов. Из рис. 59, а и б следует:

$$-\vec{u} = -\overleftarrow{u}'; \quad \vec{u}' = \overleftarrow{u}; \quad -\vec{\beta} = -\overleftarrow{\beta}'; \quad -\overleftarrow{\beta}' = -\vec{\beta}. \quad (339)$$

Таким образом, при обращении хода входные углы будут выходными и не изменят знака.

Перейдем к рассмотрению аберраций.

На рис. 60:  $\varphi$  — оптическая система;  $A$  — точка расположения предмета;  $A_0'$  — точка расположения изображения предмета для нулевых лучей;  $A'$  — некоторая точка, в которой реальный луч, исходящий из точки  $A$  под углом  $u$  к оси системы, по выходе из

системы пересекает ось;  $A_0'A' = \Delta s'$  — продольная сферическая абберация. Переместим точку  $A$  в некоторое положение  $A_1$ , образовав тем самым отрезок  $AA_1 = \overline{\Delta s_1}$ , соответствующий величине продольной сферической абберации у предмета. Полагая, что  $\overline{\Delta s_1}$  мало и что значение продольного увеличения  $q$  для нулевых лучей соответствует продольному увеличению и для реальных лучей, можно определить величину смещения точки  $A'$  (перешедшей в некоторое положение  $A_1'$ ) как произведение продольного увеличения на предметную абберацию. Таким образом, отрезок

$$A'A_1' = q \overline{\Delta s_1}. \quad (340)$$

Суммарная абберрация равна отрезку

$$A_0' A_1' = \overline{\Delta s_1'} = q \overline{\Delta s_1} + \Delta s'. \quad (341)$$

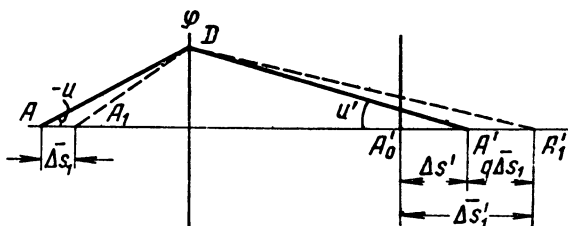


Рис. 60

Предположим, что суммируем aberrации  $m$  систем, расположенных одна за другой. В этом случае продольная aberrация после  $(k-1)$ -ой системы будет предметной aberrацией для  $k$ -ой системы. На основании этого равенство (341) можно записать в виде

$$\overline{\Delta s'_k} = q_k \overline{\Delta s'_{k-1}} + \Delta s'_k \quad (342)$$

или, выражая  $\overline{\Delta s'}_{k-1}$  через  $q_{k-1}$ ,  $\overline{\Delta s'}_{k-2}$  и  $\Delta s'_{k-1}$ , найдем

$$\overline{\Delta s'_k} = q_k(q_{k-1}\overline{\Delta s'_{k-2}} + \overline{\Delta s'_{k-1}}) + \Delta s'_k. \quad (343)$$

Последовательно понижая индексы, запишем

$$\begin{aligned} \overline{\Delta s'_k} = & q_k q_{k-1} \cdots q_1 \overline{\Delta s_1} + q_k q_{k-1} \cdots q_2 \Delta s'_1 + \\ & + q_k q_{k-1} \cdots q_3 \Delta s'_2 + \cdots + q_k q_{k-1} \Delta s'_{k-2} + q_k \Delta s'_{k-1} + \Delta s'_k \end{aligned} \quad (344)$$

или сокращенно

$$\overline{\Delta s'_k} = \sum_{\nu=0}^{\nu=k-1} \prod_{\mu=k}^{\mu=\nu+1} q_\mu \Delta s'_\nu + \Delta s'_k, \quad (345)$$

где  $\Delta s_0'$  условно равно  $\overline{\Delta s_1}$ . Непременным условием для суммиро-

вания, конечно, является равенство выходных и входных апертурных углов между составляемыми системами

$$u'_v = u_{v+1}. \quad (346)$$

Рассмотрим случай обращения системы. Возвратимся к рисунку 59, а и б. Нетрудно видеть, что при обратном ходе лучей продольная aberrация  $-\overrightarrow{\Delta s'}$  в изображении обратится в предметную aberrацию  $\overleftarrow{\Delta s}$ , изменив только знак на обратный; суммарная продольная aberrация  $\overleftarrow{\Delta s'}$  будет равна нулю, так как предметная aberrация в прямом ходе отсутствовала. Таким образом, возвращаясь к (341), можем написать

$$\overleftarrow{\Delta s'} = 0 = \overleftarrow{q} \overleftarrow{\Delta s} + \overleftarrow{\Delta s'}, \quad (347)$$

откуда

$$\overleftarrow{\Delta s'} = -\overleftarrow{q} \overleftarrow{\Delta s} = \frac{1}{\overrightarrow{q}} \overrightarrow{\Delta s'}, \quad (348)$$

т. е. продольная сферическая aberrация в изображении в обратном ходе (при отсутствии aberrации в предмете) будет равна aberrации в прямом ходе, деленной на продольное увеличение также в прямом ходе.

Нетрудно просуммировать aberrации тогда, когда одна из систем (например, первая) работает в обратном ходе. На основании (342) напомним

$$\overrightarrow{\Delta s_{II}'} = \overrightarrow{q_{II}} \overleftarrow{\Delta s_I'} + \overrightarrow{\Delta s_{II}'} = \overrightarrow{q_{II}} \frac{\overrightarrow{\Delta s_I'}}{\overrightarrow{q_I}} + \overrightarrow{\Delta s_{II}'} = \overrightarrow{q_{II}} \overleftarrow{q_I} \overrightarrow{\Delta s_I'} + \overrightarrow{\Delta s_{II}'} \quad (349)$$

Но произведение продольных увеличений  $\overleftarrow{q_I}$  и  $\overrightarrow{q_{II}}$  есть не что иное, как суммарное продольное увеличение обеих систем, которое обозначим  $\overrightarrow{q_{I+II}}$ ; тогда суммарная продольная aberrация

$$\overrightarrow{\Delta s_{II}'} = \overrightarrow{q_{I+II}} \overrightarrow{\Delta s_I'} + \overrightarrow{\Delta s_{II}'} \quad (350)$$

На практике довольно часто может встретиться случай, когда  $\overrightarrow{q_{II}}$  и  $\overrightarrow{q_I}$  равны нулю (составление оборотной системы с параллельным ходом между линзами, составляемой из двух объективов, у которых предмет лежит в бесконечности. При этом в составленной системе первая линза работает в обратном ходе). Нетрудно видеть, что в этом случае произведение  $\overrightarrow{q_{II}} \overleftarrow{q_I}$  в (349) обращается в неопределенность, и продольное увеличение  $\overrightarrow{q_{I+II}}$  состав-

ленной оборотной системы легко определится через ее линейное увеличение

$$V = \frac{y'}{y} = \frac{nu}{n'u'} . \quad (351)$$

В нашем случае  $n = n' = 1$  (система находится в воздухе);  
 $u = \overleftarrow{u}_I$  и  $u' = \overrightarrow{u}_{II}'$ .

Таким образом,

$$\vec{V} = \frac{\overleftarrow{u}_I}{\overrightarrow{u}_{II}'} = \frac{\overrightarrow{u}_I'}{\overrightarrow{u}_{II}'} , \quad (352)$$

причем

$$\overrightarrow{u}_I' = \frac{\vec{h}_I}{\vec{f}_I'} \quad \text{и} \quad \overrightarrow{u}_{II}' = \frac{\vec{h}_{II}}{\vec{f}_{II}'} , \quad (353)$$

как как  $u$  между линзами равно нулю.

Но при составлении системы

$$\overleftarrow{h}_I = -\vec{h}_I = \vec{h}_{II} , \quad (354)$$

так как высоты  $h$  при обращении меняют знак. Поэтому

$$\vec{V}_{I+II} = \frac{\overrightarrow{u}_I'}{\overrightarrow{u}_{II}'} = \frac{\vec{h}_I}{\vec{f}_I'} \cdot \frac{\vec{f}_{II}'}{\vec{h}_{II}} = -\frac{\vec{f}_{II}'}{\vec{f}_I'} \quad (355)$$

и продольное увеличение

$$\vec{q}_{I+II} = \vec{V}_{I+II}^2 = \left( \frac{\vec{f}_{II}'}{\vec{f}_I'} \right)^2 . \quad (356)$$

Подставляя (356) и (350), окончательно найдем

$$\vec{\Delta s}_{II}' = \left( \frac{\vec{f}_{II}'}{\vec{f}_I'} \right)^2 \vec{\Delta s}_I' + \vec{\Delta s}_{II}' . \quad (357)$$

В случае равенства фокусных расстояний обеих линз оборотной системы ее суммарная абберация определится как сумма аббераций составляющих линз в прямом ходе.

Перейдем к рассмотрению поперечных аббераций. На рис. 61:  $\varphi$  — оптическая система;  $A$  — точка расположения предмета  $AC = y$ ;  $A'$  — точка расположения изображения  $A'C' = y'$  созданного реальным лучом  $CDC'$ ; отрезок  $A'C_0' = y_0' = Vy_0$  — неискаженное при отсутствии аббераций изображение предмета;  $\Delta y'$  —



поперечная абберация для луча  $CDC'$  при отсутствии поперечной абберации в предмете. Перемещая точку  $C$  в положение  $C'$ , вводим предметную абберацию  $\overline{\Delta y}$ . Полагая  $\overline{\Delta y}$  малым и предполагая постоянство линейного увеличения  $V$ , нетрудно определить смещение  $C'C_1' = V\overline{\Delta y}$  изображения  $C_1'$  точки  $C_1$  относительно точки  $C'$ . Определяя суммарную абберацию  $\overline{\Delta y'}$  как отрезок  $C_0'C_1'$ , найдем

$$\overline{\Delta y'} = V\overline{\Delta y} + \Delta y'. \quad (358)$$

Таким образом, суммарная поперечная абберация определяется аналогично уже рассмотренному нами случаю продольной

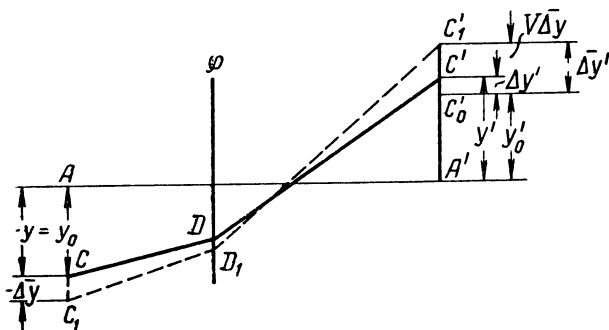


Рис. 61

абберации как сумма произведения линейного увеличения на предметную абберацию с поперечной абберацией самой системы. Перейдем к суммированию поперечных аббераций  $m$  систем, расположенных одна за другой.

Имея в виду, что абберации после предшествующей системы являются предметными для последующей, на основании (358) напишем

$$\overline{\Delta y'_k} = \overline{\Delta y_{k+1}} = V_k \overline{\Delta y_k} + \Delta y'_k = V_k \overline{\Delta y'_{k-1}} + \Delta y'_k. \quad (359)$$

Выражая  $\overline{\Delta y'_{k-1}}$  через  $V_{k-1}$ ,  $\Delta y'_{k-1}$  и  $\overline{\Delta y'_{k-2}}$  и т. д., последовательно понижая индексы, можно получить общее выражение для суммы поперечных аббераций

$$\overline{\Delta y'_k} = V_k V_{k-1} \cdots V_1 \overline{\Delta y_1} + V_k V_{k-1} \cdots V_2 \Delta y'_1 + \\ + V_k V_{k-1} \cdots V_3 \Delta y'_2 + \cdots + V_k V_{k-1} \Delta y'_{k-2} + V_k \Delta y'_{k-1} + \Delta y'_k \quad (360)$$

или сокращенно

$$\overline{\Delta y'_k} = \sum_{v=0}^{v=k-1} \prod_{\mu=k}^{\mu=v+1} V_{\mu} \Delta y'_v + \Delta y'_k, \quad (361)$$

где  $\Delta y_0'$  условно принято равным  $\overline{\Delta y_1}$ . Естественно, что неизменным условием для суммирования aberrаций и в этом случае будут равенства

$$y'_{k-1} = y_k \quad \text{и} \quad \beta'_{k-1} = \beta_k. \quad (362)$$

Равенства (362) должны соблюдаться с точностью до величин aberrаций. Рассмотрим случай обращения системы. При обращении величина  $\overrightarrow{\Delta y'}$  станет предметной aberrацией  $\overleftarrow{\Delta y}$ , изменив свой знак

$$\overleftarrow{\Delta y'} = -\overrightarrow{\Delta y'}. \quad (363)$$

Суммарная же aberrация в обратном ходе  $\overleftarrow{\Delta y'}$  будет равна нулю, так как до обращения полагали, что предмет свободен от aberrаций. Поэтому можно написать

$$\overleftarrow{\Delta y'} = 0 = \overleftarrow{V} \overleftarrow{\Delta y} + \overleftarrow{\Delta y'}, \quad (364)$$

откуда

$$\overleftarrow{\Delta y'} = -\overleftarrow{V} \overleftarrow{\Delta y} = \frac{\overrightarrow{\Delta y'}}{\overleftarrow{V}}. \quad (365)$$

Пользуясь (365), просуммируем поперечные aberrации для случая, когда первая из двух составляющих систем работает в обратном ходе. Тогда, обозначая величины, относящиеся к первой системе, индексом I, и ко второй системе — индексом II, можем написать

$$\overrightarrow{\Delta y_{II}'} = \overrightarrow{V_{II}} \overleftarrow{\Delta y_I'} + \overrightarrow{\Delta y_{II}'} = \frac{\overrightarrow{V_{II}}}{\overleftarrow{V_I}} \overrightarrow{\Delta y_I'} + \overrightarrow{\Delta y_{II}'} = \overrightarrow{V_{II}} \overleftarrow{V_I} \overrightarrow{\Delta y_I'} + \overrightarrow{\Delta y_{II}'} \quad (366)$$

или, рассматривая произведение увеличений  $\overrightarrow{V_{II}} \overleftarrow{V_I}$  как линейное увеличение  $\overrightarrow{V_{I+II}}$  обеих систем в совокупности, найдем

$$\overrightarrow{\Delta y_{II}'} = \overrightarrow{V_{I+II}} \overrightarrow{\Delta y_I'} + \overrightarrow{\Delta y_{II}'} \quad (367)$$

Для случая оборотной системы (между составляющими системами параллельный ход) линейное увеличение нами уже было определено, поэтому

$$\overrightarrow{\Delta y_{II}'} = -\frac{\overrightarrow{f_{II}'}}{\overleftarrow{f_I'}} \overrightarrow{\Delta y_I'} + \overrightarrow{\Delta y_{II}'} \quad (368)$$

а в случае равенства фокусных расстояний

$$\overrightarrow{\Delta y_{II}'} = \overrightarrow{\Delta y_{II}'} - \overrightarrow{\Delta y_I'}. \quad (369)$$

Отсюда следует, что суммарная поперечная aberrация равна разности поперечных aberrаций составляющих систем. В случае равенства поперечных aberrаций обоих компонентов суммарные aberrации всей оборачивающей системы становятся равными нулю.

Так, например, в случае наличия дисторсии и комы у одинаковых составляющих систем, работающих с одинаковым ходом главных лучей, наблюдается автоматическое уничтожение комы и дисторсии для всей системы.

Для телескопических систем изображение после окуляра лежит в бесконечности; поэтому выражать aberrации в линейной форме как продольные или поперечные aberrации неприемлемо. В случае, если телескопическая система свободна от aberrаций и предмет находится в бесконечности, параллельные пучки лучей, входящие в систему, по выходе из нее остаются параллельными.

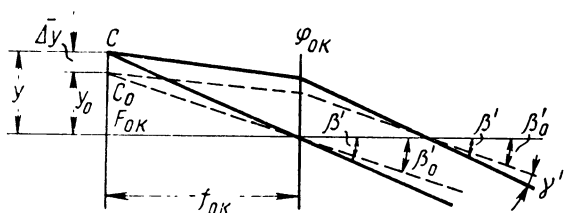


Рис. 62

Если же рассматриваемая система не свободна от aberrаций, то параллельные пучки лучей, вошедшие в нее, по выходе уже не будут строго параллельными. Таким образом, несовершенство исправления телескопической системы (ее aberrации) характеризуется непараллельностью выходящих из нее пучков (в угловых единицах).

Установим зависимость между линейными и угловыми aberrациями системы (рис. 62). Для получения параллельного хода лучей по выходе из окуляра необходимо, чтобы изображение от всей предшествующей окуляру части системы находилось в передней фокальной плоскости окуляра. Будем считать известными предметные aberrации в фокальной плоскости окуляра  $\overline{\Delta y}$  (для этого достаточно сложить aberrации всей предшествующей части системы с предметными aberrациями собственно окуляра); тогда, зная величину  $y_0$  — положение точки  $C_0$ , соответствующее случаю отсутствия aberrаций, и величину  $y$  — положение точки  $C$ , смещенной вследствие наличия поперечной aberrации  $\overline{\Delta y}$ , можно легко определить углы  $\beta'_0$  и  $\beta'$  выходящих из окуляра лучей (свободного и не свободного от aberrации). Из рис. 62 находим

$$\beta'_0 = -\frac{y_0}{f_{ок}} = \frac{y_0}{f'_{ок}}; \quad \beta' = \frac{y}{f'_{ок}}. \quad (370)$$

Определяя угловую aberrацию  $\gamma'$  как разность  $\beta' - \beta_0'$ , получаем

$$\gamma' = \beta' - \beta_0' = \frac{y}{f'_{\text{ок}}} - \frac{y_0}{f'_{\text{ок}}} = \frac{\Delta y}{f'_{\text{ок}}} . \quad (371)$$

Из (371) следует, что угловые aberrации равны отношению поперечных предметных aberrаций в фокальной плоскости окуляра к фокусному расстоянию окуляра.

Продольная aberrация телескопической системы после окуляра может быть также выражена в диоптрийных единицах; это возможно тогда, когда продольные aberrации не зависят от величины апертуры (зрачков), как, например, астигматизм и кривизна поля, хроматизм (продольный).

Обратимся к рис. 63. Пусть  $\overline{\Delta s}$  — суммарная продольная aberrация в передней фокальной плоскости окуляра. Тогда, в силу

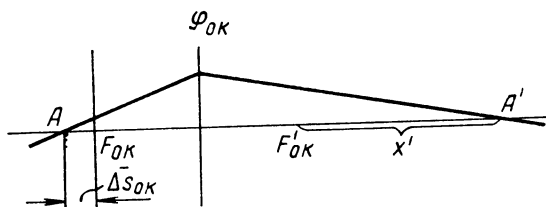


Рис. 63

равенства  $\bar{x} = \overline{\Delta s}$  точка A изобразится окуляром не в бесконечности, а на некотором конечном расстоянии  $x'$  от заднего фокуса окуляра  $F'_{\text{ок}}$ . Таким образом,

$$x' = \frac{f_{\text{ок}} f'_{\text{ок}}}{x} = \frac{f_{\text{ок}} f'_{\text{ок}}}{\overline{\Delta s}} . \quad (372)$$

Найдем обратную величину  $x'$ , т. е.

$$\frac{1}{x'} = - \frac{\overline{\Delta s}}{f_{\text{ок}}^2} . \quad (373)$$

Нетрудно видеть, что  $\frac{1}{x'}$  изменяется пропорционально  $\overline{\Delta s}$  и служит мерой продольных aberrаций в параллельном ходе. Практически  $\frac{1}{x'}$  удобно выражать в диоптрийных единицах, помня, что для этого  $x'$  должно быть выражено в метрах. Поэтому

$$L = \frac{1}{x'} = \frac{1000}{f_{\text{ок}}^2} \overline{\Delta s} \text{ мм}, \quad (374)$$

если  $L$  выражать в диоптриях, а  $f_{\text{ок}}$  и  $\overline{\Delta s}$  — в миллиметрах.

В заключение сделаем несколько замечаний относительно возможностей исправления аберраций, которые следует иметь в виду уже при габаритном расчете телескопических систем; эти замечания будут обоснованы ниже (роль дисторсии окуляра).

1. Исправление продольного хроматизма и хроматизма увеличения (I и II хроматизм). Исправление хроматизма в телескопических системах при неперменном условии применения объективов и оборотных линз, склеенных из двух стекол, не вызывает каких-либо затруднений и всегда осуществимо при абберационном расчете системы по любой габаритной схеме; затруднения, связанные с исправлением вторичного спектра при наличии больших фокусных расстояний объективов и оборотных линз (астрономические трубы с большим увеличением, перископы), обуславливаются исходными требованиями, предъявляемыми к системе.

2. Исправление сферической аберрации и комы точно так же возможно при наличии склеенных линз при любой габаритной схеме; в некоторых случаях отдельные элементы могут оставаться с неисправленной комой (например, линзы оборотной системы), уравниваемой соответственным исправлением комы какого-либо другого элемента. Исправление сферической аберрации при абберационном расчете может быть затруднено наличием больших относительных отверстий у отдельных элементов системы, приводящих к быстрому (приблизительно пропорционально 4-й степени относительных отверстий\*) возрастанию остаточных зон сферической аберрации. Однако при абберационном расчете подобных элементов все же представляется возможным уменьшить остаточные зоны путем усложнения этих элементов. Анализ величины остаточных зон полезно производить методом суммирования аберраций для всей системы, используя значения аберраций уже рассчитанных элементов каких-либо других систем, пересчитанных конечно на фокусные расстояния, определенные при габаритном расчете.

3. Исправление астигматизма и кривизны поля. Исправление астигматизма в телескопических системах производится не так свободно, как других аберраций, и связано с выносом зрачков и нарушением исправления комы у отдельных элементов системы; следует также всегда иметь в виду, что при совпадении зрачка тонкого элемента (объектива, оборотной линзы) с самим элементом астигматизм такого элемента становится неизменяемым и определяется величиной поля зрения элемента. Естественно, что такой «стабильный» астигматизм может быть уничтожен лишь посредством компенсации соответственно исправленным астигматизмом других элементов системы. В частности, например, следует избегать смыкания линз в оборотных системах, так как это сейчас же приведет к невозможности одновременного исправления астиг-

---

\* Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем. ОНТИ, 1937, стр. 350.

матизма и комы в такой системе. Наряду с этим иногда бывает полезно совместить один из тонких элементов (например, объективы биноклей) со зрачком, когда исправление астигматизма вполне обеспечивается другими элементами (например, окуляром); в подобных случаях варьирование комой элемента, совпадающего со зрачком, позволит уничтожить кому всей системы, не изменяя ее астигматизма. Заметим, что при более или менее рациональном габаритном расчете почти всегда можно получить заданный астигматизм (или его уничтожение) для всей системы, используя, конечно, все ее коррекционные возможности.

Исправление кривизны поля («печвальной» кривизны при уничтожении астигматизма) в телескопических системах в противоположность другим абберациям определяется суммой сил линз, так называемой суммой Пецваля  $\Sigma \frac{\varphi}{n} \approx \frac{\Sigma \varphi}{n}$ .

Полное исправление печвальной кривизны в телескопических системах достигается лишь в очень редких случаях (геодезические трубы с внутренней фокусировкой, телескопические системы, анастигматы).

Если известно значение печвальной суммы, нетрудно установить возможности астигматической коррекции системы, зная, конечно, ее окулярное поле зрения. Остановимся на этом более подробно. Из теории аббераций известно, что кривизна меридионального и сагиттального изображений  $\frac{1}{R'_t}$  и  $\frac{1}{R'_s}$  связана с печвальной суммой следующим соотношением

$$\frac{3}{R'_s} - \frac{1}{R'_t} = \frac{2}{R_p'} = 2 \Sigma \frac{\varphi}{n}, \quad (375)$$

(так как величины  $\frac{1}{R} = \frac{2x}{y^2}$  могут быть связаны друг с другом через формулы (217), (219) и (230)).

Нетрудно видеть, что когда  $R'_s = R'_t$ , т. е. когда астигматизм отсутствует,

$$R'_s = R'_t = R_p'. \quad (376)$$

Это значит, что радиус печвальной кривизны равен радиусам меридиональной и сагиттальной кривизны; иными словами, радиус печвальной кривизны определяет кривизну поля при уничтоженном астигматизме.

Выведем некоторые соотношения. На рис. 64:  $\varphi_{ок}$  — окуляр некоторой системы;  $F_{ок}$  — передний фокус окуляра;  $f_{ок}$  — переднее фокусное расстояние окуляра;  $F_{ок} C_0 \doteq y_{ок}$  — идеальное изображение в фокальной плоскости (не искривленное);  $F_{ок} C$  — искривленное изображение;  $R$  — радиус кривизны поверхности изображения;  $x$  — стрелка кривизны при величине изображения  $y_{ок}$ , равная

$$x = \frac{y_{ок}^2}{2R}. \quad (377)$$

Определим  $x'$  после окуляра и выразим его в диоптриях:

$$L = \frac{1000}{x'} = -\frac{1000 x}{f_{\text{ок}}'^2} = -\frac{1000 y_{\text{ок}}'^2}{2 R f_{\text{ок}}'^2} = -\frac{1000}{2 R} \beta_{\text{ок}}'^2. \quad (378)$$

Пользуясь (378) как общей формулой, можем без труда написать выражения:

$$L_s = -\frac{1000}{2 R_s} \beta_{\text{ок}}'^2; \quad L_t = -\frac{1000}{2 R_t} \beta_{\text{ок}}'^2; \quad L_p = -\frac{1000}{2 R_p} \beta_{\text{ок}}'^2. \quad (379)$$

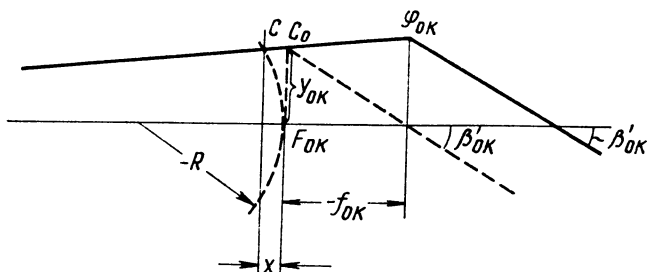


Рис. 64

Умножая  $L_s$  на три и вычитая  $L_t$ , получаем выражение, связывающее сагиттальную, меридиональную и пецвалеу кривизны для телескопической системы, выраженные в диоптриях

$$\begin{aligned} 3 L_s - L_t &= -\frac{1000}{2} \beta_{\text{ок}}'^2 \left( \frac{3}{R_s} - \frac{1}{R_t} \right) = -\frac{1000}{2} \beta_{\text{ок}}'^2 \frac{2}{R_p} = \\ &= 2 L_p = -1000 \beta_{\text{ок}}'^2 \Sigma \frac{\varphi}{n}. \end{aligned} \quad (380)$$

Небезынтересно, что пецвалева кривизна, выраженная в диоптриях, зависит лишь от величины поля зрения окуляра и пецвалевой суммы  $\Sigma \frac{\varphi}{n}$ .

В большинстве случаев в телескопических системах все элементы имеют силы одного знака, причем окуляр является наиболее короткофокусным (наиболее сильным) элементом.

Тогда можно положить

$$\Sigma \frac{\varphi}{n} \geq \frac{\varphi_{\text{ок}}}{n}.$$

На основании этого (380) можно представить в виде

$$3 L_s - L_t = 2 L_p \geq -1000 \beta_{\text{ок}}'^2 \frac{\varphi_{\text{ок}}}{n}.$$

Полагая  $\beta'_{\text{ок}} \approx 0,4$  (что соответствует величине окулярного поля зрения  $2\beta' \approx 45^\circ$ ) и  $n = 1,6$ , получаем

$$3L_s - L_t = 2L_p \geq 1000 \frac{0,16}{1,6} \cdot \frac{1}{f'_{\text{ок}}} = \frac{100}{f'_{\text{ок}}}.$$

Таким образом, например при  $f'_{\text{ок}} = 25$  мм, находим

$$3L_s - L_t = 2L_p \geq 4 \text{ диоптриям.}$$

В случае, если  $L_s = L_t = L_p$ , получаем кривизну изображения при исправленном астигматизме, равную двум диоптриям.

Задаваясь равенством  $L_s = -L_t$ , находим

$$-3L_t - L_t = 2L_p,$$

откуда

$$L_t = -\frac{L_p}{2} = -1 \text{ диоптрии и } L_s = \frac{L_p}{2} = 1 \text{ диоптрии.}$$

Таким образом, выбрав тот или иной окуляр (т. е. задавшись окулярным полем зрения и его фокусным расстоянием), уже заранее можем предвидеть наилучшее возможное исправление астигматизма и кривизны поля зрения всей системы; для более точной оценки возможностей исправления астигматизма следует, конечно, подсчитать пецвалеу сумму для всей системы.

При этом, не делая большой погрешности, можно полагать

$$\Sigma \frac{\varphi}{n} = \frac{\Sigma \varphi}{n} = 0,67 \Sigma \varphi,$$

если все  $n = 1,5$ .

Роль дисторсии окуляра. При разработке и использовании в оптической системе широкоугольных окуляров можно встретиться со значительными величинами дисторсии, которая может существенно изменять величины фокусных расстояний по полю зрения.

Действительно, рассматривая широкоугольный окуляр в обратном ходе как оптическую систему, у которой зрачок входа совпадает с передним фокусом и зрачок выхода удален в бесконечность (рис. 65), мы видим, что величина отношения дифференциала изображения  $dy'_t$  к дифференциалу полевого угла  $d\beta$  определит нам переднее меридиональное фокусное расстояние, равное

$$-f_t = -\frac{dy'_t}{d\beta_t} = f'_t. \quad (381)$$

Так как величина сагиттального фокусного расстояния  $f_s$  определяется путем поворота плоскости чертежа на малый угол,  $\gamma$ , то

$$-f_s = -\frac{dy'_s}{d\beta_s} = -\frac{y' \gamma}{\gamma \sin \beta} = -\frac{y'}{\sin \beta} = f'_s. \quad (382)$$



Задаваясь какой-либо зависимостью между величиной реального изображения  $y'$  и величиной полевого угла  $\beta$  и пользуясь формулами (381) и (382), можем найти величины меридионального и сагиттального фокусных расстояний. Рассмотрим несколько частных случаев.

1. Окуляр свободен от дисторсии. В этом случае величина изображения  $y'$  будет равна величине  $y'_0$

$$y' = y'_0 = -f'_0 \operatorname{tg} \beta. \quad (383)$$

Дифференцируя эту формулу, получим

$$f'_t = -\frac{dy'}{d\beta} = \frac{f'_0}{\cos^2 \beta}, \quad (384)$$

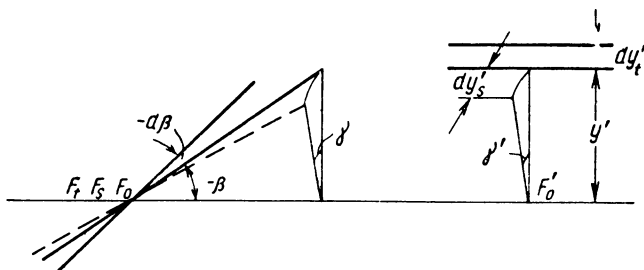


Рис. 65

а величина сагиттального фокусного расстояния определится из формулы (382)

$$f'_s = -\frac{y'}{\sin \beta} = \frac{f'_0}{\cos \beta}. \quad (385)$$

В нашем случае телецентрического хода лучей величина перефокусировки  $x'$  будет одинакова как на оси, так и на главном луче. Поэтому, определяя величину перефокусировок  $x_0$ ,  $x_s$ ,  $x_t$  на оси и на главном луче от зрачка входа (в зрачке входа все три передних фокуса  $F_0$ ,  $F_s$  и  $F_t$  предполагаются совпадающими), получим

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= -\frac{f_0'^2}{x'} \\ x_s &= -\frac{f_s'^2}{x'} = -\frac{f_0'^2}{x' \cos^2 \beta} = \frac{x_0}{\cos^2 \beta} \\ x_t &= -\frac{f_t'^2}{x'} = -\frac{f_0'^2}{x' \cos^4 \beta} = \frac{x_0}{\cos^4 \beta} \end{aligned} \right\}. \quad (386)$$

Выражая величины  $x_0$ ,  $x_s$  и  $x_t$  в диоптриях, находим:

$$L_s = \frac{1000}{x_s} = 1000 \frac{x'}{f_0'^2} \cos^2 \beta = L_0 \cos^2 \beta,$$

$$L_t = \frac{1000}{x_t} = 1000 \frac{x'}{f_0'^2} \cos^4 \beta = L_0 \cos^4 \beta.$$

В случае, если угол  $\beta$  будет равен  $45^\circ$ , то тогда

$$L_s = \frac{L_0}{2}; \quad L_t = \frac{L_0}{4}.$$

Следовательно, перефокусировка по краю поля зрения будет происходить значительно медленнее, нежели на оси; так, при перефокусировке на оси на 4 диоптрии в сагиттальной плоскости произойдет перефокусировка на 2 диоптрии, а в меридиональной всего на 1 диоптрию, в результате чего возникает астигматизм также в 1 диоптрию.

II. Величина изображения определяется зависимостью

$$y' = -f_0' \sin \beta. \quad (387)$$

Определим величину дисторсии. Относительная дисторсия

$$\Delta = \frac{y'}{y_0'} - 1 = \frac{f_0' \sin \beta}{f_0' \operatorname{tg} \beta} - 1 = \cos \beta - 1, \quad (388)$$

а для угла поля зрения  $\beta = 45^\circ$  получим

$$\Delta = 100 \left( \frac{2}{2} - 1 \right) \% = -29,29 \%.$$

Дифференцируя формулу (387), найдем меридиональное фокусное расстояние

$$f_t' = -\frac{dy'}{d\beta} = f_0' \cos \beta, \quad (389)$$

сагиттальное фокусное расстояние

$$f_s' = -\frac{y'}{\sin \beta} = f_0'. \quad (390)$$

В соответствии с этими формулами можно найти величины перефокусировок

$$L_t = \frac{L_0}{\cos^2 \beta}; \quad L_s = L_0. \quad (391)$$

Если  $\beta = 45^\circ$ , то

$$L_t = 2 L_0; \quad L_s = L_0. \quad (392)$$

Полагая перефокусировку  $L_0 = 4$  диоптриям, получаем перефокусировку  $L_t = 8$  диоптриям, а астигматизм  $L_t - L_s = 4$  диоптриям.

III. Величина изображения определяется зависимостью

$$y' = -f'_0 \beta. \quad (393)$$

При этом величина дисторсии

$$\Delta = \frac{y'}{y_0} - 1 = \frac{\beta}{\tan \beta} - 1,$$

а при  $\beta = 45^\circ$

$$\Delta = 100 \left( \frac{\pi}{4} - 1 \right) \% = -21,5 \, \%.$$

Найдем фокусные расстояния

$$f'_t = f'_0; \quad f'_s = f'_0 \frac{\beta}{\sin \beta}$$

и величины перефокусировок

$$L_t = L_0; \quad L_s = \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 L_0.$$

Полагая  $\beta' = 45^\circ$ ,  $L_0 = 4$  диоптриям,  $L_t = L_0 = 4$  диоптриям и  $L_s \approx 0,8L_0 = 3,2$  диоптрии, найдем, что численно астигматизм равен 0,8 диоптрии.

Нетрудно видеть, что последний из рассмотренных примеров наиболее выгоден для сохранения более или менее одинаковой перефокусировки в пределах всего поля зрения и может быть рекомендован при разработке широкоугольных окуляров.

Допускаемая в этом случае дисторсия окуляра может быть компенсирована дисторсией той же величины в объективной части системы.

## Глава VII

### ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЕТ ГЛАВНЕЙШИХ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### § 25. Труба Кеплера

Задача габаритного расчета трубы Кеплера, состоящей из объектива и окуляра, по своему существу сводится к определению фокусного расстояния и свободного отверстия объектива и к выбору окуляра, т. е. к определению величины окулярного поля зрения, а при уточненном расчете — к учету дисторсии окуляра. Во

многих случаях, когда кеплеровская система работает в сочетании с оборачивающими призмами, требуется определить величину параллельного габарита, в котором будут установлены призмы. Точно так же может быть задана и длина системы.

Таким образом, заданными будем считать: видимое увеличение системы  $\Gamma$ , поле зрения системы  $2\beta$ , или окулярное поле зрения  $2\beta'$  и, наконец, диаметр выходного зрачка  $2\rho'$ , или «светосилу» (квадрат диаметра выходного зрачка).

На основании (283) можно написать

$$\Gamma = \frac{1}{V} = \frac{\rho}{\rho'} = -\frac{f_1'}{f_2'} = -\frac{f_{об}'}{f_{ок}}, \quad (394)$$

откуда

$$2\rho = 2\rho'\Gamma. \quad (395)$$

Далее можно определить инвариант Лагранжа—Гельмгольца

$$J = -\rho\beta = y\alpha = y'u' = y'u'. \quad (396)$$

Задаваясь апертурой объектива  $u'$  или половиной относительного отверстия объектива  $\frac{2\rho}{f'}$ , можем определить  $y'$  — половину свободного отверстия диафрагмы в фокальной плоскости объектива.

Величина относительного отверстия обычно колеблется для объективов и окуляров от 1:4 до 1:7; относительные отверстия больше 1:4 вызывают затруднения исправления зон сферической аберрации у объективов; малые относительные отверстия (менее 1:7) приводят при больших диаметрах выходных зрачков (порядка  $2\rho' = 7$  мм) к очень длиннофокусным окулярам.

Перейдем к определению величины окулярного поля с учетом дисторсии окуляра.

В прямом ходе относительная дисторсия окуляра

$$\Delta_{ок} = \frac{y' - y_0'}{y_0'} = \frac{y'}{y_0'} - 1, \quad (397)$$

откуда

$$y' = (1 + \Delta_{ок}) y_0' \quad (398)$$

где

$$y_0' = f_{ок}' \operatorname{tg} \beta'. \quad (399)$$

В этой формуле в отличие от (294), где под  $\beta'$  условно понималось значение тангенса угла, снова вводится обозначение тангенса, так как, во-первых, в последующем нам придется определять угловую величину  $\beta'$  и, во-вторых, в (397) уже учитываем наличие дисторсии, т. е. переходим к уточненному расчету. Подставляя (399) в (398), получаем

$$y' = (1 + \Delta_{ок}) f_{ок}' \operatorname{tg} \beta'. \quad (400)$$

Заменяя в (396) значение  $\beta$  через  $\operatorname{tg} \beta$  и  $\alpha = u = \frac{\rho}{f_{об'}}$ , найдем

$$J = -\rho \operatorname{tg} \beta = (1 + \Delta_{ок}) f_{ок'} \operatorname{tg} \beta' \frac{\rho}{f_{об'}}, \quad (401)$$

откуда после сокращения на  $\rho$  и подстановки  $\frac{f_{ок'}}{f_{об'}} = -\frac{1}{\Gamma}$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 + \Delta_{ок}}{\Gamma} \operatorname{tg} \beta'. \quad (402)$$

Окончательно формулу, по которой можно определять окулярное поле зрения или поле зрения системы с учетом дисторсии окуляра, получим в виде

$$\frac{\Gamma}{1 + \Delta_{ок}} = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (403)$$

Величина окулярного поля, с применением обычных окуляров, не должна превышать  $2\beta' = 45 - 50^\circ$ ; дисторсия таких окуляров обычно отрицательна и составляет около 5%; при окулярах типа Эрфле поле зрения может достигать до  $65 - 70^\circ$  при отрицательной дисторсии порядка 10—15%.

Для дисторсии телескопической системы имеем

$$\Delta = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma \operatorname{tg} \beta} - 1. \quad (404)$$

Исключая из (403) и (404) величину  $\frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma \operatorname{tg} \beta}$ , находим

$$1 + \Delta = \frac{1}{1 + \Delta_{ок}} \approx 1 - \Delta_{ок}, \quad (405)$$

откуда следует, что в первом приближении относительная дисторсия всей системы равна относительной дисторсии окуляра с обратным знаком.

Расчеты длины параллельного габарита были приведены в § 20; получение же заданной длины системы легко обеспечивается выполнением условия

$$L = f_{об'} + k f_{ок'} = (\Gamma + k) f_{ок'}, \quad (406)$$

где  $k$  — отношение длины окуляра к его фокусному расстоянию.

## § 26. Труба Галилея

Габаритный расчет трубы Галилея (галилеевского бинокля), имеющий целью получение заданного увеличения поля зрения и светосилы, сильно ограничен габаритными условиями: свободным отверстием объектива и удалением выходного зрачка. Возможная величина свободного отверстия объектива в галилеевских бинок-

лях зависит от величины глазного базиса (65 мм) и не должна превышать 50, в крайнем случае 55—60 мм. Удаление выходного зрачка, т. е. входного зрачка глаза, от последней поверхности бинокля не должно быть меньше 8—10 мм. Соблюдение этих двух условий сильно ограничивает возможности бинокля Галилея не только в части габаритного и абберационного расчетов, но и в части получения нужного увеличения и поля зрения. Габаритный расчет галилеевской системы ввиду того, что она состоит всего из двух тонких компонентов, удобнее всего сразу вести в общем виде. На рис. 66:  $\varphi_1$  — объектив со свободным диаметром  $2h_1$ ;  $d$  — расстояние между объективом и отрицательным окуляром;  $\beta_1$  — угол, под которым главный луч входит в край объектива;  $h_2$  — высота главного луча, на которой он встречается вторую линзу после объектива;  $s'$  — расстояние от второй линзы до точки пересечения главного луча с осью системы.

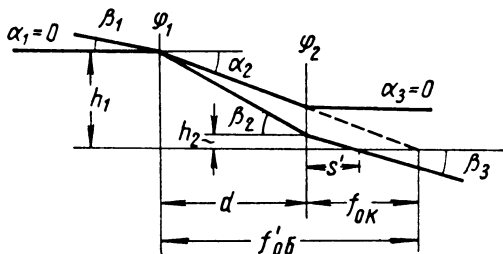


Рис. 66

По формулам (56), если применить их к главному лучу, можно определить отрезок

$$s_2' = \frac{h_2}{\beta_3}, \quad (407)$$

а по формуле (33) — отрезок

$$s_2' = \frac{h_1 - \beta_2 d}{\beta_3} = \frac{h_1}{\beta_3} - \left( \beta_1 - \frac{h_1}{f_1'} \right) \frac{d}{\beta_3}. \quad (408)$$

Группируя члены, содержащие  $h_1$ , найдем

$$s_2' = \frac{h_1}{\beta_3} \left( 1 - \frac{d}{f_1'} \right) - \frac{\beta_1}{\beta_3} d, \quad (409)$$

но так как  $\frac{\beta_1}{\beta_3} = \frac{1}{\Gamma}$ , а величина  $1 - \frac{d}{f_1'}$  может быть представлена

$$1 - \frac{d}{f_1'} = \frac{f_1' - d}{f_1'} = \frac{f_2'}{f_1'} = \frac{1}{\Gamma}, \quad (410)$$

то, умножая (409) на  $\Gamma$ , находим

$$s_2' \Gamma = \frac{h_1}{\beta_3} - d = \frac{2h_1}{2\beta_3} - d. \quad (411)$$

Формула (411) связывает между собой отрезок до выходного зрачка, увеличение, длину системы и отношение свободного от-

верстия объектива к максимальному окулярному полю зрения. Из выведенной формулы можно сразу же сделать следующие выводы:

1. При изменении свободного отверстия галилеевской системы пропорционально изменятся окулярное поле зрения и, как следствие, поле зрения всей системы.

2. При сохранении свободного отверстия, окулярного поля зрения и длины системы отрезок  $s_2'$  до зрачка выхода изменяется обратно пропорционально увеличению  $\Gamma$ .

3. Для получения отрезка  $s_2'$  положительным необходимо, чтобы произведение длины системы на окулярное поле зрения было меньше свободного отверстия объектива.

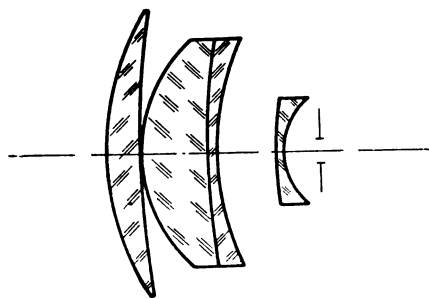


Рис. 67

Полагая наименьшее возможное значение  $d$  равным  $2h_1$  и отрезок  $s_2'$  равным нулю, получаем предельное значение величины окулярного поля зрения  $2\beta' = 1$ , т. е.  $\beta' = 0,5$ , откуда  $\beta'$  в угловой мере будет равно  $\arctg 0,5 = 26^\circ 30'$ . Таким образом, окулярное поле зрения в пределе могло быть равным  $2\beta' = 53^\circ$ , т. е. почти таким же, как и у кеплеровских систем с окулярами обычного типа. Следует сейчас

же заметить, что если окулярное поле  $2\beta'$  порядка  $40-45^\circ$  при практически приемлемом значении отрезка  $s_2'$ , то требуется применять объективы усложненного типа (трехлинзовый объектив из отдельно стоящей положительной линзы и склеенной линзы из двух стекол). В качестве примера приведем данные укороченного бинокля Рора с двукратным увеличением (рис. 67) и полем зрения  $2\beta = 20^\circ$  (окулярное поле зрения  $2\beta' = 40^\circ$ ).

$$r_1 = 48,0 \text{ мм}$$

$$r_2 = 156,5 \text{ „} \quad d_1 = 5,0 \text{ мм} \quad n_2 = 1,5163 \quad \nu_2 = 64,0$$

$$r_3 = 25,0 \text{ „} \quad d_2 = 0,0 \text{ „} \quad n_2 = 1,0$$

$$r_4 = 120,0 \text{ „} \quad d_3 = 11,0 \text{ „} \quad n_4 = 1,6099 \quad \nu_4 = 58,9$$

$$r_5 = 44,7 \text{ „} \quad d_4 = 1,0 \text{ „} \quad n_5 = 1,6103 \quad \nu_5 = 37,2$$

$$r_6 = 66,5 \text{ „} \quad d_5 = 9,8 \text{ „} \quad n_6 = 1,0$$

$$r_7 = 11,5 \text{ „} \quad d_6 = 1,0 \text{ „} \quad n_7 = 1,5825 \quad \nu_7 = 46,4$$

Длина бинокля  $\Sigma d = 27,8 \text{ мм}$ .

## § 27. Телескопическая система с одной оборачивающей системой

Задача получения прямого изображения в совокупности с необходимостью удаления наблюдателя от места положения входного зрачка в ряде случаев успешно решается установкой в кеплеровскую трубу между объективом и окуляром линзовой оборачивающей системы. Телескопические системы такого рода обычно не обладают большими видимыми увеличениями (более  $2-4\times$ ); наоборот, довольно часто встречаются увеличения, близкие или равные единице. В таких трубах большое значение приобретает величина поля зрения; кроме того, фокальные плоскости объектива и окуляра весьма часто используются для размещения как неподвижных, так и перемещающихся сеток (прицельные шкалы, уровни, стабилизированные сетки); подобные системы часто работают с тем или иным визирным устройством в виде подвижных призм (авиационные и морские прицелы, танковая панорама и т. п.).

Длина подобных труб обычно колеблется от 600 до 1000—1200 мм, свободный диаметр оптики — от 35 до 50 мм. Окулярное поле зрения довольно часто достигает  $65-70^\circ$  (с применением окуляров типа Эрфле). В некоторых случаях встречается необходимость размещения призм или систем зеркал внутри трубы (призмы Дове в панорамических прицелах, призмы для излома оси у окуляра). Перейдем к рассмотрению габаритного расчета подобной оптической системы.

Будем полагать заданными увеличение, поле зрения (объектива и окуляра), диаметр выходного зрачка и виньетирование на выходном зрачке.

Величина окулярного поля (как об этом уже упоминалось в § 25) определяет тип окуляра и, следовательно, его дисторсию; в силу этого дисторсию окуляра можно считать известной. В зависимости от увеличения всей системы  $\Gamma$  может быть наложено условие степени исправления дисторсии всей системы. Действительно, при увеличении  $\Gamma = 1$  наша система может быть выполнена строго симметричной; совершенно очевидно, что в таком случае дисторсия в силу симметрии системы будет отсутствовать (так как всегда  $\beta = \beta'$ ); точно так же будет отсутствовать и кома.

При малых увеличениях объективное поле зрения будет несколько меньшим, нежели окулярное, однако величина объективного поля может быть еще достаточно велика, а потому дисторсия объектива может быть получена равной дисторсии окуляра. Если при этом обратная система свободна от дисторсии (что может быть обеспечено симметрией обратной системы — соответствующей ее наивыгоднейшим габаритам), то тогда и вся система получится также свободной от дисторсии.

При больших увеличениях поле зрения объектива, очевидно, будет мало; дисторсия объектива в силу этого также будет мала и



потому довести ее до величины дисторсии окуляра, не прибегая к каким-либо искусственным приемам, не представится возможным. Вследствие этого исправление дисторсии для всей системы при больших увеличениях будет представлять большие затруднения. Считая, таким образом, объектив и обратную систему свободными от дисторсии, можно полагать, что дисторсия всей системы при больших увеличениях будет определяться величиной дисторсии окуляра.

Поэтому при малых увеличениях можно полагать дисторсию всей системы уничтоженной; тогда поля зрения объектива и окуляра будут связаны формулой (324), а виньетирование на входном зрачке будет определяться формулой (328).

Таким образом, будем иметь:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{1}{V} = \frac{\rho_0}{\rho'_0}, \quad (324)$$

$$V_t = \frac{\rho'_t}{\rho_t} = V_0 \frac{\cos^3 \beta}{\cos^3 \beta'}, \quad (328)$$

и виньетирование

$$\rho(\beta) = \frac{\rho_t}{\rho_0} \quad (412)$$

и

$$\rho'(\beta') = \frac{\rho'_t}{\rho'_0}. \quad (413)$$

Между линзами обратной системы, как правило, делают параллельный ход лучей; при этом фокусные расстояния обратных линз будут значительно большими, чем фокусные расстояния объектива и окуляра.

Поэтому, разделяя рассматриваемую систему на две составляющие телескопические системы кеплеровского типа, получим увеличения этих составляющих систем, существенно отличными от единицы. Совершенно очевидно, что обратные линзы, играющие роль объективов в составляющих системах, будут практически свободными от дисторсии; таким образом, дисторсия составляющих систем будет целиком обусловлена дисторсией выбранного окуляра.

Случаи же расчета простой кеплеровской трубы, с учетом дисторсии окуляра, уже были рассмотрены нами ранее (§ 25).

Однако тогда полагали увеличение кеплеровской трубы заданным; в рассматриваемом же случае хотя увеличения обеих составляющих систем и связаны одно с другим через увеличение всей системы в совокупности, но тем не менее имеем свободу выбора увеличения для одной из составляющих труб.

Совершенно очевидно, что величина увеличений составляющих грубо определит собою габариты (длину и диаметр) всей системы.

Полагая один из этих элементов, например длину всей системы, заданным, можем определить увеличения составляющих систем.

Таким образом, представляется возможным получить универсальные формулы для расчета оптической трубы с линзовой оборачивающей системой.

Практически, однако, такой подход к решению поставленной задачи представляется не совсем удачным; в подавляющем большинстве случаев значительно выгоднее прибегнуть к методу последовательных приближений путем ряда проб.

Руководствуясь этими соображениями, процесс габаритного расчета трубы с линзовой оборачивающей системой наиболее удобно выполнять в такой последовательности:

1. Имея заданными общее увеличение всей системы  $\Gamma$ , поле зрения  $2\beta$  и диаметр выходного зрачка  $2\rho'$ , по формулам (324), (328), (412) и (413) можно определить окулярное поле зрения  $2\beta'$ , диаметр зрачка входа  $2\rho$  и виньетирование  $\rho(\beta)$  и  $\rho'(\beta')$  на входном и выходном зрачках.

2. Руководствуясь удалением выходного зрачка, допустимым относительным отверстием и полем зрения, выбираем тип окуляра и его фокусное расстояние.

При этом, очевидно, можно считать установленными величины дисторсии окуляра и объектива, а также диаметра изображения в фокальной плоскости окуляра.

3. Полагая в первом приближении, что оборачивающая система симметрична и имеет увеличение  $V = -1$ , без особых затруднений можно определить фокусное расстояние объектива по формуле

$$f_{об}' = \Gamma f_{ок}'. \quad (414)$$

Зная фокусное расстояние, можем выбрать тип объектива и определить его размеры, в том числе и длину объектива. Фокусное расстояние и тип окуляра были установлены ранее, поэтому можно считать известной и длину окуляра. Имея заданной длину всей системы и вычитая из нее длину объектива и окуляра, можем определить длину оборачивающей системы.

В первом приближении длину оборачивающей системы можно принять равной утроенному фокусному расстоянию оборачивающих линз, а если известны относительные отверстия объектива и окуляра, можно установить и диаметры линз оборотной системы (рис. 68):

$$2\rho_c = \Gamma_{II} 2\rho' = \frac{f_{II}'}{f_{ок}'} 2\rho', \quad (415)$$

$$2\rho_c \approx \frac{L}{3f_{ок}'} 2\rho'. \quad (416)$$

4. Полученные таким образом диаметры оборотных линз будут или больше, или меньше диаметра изображения в фокальных плоскостях объектива и окуляра. Рассмотрим оба случая.

а. Диаметры оборотных линз больше диаметра изображения в фокальных плоскостях объектива и окуляра (рис. 69). В этом случае можем сделать следующие замечания.

Во-первых, если диаметры оборотных линз незначительно превосходят диаметры изображения, то тогда, имея в виду, что диа-

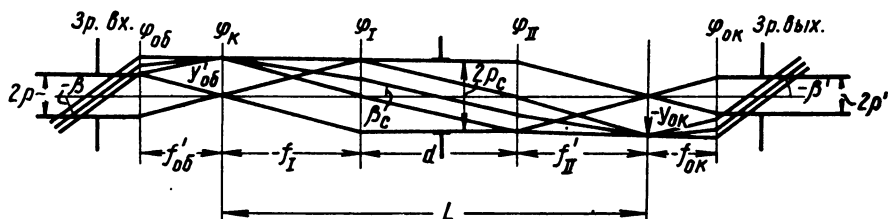


Рис. 68

метры линз объектива и окуляра могут оказаться также несколько большими диаметров изображений, представляется вполне возможным сохранить габариты оборотной системы такими, какими они получились в первом приближении.

В другом случае, когда диаметры линз существенно превосходят диаметры изображений, представляется возможным, увеличивая расстояние между оборотными линзами и соответственно

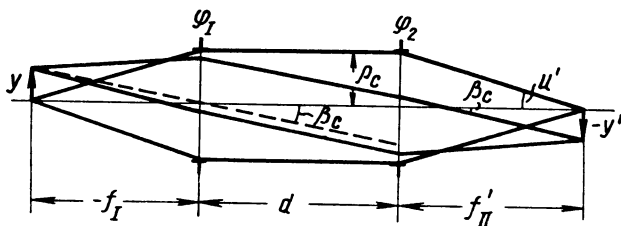


Рис. 69

уменьшая фокусные расстояния оборотных линз, добиться известного уменьшения диаметров оборотных линз (рис. 69).

В большинстве случаев, рассматривая заднюю оборотную линзу совместно с окуляром (как это делали ранее) в качестве самостоятельной телескопической системы, будем иметь видимое увеличение  $\Gamma_{II} = \frac{f_{II'}}{f_{ок}}$ , такой системы значительно большим единицы (по абсолютной величине).

Следовательно (как уже упоминалось об этом), подобная составляющая системы не будет исправлена на дисторсию (исключая специальные случаи). Имея в виду обычные величины дистор-

сии у окуляров, можно принять, что дисторсия такой составляющей системы будет удовлетворять условию синусов в зрачках, т. е. постоянству увеличения в зрачках или, что то же, постоянству виньетирования.

Руководствуясь этим допущением, полагаем заданным величину виньетирования на выходном зрачке. Таким образом можно получить все исходные данные для отыскания наименьших возможных диаметров линз оборотной системы.

Однако, как уже говорилось, практически нецелесообразно связывать все перечисленные выше величины единой формулой, хотя уже по одному тому, что наше предположение о соблюдении условия синусов в зрачках составляющих систем вследствие наличия дисторсии у окуляра и объектива будет выполнено неточно. Поэтому изберем путь произвольного изменения фокусного расстояния линз оборотной системы, нахождения по этим фокусным расстояниям диаметров линз и последующего определения виньетирования, причем последнее при известной дисторсии окуляра и объектива позволит нам с большей точностью вычислить значения виньетирования на входном и выходном зрачках.

Следуя по этому пути, расстояние между линзами оборотной системы вычислим по формуле

$$d = L - 2f_{II}', \quad (417)$$

где  $L$  — длина оборотной системы.

Диаметр оборотных линз определяют по формулам (416), поле зрения  $2\beta_c$  между линзами оборотной системы, исходя из предположения ортоскопичности (ввиду малости поля зрения между оборотными линзами) оборотных линз, — по формуле

$$\operatorname{tg} \beta_c = \frac{y'}{f_{II}'}, \quad (418)$$

а виньетирование между линзами оборотной системы — по формуле

$$\rho_c(\beta_c) = \frac{2\rho_{te}}{2\rho_{oc}} = 1 - \operatorname{tg} \beta_c d, \quad (419)$$

причем значение  $\operatorname{tg} \beta_c$  берется положительным.

Виньетирование же на выходном зрачке

$$\rho'(\beta') = \frac{\rho_t'}{\rho_o'} = \frac{\rho_t'}{\rho_t} \cdot \frac{\rho_t}{\rho_o} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_o'} = \frac{V_t}{V_o} \rho_c(\beta_c) = V_t \Gamma_{II} \rho_c(\beta_c). \quad (420)$$

Вычисление величины  $V_t$  по известной дисторсии системы рассмотрим несколько позже.

6. Диаметры оборотных линз, определенные по формулам (415) и (416), меньше диаметра изображения в фокальной плоскости объектива и окуляра.

В этом случае диаметры линз, вычисленные по формуле (416), в действительности будут занижены; поэтому необходимо перейти

к определению их, исходя из величины допустимого виньетирования и поля зрения между линзами оборотной системы (рис. 70). Из рис. 70 следует

$$2h = 2H + 2\rho_t = 2 \frac{d}{2} \operatorname{tg} \beta_c + 2\rho_c(\beta_c)\rho_0 = \operatorname{tg} \beta_c d + 2\rho_0\rho_c(\beta_c) = \\ = \frac{y}{f_{II'}} d + 2\rho_0\rho_c(\beta_c). \quad (421)$$

Если  $d = f_{II'}$  и  $\rho_c(\beta_c) = 0,5$ , диаметр оборотных линз определяется по формуле

$$2h = y + \rho_0. \quad (422)$$

Совершенно очевидно, что если  $2y > 2\rho_0$ , то

$$2h = y + \rho_0 > 2\rho_0, \quad (423)$$

а диаметры оборотных линз следует увеличить.

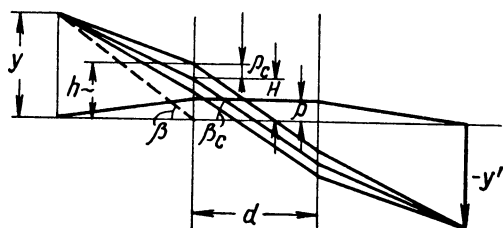


Рис. 70

Однако увеличенные диаметры оборотных линз будут все же меньше диаметров изображений; поэтому в большинстве случаев величины диаметров оборотных линз не окажут влияния на общие габариты системы.

Заметим, что при отыскании наименьших диаметров оборотных линз

представляется возможным, сохраняя длину оборотной системы, несколько уменьшать промежуток между оборотными линзами и соответственно увеличивать фокусные расстояния самих линз. В этом случае нам надлежит, конечно, пользоваться исходной формулой (421). Однако фокусное расстояние окуляра и объектива (если это допустимо по конструктивным и абберационным данным его) можно уменьшить, а следовательно, соответственно уменьшить и габаритный диаметр всей системы, хотя длина и диаметры оборотных линз при этом несколько увеличатся.

Необходимо подчеркнуть, что составление габаритов и расчет коротких телескопических систем часто может оказаться достаточно трудной задачей, в особенности если иметь в виду затруднения при абберационных расчетах, возникающие в основном при исправлении астигматизма и кривизны поля. В этих случаях представляется целесообразным заменять оборачивающую систему из двух пар склеенных линз каким-либо фотообъективом (например, триплетом). Поэтому габаритные расчеты коротких телескопических систем следует выполнять одновременно с габаритным абберационным расчетом (см. § 24).

Чтобы найти величину поля зрения всей телескопической системы, обладающей большим увеличением, необходимо, как это уже делалось при расчете габаритов кеплеровской трубы, учитывать дисторсию окуляра (402). Вместе с тем объектив системы можно осуществить в значительно более простой конструкции, чем окуляр (например, простая склеенная линза или две пары склеенных линз); это обстоятельство необходимо учитывать и использовать при составлении габаритов, осуществляя, например, равенство диаметров объектива, изображения после объектива и линз оборотной системы.

В случае применения сложных широкоугольных окуляров (например, типа Эрфле) диаметры линз окуляра будут больше диаметров изображения в фокальной плоскости окуляра.

Поэтому, принимая диаметры линз окуляра равными диаметру объектива и линз оборотной системы, приходится соответственно уменьшать диаметр изображения в фокальной плоскости окуляра.

Совершенно очевидно, что оборотная система при этом имеет увеличение, меньшее единицы (по абсолютной величине) и равно отношению диаметра изображения в фокальной плоскости окуляра и диаметру линз окуляра.

Исходя из этих соображений, нетрудно определить все необходимые нам основные величины.

1. Видимое увеличение  $\Gamma_{II}$  телескопической системы, составленной второй оборотной линзой в совокупности с окуляром,

$$\Gamma_{II} = \frac{f_{II}'}{f_{ок}} = \frac{2\rho_c}{2\rho'} = \frac{2a'}{2\rho'}, \quad (424)$$

так как по условию диаметр оборотной линзы  $2\rho_c$  должен быть равен диаметру линз окуляра  $2a'$ .

Из (424), а также зная или задаваясь  $f_{ок}'$  окуляра, нетрудно определить фокусное расстояние  $f_{II}'$  второй оборотной линзы.

2. Увеличение  $V$  оборотной системы, как уже говорилось, определится соотношением

$$V = \frac{2y'}{2a} = -\frac{f_{II}'}{f_I'}, \quad (425)$$

где  $2y'$  — диаметр изображения в фокальной плоскости окуляра. Из (425) нетрудно определить фокусное расстояние первой оборотной линзы. При 50-процентном виньетировании фокусное расстояние первой линзы равно расстоянию между оборотными линзами. На основании общей формулы

$$\Gamma = \Gamma_I \Gamma_{II} \quad (426)$$

можно определить увеличение  $\Gamma$ , телескопической системы, составленной из объектива и первой оборотной линзы.

Фокусное расстояние объектива можно определить или через увеличение  $\Gamma_1 = \frac{f'_{об}}{f'_1}$ , или из формулы

$$\Gamma = \frac{-f'_{об}}{f'_{ок}} V. \quad (427)$$

Заметим, что все эти выводы относятся к случаю, когда коллектив между объективом и первой оборотной линзой размещается в фокальной плоскости объектива; в случае применения внефокального коллектива фокусное расстояние объектива и первой оборотной линзы несколько изменится. Подробно о расчете габаритов при внефокусном коллективе излагалось в § 22.

## § 28. Перископ

Габаритный расчет оптической системы сухопутных перископов, имеющих одну оборотную систему, может быть без особых затруднений выполнен на основании материалов предыдущего параграфа; поэтому сразу же перейдем к рассмотрению габаритного расчета морских перископов, имеющих по три оборотные системы и характерно отличающихся от сухопутных перископов наличием тонкой головной части, большой длиной и наличием переменного увеличения.

Вопросы габаритного расчета систем переменного увеличения будут детально рассмотрены в следующей главе; в этом параграфе ограничимся лишь упоминанием, что необходимым условием получения наивыгоднейших габаритов всей системы является размещение системы переменного увеличения впереди всей системы перископа.

При смене увеличений необходимым условием получения наивыгоднейших габаритов является также условие сохранения одинакового окулярного поля зрения и одинаковых выходных зрачков при обоих увеличениях.

Полагая в первом приближении оптическую систему перископа свободной от дисторсии, получим, что оба увеличения перископа, поля зрения и входные зрачки должны быть связаны соотношением, согласно инварианту Лагранжа — Гельмгольца

$$\rho_1 \operatorname{tg} \beta_1 = \rho_{II} \operatorname{tg} \beta_{II} = \rho' \operatorname{tg} \beta', \quad (428)$$

причем видимые увеличения перископа

$$\Gamma_1 = \frac{\rho_1}{\rho'}; \quad \Gamma_{II} = \frac{\rho_{II}}{\rho'}. \quad (429)$$

При габаритном расчете перископа нам могут быть заданы некоторые исходные величины, как длина перископа, диаметр узкой части перископа и ее длина, диаметр широкой части. Необходимо заметить, что все эти величины тесно связаны между собой и с величиной оптических характеристик всего перископа.

Поэтому всегда возможен случай, когда задание тех или иных величин предопределяет собой значения остальных величин, характеризующих оптическую систему перископа.

Предположим, что задан диаметр узкой части перископа и что система переменного увеличения целиком размещена в этой узкой части.

Тогда, отделяя систему переменного увеличения от всего перископа, приходим снова к некоторому новому перископу, но обладающему уже только одним увеличением  $\Gamma_2$ ; величина этого увеличения может быть определена, исходя из предположения, что диаметр входного зрачка этого нового перископа равен диаметру узкой части перископа. Таким образом,

$$\Gamma_2 = \frac{2\rho}{2\rho'}, \quad (430)$$

где  $2\rho$  — диаметр узкой части перископа, нередко равный наибольшему из обоих входных зрачков всего перископа  $2\rho_1'$ .

Зная величину диаметра входного зрачка перископа без системы переменного увеличения, нетрудно определить, исходя из инварианта Лагранжа — Гельмгольца, поле зрения после системы переменного увеличения

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\Gamma_2}. \quad (431)$$

Проследим переход от узкой части перископа к широкой. Этот переход может быть осуществлен тремя различными способами.

Перейдем к определению длины конической части перископа во всех трех намеченных случаях.

**Первый случай**, когда коническая часть начинается после изображения. На рис. 71, а:  $2\rho$  — диаметр узкой части;  $2h_2$  — диаметр широкой части;  $2\beta$  — поле зрения после системы переменного увеличения;  $f_1'$  — фокусное расстояние линзы перед изображением;  $-f_2 = L$  — фокусное расстояние линзы, располагающейся уже в широкой части перископа.

Полагая диаметр изображения  $2y_1'$  равным диаметру зрачка входа перископа без системы переменного увеличения, легко находим фокусное расстояние первой линзы

$$f_1' = -\frac{y_1'}{\operatorname{tg} \beta} = -\frac{y_1'}{\operatorname{tg} \beta'} \Gamma = -\frac{y_1' \rho}{\rho' \operatorname{tg} \beta'} = -\frac{\rho^2}{J}. \quad (432)$$

Фокусное расстояние второй линзы, равное длине переходной части перископа, легко определить, если воспользоваться рисунком, т. е.

$$L = -f_2 = f_1' \frac{h_2}{\rho} = -\frac{\rho h_2}{J}. \quad (433)$$



Второй случай, когда коническая часть начинается после параллельного хода. На рис. 71, б в отличие от предыдущего диаметр изображения после первой линзы равен диаметру широкой части; длина переходной конической части  $L$  равна фо-

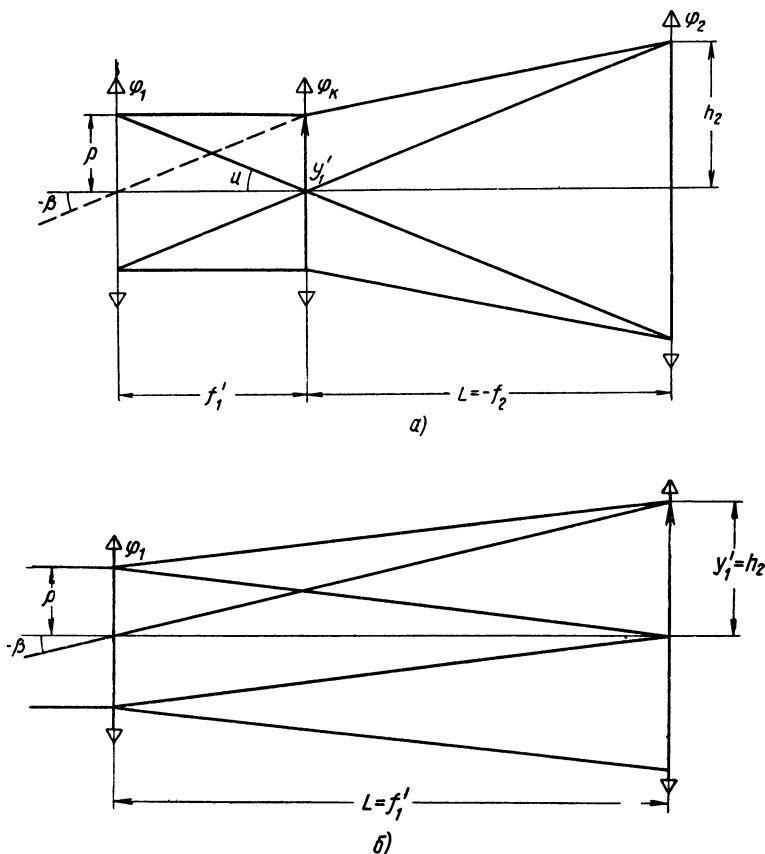


Рис. 71

кусному расстоянию первой линзы. Определяя это фокусное расстояние находим

$$L = f'_1 = -\frac{y'_1}{\operatorname{tg} \beta} = -\frac{h_2}{\operatorname{tg} \beta} = -\frac{h_2 \Gamma_2}{\operatorname{tg} \beta'} = -\frac{\rho h_2}{\rho' \operatorname{tg} \beta'} \quad (434)$$

и, пользуясь формулами (430), (431) и (401), получаем

$$L = -\frac{\rho h_2}{J}. \quad (435)$$

Таким образом, в двух первых случаях длина переходной конической части системы оказывается совершенно одинаковой.

Третий случай, когда коническая часть начинается в начале параллельного хода. Из рис. 71, в длина конической части

$$L = - \frac{(h_2 - \rho)}{\operatorname{tg} \beta} = - \frac{\rho h_2}{J} + \frac{\rho}{\operatorname{tg} \beta} . \quad (436)$$

Нетрудно видеть, что она не равна длине переходной части в обоих ранее рассмотренных случаях; однако в этом последнем случае длина конической части, как это видно из рис. 71, в, будет укорочена на величину фокусного расстояния первой линзы.

## § 29. Габаритная схема оптики стереокомпаратора с параллельным ходом переменной длины

В качестве еще одного примера рассмотрим составление габаритной схемы оптики стереокомпаратора.

Будем полагать заданными: увеличение  $\Gamma$ , линейное поле зрения  $2y$  (или окулярное поле зрения  $\rho'$  — в соответствии с выбором конструкции окуляра), диаметр зрачка выхода, изменение длины параллельного хода, величину базиса прибора, величину глазного базиса и угол наклона осей окуляров к горизонтальной плоскости.

В рассматриваемом примере, кроме определения основных габаритов оптической системы, продумаем, пользуясь набором объективов и окуляров, подбор линз и определение величин аберраций, опираясь на приемы суммирования аберраций, рассмотренные в § 24.

Примем следующие значения исходных величин: увеличение  $\Gamma = 5\times$ , при котором фокусное расстояние всей системы

$$f' = \frac{250}{\Gamma} = 50 \text{ мм},$$

линейное поле зрения  $2y = 40 \text{ мм}$ .

Взяв отношение величины объекта к фокусному расстоянию всей системы

$$\frac{y}{f'} = \frac{20}{50} = 0,4 = \operatorname{tg} \beta',$$

находим величину окулярного поля, равную  $2\beta' = 44^\circ$ .

Обращаясь к набору окуляров, видим, что без учета дисторсии можно воспользоваться окулярами типа Кельнера, обладающими полем зрения  $2\beta' \approx 47^\circ$ . Оценивая более точно отношения реальной величины изображения окуляра (с учетом дисторсии), видим, что и в этом случае окуляры Кельнера дают отношение  $\frac{y'}{f_0'} \geq \frac{10,22}{25} > 0,4$ . На этом основании габаритный расчет всей предшествующей окуляру части системы можно осуществить без учета дисторсии окуляра.

Далее примем, что диаметр зрачка выхода равен 4 мм; величина изменения параллельного хода — 200 мм (исходя из того, что сторона аэроснимка равна 180 мм), значение базиса —  $\approx 360$  мм (также исходя из размеров аэроснимка), величина глазного базиса равна нормальной, т. е. 65 мм, и угол наклона осей окуляров к горизонту равен  $45^\circ$ , а высота  $h$  оптической системы над плоскостью снимка, вообще говоря, может быть произвольной. Однако ориентировочно эту величину примем равной 100 мм (с учетом конструктивной схемы прибора).

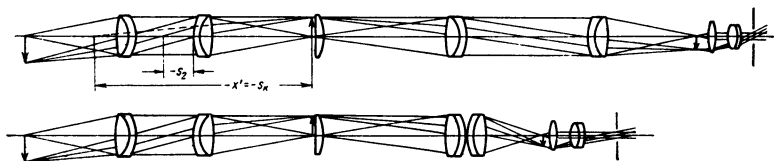


Рис. 72

Общую оптическую схему прибора выберем в соответствии с рис. 72.

На рис. 73 схема оптики стереокомпаратора представлена в перспективе. Эта схема (рис. 73, а) возникает из следующих соображений:

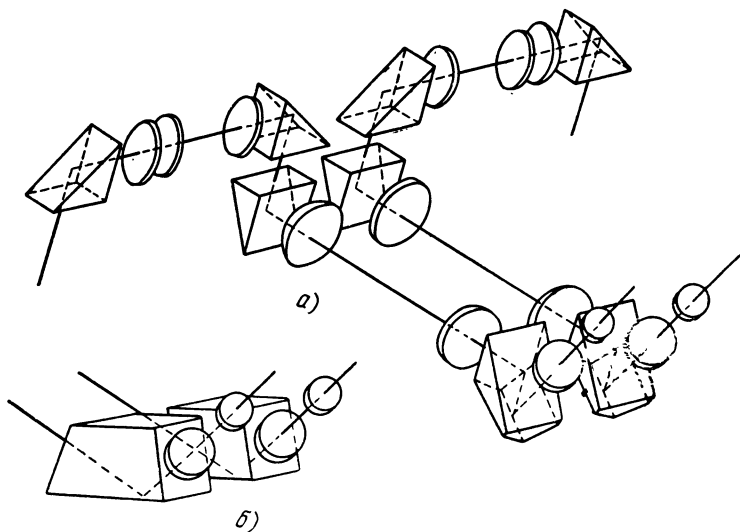


Рис. 73

1. Изображение предмета должно быть совмещено с маркой; поэтому после объектива (оборачивающей системы) устанавливают коллектив, совмещенный с изображением, на одну из поверхностей которого наносят измерительную марку.

Принципиально марку можно было бы поместить непосредственно перед коллективом окуляра, но это привело бы к значительному увеличению габаритов, и, кроме того, ошибки, возникающие при движении передней части системы, могли бы понизить точность измерений.

2. Вследствие этого после I системы ставят II оборачивающую систему, в параллельном ходе которой и будет осуществляться раздвижка.

3. Две последовательно расположенные оборачивающие системы дают прямое изображение; поэтому и призмы также должны будут давать прямое изображение. Представленная на схеме система призм решает эту задачу. Однако эта задача могла бы быть решена и другой системой призм, представленной на рис. 73, б, в которой вместо призм с крышей применена призма с одним отражением.

Но эта вторая схема, хотя и более простая, требует дополнительного устройства — ромбических призм — для изменения расстояния между окулярами, тогда как в первой схеме эта задача могла быть решена путем поступательной подвижки призм с крышей с половинной скоростью.

Определим величину инварианта Лагранжа — Гельмгольца. Величина  $y$  нам известна; величина первого апертурного угла определится через отношение радиуса зрачка выхода к фокусному расстоянию всей системы.

Находим

$$J = uy = y \frac{\rho'}{f'} = 20 \frac{2}{50} = 20 \cdot 0,04 = 0,8 = \rho\beta.$$

Принимая расстояние между оборачивающими линзами равным максимальной раздвижке  $L = 200$  мм и допустимое виньетирование 50%, можем определить величину полевого угла в параллельном ходе II оборачивающей системы согласно формуле (310), где  $2\rho\beta$  будет равно  $\rho_0$ . Находим

$$\beta_2 = -\frac{\rho_0}{d} = \frac{J}{\rho_0},$$

а численно

$$\rho_0 = \sqrt{Jd} = \sqrt{0,8 \cdot 200} = \sqrt{160} = 4\sqrt{10} = 12,64,$$

$$\beta_2 = \frac{0,8}{12,64} \approx 0,0633.$$

Таким образом, диаметр линз  $2\rho_0$  II оборотной системы можно принять равным 25 мм.

У нас имеется некоторая свобода в выборе фокусных расстояний линз II оборачивающей системы. В частности, можно было бы принять фокусные расстояния этих линз равными длине параллельного хода; тогда диаметр изображения до и после оборотной системы был бы равен диаметру линз оборотной системы (26 мм).

Но более целесообразно выбрать диаметр изображения, согласовав его с каким-либо кратным фокусным расстоянием окуляра. Наиболее распространены окуляры с фокусным расстоянием в 25 мм, при котором диаметр изображения  $2y' = 20$  мм.

Тогда фокусное расстояние линз будет равно

$$f' = \frac{10}{0.063} = 158,0 \text{ мм.}$$

Приняв фокусное расстояние окуляра равным 25 мм и увеличение II оборотной системы равным  $-1$ , определим, что увеличение I оборотной системы равно  $-1/2$  при диаметре изображения  $2y' = 20$  мм.

Зная величину  $H$  и длину базиса, можем установить длину I оборотной системы в 150—200 мм.

Чтобы разместить все линзы I оборотной системы и коллектив на одной горизонтальной оси, необходимо принять фокусное расстояние первой линзы равным 100—120 мм; тогда фокусное расстояние второй линзы получится равным 50—60 мм.

В I оборотной системе вынуждены стараться уменьшить расстояние между линзами; принимая вынос зрачка равным  $\frac{f'}{5}$ , получаем для этого расстояния величину 30—36 мм, а длину всей оборотной системы 180—216 мм, что будет вполне приемлемо, так как мы сможем разместить на горизонтальном участке базиса около  $\approx 30$  мм из фокусного расстояния первой линзы II оборотной системы.

После определения фокусных расстояний линз обеих оборачивающих систем определим фокусное расстояние коллектива. Исходя из отрезка  $s_2$  до зрачка второй линзы в I оборачивающей системе, находим расстояние  $x$  зрачка от переднего фокуса этой линзы; оно будет равно

$$x = s_2 - f = 0.2f - f = -0.8f.$$

Величина  $x'$  определится по формуле Ньютона

$$x' = \frac{ff'}{x} = -\frac{ff'}{0.8f} = -1,25f' = s_k = -75.$$

Аналогичным путем, исходя из того, что вынос зрачка равен 100 мм, после первой линзы II оборачивающей системы найдем отрезок

$$x = \frac{ff'}{x'} = \frac{ff'}{s' - f'} = \frac{-160 \cdot 160}{100 - 160} = 427 \text{ мм} = s_k'.$$

Найденные отрезки  $x_2'$  и  $x_3$  можем рассматривать как отрезки  $s_k$  и  $s_k'$  от коллектива до зрачков. Силу коллектива легко определить по формуле

$$\varphi_k = \frac{1}{s_k'} - \frac{1}{s_k} = \frac{1}{427} + \frac{1}{75} \approx 0,0156.$$

Перейдем к подбору линз для оптической системы стереокомпаратора.

Здесь нам будет необходимо принять во внимание, что вторая зрительная труба, составленная из второй линзы II оборачивающей системы и окуляра, при изменении расстояния между линзами II оборотной системы будет работать с переменным положением входного зрачка.

В силу этого представляется целесообразным осуществить самостоятельное исправление аберраций передней части системы и II телескопической системы.

Выбрав для первой оборачивающей системы линзы с одинаковым выносом зрачка и одинаковым исходным исправлением аберраций, автоматически обеспечим частичное устранение комы; выбрав одновременно для первой линзы II оборачивающей системы линзу, исправленную на кому, обеспечим частичное исправление комы для всей передней части системы.

Однако, уничтожая кому в первой линзе II оборачивающей системы, мы уже не сможем уничтожить ее астигматизм, поэтому его нужно будет компенсировать переисправленным астигматизмом в I оборачивающей системе.

Руководствуясь этими соображениями, из набора объективов выбираем исходные элементы следующих линз;

Для I линзы II оборачивающей системы

$$Q = 4,77; \quad c = 0,00; \quad (\text{стр. 344})$$

$$r_1 = 78,29 \quad d_1 = 2,5$$

$$r_2 = 40,60 \quad d_2 = 8,0 \quad n_2 = 1,6475 \quad f' = 150,00$$

$$r_3 = -312,56 \quad n_3 = 1,5163 \quad s' = 144,10$$

Аберрации линз II системы:

$$s = -105,0$$

$h$	$\Delta s'$	$\beta^\circ$	$x_t$	$x_s$	$\Delta y'$
13,5	— 0,041	5	— 0,341	— 0,422	— 0,076
11,0	— 0,050	3,5	— 0,233	— 0,220	— 0,027
8,5	— 0,040	2	— 0,089	— 0,074	— 0,005

Для линз I оборотной системы

$$Q = 5,86; \quad c = -0,0015 \quad (\text{стр. 361}).$$

$$r_1 = 83,64$$

$$r_2 = 24,38 \quad d_1 = 2,0 \quad n_2 = 1,6259 \quad f' = 100,00$$

$$r_3 = -73,50 \quad d_2 = 6,0 \quad n_3 = 1,5181 \quad s' = 97,85$$

# Аберрации линз I системы:

$$s = -21,00$$

$h$	$\Delta s'$	$\beta^\circ$	$x_t$	$x_s$	$\Delta y'$
8,0	0,143	6	- 0,037	- 0,29	- 0,026
6,0	0,047	4	- 0,026	- 0,131	- 0,008
4,0	0,011	2	- 0,008	- 0,033	- 0,001

В наборе объективов, вошедшем в IV часть книги, полевые углы  $\beta = 6^\circ$ . Вместе с тем по габаритным данным величина поля зрения между линзами I оборотной системы при фокусном расстоянии первой линзы  $f' = 120$  мм будет равна

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{f'} = \frac{20}{120} = 0,167; \quad \beta = 9^\circ 30'.$$

Поэтому величину астигматизма для линз I оборотной системы необходимо экстраполировать, имея в виду, что и меридиональная, и сагиттальная кривизны поля будут расти по квадратичному закону.

Таким образом, для  $f' = 100,0$  получим:

$$x_t = -0,0367 \left( \frac{9,5}{6} \right)^2 = -0,092; \quad (x_t = 0,072);$$

$$x_s = -0,292 \left( \frac{9,5}{6} \right)^2 = -0,731; \quad (x_s = -0,689);$$

В скобках, для сопоставления, приведены истинные значения астигматизма, полученные путем непосредственного просчета меридиональных и сагиттальных пучков.

Кроме этого затруднения, в рассматриваемой нами схеме стереокомпаратора встречаемся еще с одним затруднением, которое состоит в том, что при сдвинутом положении линз II оборотной системы вторая линза этой системы работает при не предусмотренном в наборе объективов внесенном положении входного зрачка.

В этом случае следовало бы определить астигматизм второй линзы путем тригонометрического просчета меридионального и сагиттального пучков, но мы можем определить величину астигматизма также и приближенным путем, опираясь на то, что при малой коме и сферической аберрации величина астигматизма сохраняется постоянной и равной астигматизму при зрачке, совпадающем с объективом.

Астигматизм такого объектива может быть найден по приближенной формуле (которая легко получается из формул теории aberrаций третьего порядка) вида

$$x_t = -1,85 f' \beta^2; \quad x_s = -0,85 f' \beta^2, \quad (437)$$

что численно дает нам для фокусного расстояния  $f' = 150$  мм и  $\beta = 3^\circ,5$

$$x_t = -1,17; \quad x_s = -0,54.$$

На самом деле величина астигматизма при зрачке, совпадающем с линзой, будет равна

$$x_t = -0,972; \quad x_s = -0,457$$

и при внесенном на 100 м зрачке

$$x_t = -1,805; \quad x_s = -0,736.$$

Выбираем окуляр Кельнера второго типа, для которого средняя кривизна поля равна нулю и у которого величина астигматизма мало изменяется при изменении положения зрачка.

Величина кривизны поля зрения коллектива может быть найдена, если в качестве коллектива принять плоско-выпуклую линзу с острым краем (переход к линзе, имеющей на краю фаску, легко осуществляется добавлением к коллективу плоско-параллельной пластинки нужной толщины); кривизна поля для такого коллектива определяется удлинением, вносимым его толщиной (вблизи оси коллектив может рассматриваться как плоско-параллельная пластинка).

В нашем случае сила коллектива уже была определена; его толщина при диаметре, равном 20 мм, в случае изготовления коллектива из стекла К-8 ( $n = 1,5163$ ) будет равна

$$d = \frac{y^2}{2r} = \frac{y^2 \varphi}{2(n-1)} = \frac{10^2 \cdot 0,0156}{2 \cdot 0,5163} = 1,515,$$

и тогда кривизна поля коллектива получится равной удлинению, вносимому толщиной коллектива,

$$x_t = x_s = -d \cdot \frac{n-1}{n} = -1,515 \cdot 0,34 = -0,52.$$

Аналогично и в соответствии с принятыми значениями фокусных расстояний согласно габаритному расчету получаем следующие величины радиусов, толщин и aberrаций:

Для первой линзы I оборачивающей системы

$$r_1 = 100,37$$

$$r_2 = 29,22 \quad d_1 = 2,4 \quad n_2 = 1,6259 \quad f' = 120,00$$

$$d_2 = 7,2 \quad n_3 = 1,5181 \quad s' = 117,36.$$

$$r_3 = -88,20$$



Сферическая aberrация этой линзы, рабочая высота которой  $h=4,8$  мм, будет равна  $\Delta s'=0,015$ ; астигматизм для угла  $\beta=9^\circ,5$  будет равен  $x_t=-0,110$ ;  $x_s=-0,877$ , а  $s_1=-25,2$ .

Для второй линзы получаем следующие данные:

$$r_1 = 50,18$$

$$d_1 = 1,2 \quad n_2 = 1,6259 \quad f' = 60,00$$

$$r_2 = 14,61$$

$$d_2 = 3,6 \quad n_3 = 1,5181 \quad s' = 58,68.$$

$$r_3 = -44,10$$

Сферическая aberrация также для рабочей высоты  $h=4,8$  будет равна  $\Delta s'=0,086$ ; астигматизм для угла  $\beta=9^\circ,5$  будет:  $x_t=-0,055$ ;  $x_s=-0,438$ , а  $s_1=-12,6$ .

Для обеих линз II оборачивающей системы получим:

$$r_1 = 82,20$$

$$d_1 = 2,63 \quad n_2 = 1,6475 \quad f' = 157,5$$

$$r_2 = 42,63$$

$$d_2 = 8,40 \quad n_3 = 1,5163 \quad s' = 151,32$$

$$r_3 = -328,2$$

(при пересчете линз II оборачивающей системы, для упрощения примем коэффициент пересчета равным 1,05 вместо отношения фокусных расстояний  $\frac{158}{150} = 1,053$ ).

Аберрации линз II оборачивающей системы будут равны:

$$s = -110,25$$

$h$	$\Delta s'$	$\beta^\circ$	$x_t$	$x_s$
11,6	- 0,053	3,5	- 0,245	- 0,231
8,9	- 0,042	2	- 0,093	- 0,078

В рассматриваемом примере мы ограничиваемся суммированием сферической aberrации для одной высоты и астигматизма для одного полевого угла; совершенно очевидно, что аналогичным образом следует просуммировать и другие aberrации, например кому, и для различных высот и углов.

Перейдем непосредственно к суммированию aberrаций.  
Для первой линзы I обобщающей системы, когда

$$h = 4,8 \text{ и } \beta = 9^\circ,5, \text{ напишем: } \Delta s'_1 = 0,015; \quad x_{t1} = -0,11; \quad x_{s1} = -0,877$$

$$\text{Умножаем на } q_{I+II} = \left(\frac{60}{120}\right)^2$$

$$\times 0,25 \qquad \times 0,25 \qquad \times 0,25$$

прибавляем aberrации II линзы	$q_{I+II} \Delta s'_1 = 0,004$	$q_{I+II} x_{t1} = -0,028$	$q_{I+II} x_{s1} = 0,219$
	$\sum_1^2 \Delta s' = 0,086$	$\sum_1^2 x_t = -0,055$	$\sum_1^2 x_s = 0,438$
прибавляем aberrации коллектива	$\sum_1^3 \Delta s' = 0,090$	$\sum_1^3 x_t = -0,083$	$\sum_1^3 x_s = 0,657$
	$\Delta s'_k = 0,000$	$x_{tk} = -0,520$	$x_{sk} = 0,520$
прибавляем aberrации I и II линз II обобщающей системы	$\sum_1^4 \Delta s' = 0,090$	$\sum_1^4 x_t = -0,603$	$\sum_1^4 x_s = 1,177$
	$\Delta s'_1 = -0,053$	$x_{t1} = -0,245$	$x_{s1} = 0,231$
прибавляем aberrации окуляра (второй окуляр Кельнера)	$\sum_1^5 \Delta s' = 0,037$	$\sum_1^5 x_t = -0,848$	$\sum_1^5 x_s = 1,408$
	$\Delta s'_2 = -0,053$	$x_{t2} = -0,245$	$x_{s2} = 0,231$
	$\sum_1^6 \Delta s' = -0,016$	$\sum_1^6 x_t = -1,093$	$\sum_1^6 x_s = 1,639$
	$\Delta s'_0 = -0,22$	$x_{t0} = +1,20$	$x_{s0} = 1,18$
	$\sum_1^7 \Delta s' = -0,236$	$\sum_1^7 x_t = +0,107$	$\sum_1^7 x_s = 2,82$

Найдем величину астigmatизма в диоптриях:

$$L_t = \frac{1000 \sum x_t}{f'^2_{ок}} = \frac{107}{625} = 0,17 D; \quad L_s = \frac{+1000 \sum x_s}{f'^2_{ок}} = \frac{2820}{625} = -4,5 D.$$

Определим поперечную и угловую сферическую абберации после окуляра. Находим\*

$$\sigma = \Delta s' u_{\text{ок}} = -0,018; \gamma = \frac{\sigma}{f_{\text{ок}}} = \frac{-0,018}{25} = 0,00072 = 2'24''$$

## Глава VIII

### СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

#### § 30. Задачи, преследуемые изменениями увеличений

Необходимость изменять увеличения встречается в самых разнообразных оптических приборах (в микроскопах, объективах кино съемочных и передающих телевизионных камер, дальномерах, перископах, астрономических и иных приборах) и обуславливается решением двух задач.

1. Введением интересующего нас объекта в поле зрения системы, обладающей большим увеличением.

2. Изменением масштаба изображения.

Первая задача аналогична задаче изменения поля зрения. Большинство оптических систем при большем увеличении, как правило, обладает весьма незначительным полем зрения, и потому введение интересующего нас объекта в такое малое поле зрения представляет серьезные затруднения. Поэтому очень удобно для отыскания и введения в поле зрения объекта пользоваться системой с большим полем, хотя бы и при меньшем увеличении.

Так, например, в микроскопах при окулярном поле зрения около  $30^\circ$  и при общем увеличении  $500\times$  поле зрения объектива оказывается равным  $0,25 \text{ мм}$ ; поэтому, чтобы отыскать и ввести в такое поле зрения объект, целесообразно воспользоваться объективом, дающим увеличение микроскопа  $50\text{—}100\times$  и поле зрения  $2,5\text{—}1,25 \text{ мм}$ .

Астрономическая зрительная труба с увеличением  $200\times$  при окулярном поле зрения  $40^\circ$  обладает полем зрения со стороны объектива около  $0^\circ,2 = 12'$ .

Ввести в такое поле зрения наблюдаемый объект также весьма затруднительно; для решения этой задачи нередко прибегают к установке параллельно главной трубе вспомогательной трубы-искателя со значительно большим полем зрения ( $4\text{—}5^\circ$ ), но при соответственно меньшем увеличении (около  $10\times$ ).

При пользовании обычным биноклем, как и при пользовании лупой, сначала наблюдаем невооруженным глазом.

---

\* В приведенном расчете суммарная сферическая абберация в фокальной плоскости окуляра оставлена отрицательной, учитывая положительную сферическую абберацию, вносимую призмами (см. § 39).

Вторая задача — изменение масштаба изображения — решается, например, при репродуцировании различных по величине объектов к одинаковой величине изображения, приведении снимков к заданному масштабу и т. п.

Кроме того, при осуществлении изменений увеличений необходимо разрешить еще две конструктивные задачи, обеспечивающие удобства пользования прибором: сохранения положений зрачков входа и выхода всей системы, так как положение зрачка входа определяет всю конструкцию головного визирного узла, а положение зрачка выхода определяет неподвижность глаза наблюдателя.

Конструктивно решение второй задачи можно осуществить посредством смены окуляров оптической системы, объективов, посредством смены линз оборотной системы, вращением перед системой некоторой галилеевской системы, передвижкой линз оборотной системы и передвижкой коллектива.

Выполняя в двух последних способах непрерывную передвижку линз по определенному закону, можно осуществить непрерывные изменения увеличений, т. е. осуществить так называемую панкратическую оптическую систему.

Перейдем к рассмотрению различных способов изменения увеличения.

### **§ 31. Системы переменного увеличения со сменными элементами**

**Сменные окуляры.** Один из простейших способов изменения увеличений — способ смены окуляров; действительно, для решения поставленной задачи достаточно осуществить лишь какое-то конструктивное устройство, обеспечивающее быструю смену окуляров; принципиально представляется возможным применять любые окуляры любых фокусных расстояний.

Однако на самом деле в результате смены окуляров можно решать далеко не все задачи, возникающие перед проектированием систем переменного увеличения.

Действительно, диапазон возможных фокусных расстояний для окуляров ограничивается наименьшим фокусным расстоянием около 10—12 мм (меньшие фокусные расстояния окуляров приводят к практически неприемлемо малому удалению выходного зрачка) и наибольшим фокусным расстоянием порядка 40—50 мм. Большие значения фокусных расстояний окуляров приводят к очень большим диоптрийным передвижениям (например, при фокусном расстоянии 50 мм передвижке на 1 диоптрию соответствует перемещение окуляра на 2,5 мм и полное перемещение окуляра при перефокусировке на  $\pm 5$  диоптрий составит  $\pm 12,5$  мм — половину фокусного расстояния окуляра). Таким образом, практически возможный диапазон изменений увеличений не превышает трех-четырех крат.

Рассмотрим возможные изменения увеличений при помощи смены окуляров более детально.

На рис. 74 представлены два сменных окуляра с фокусными расстояниями  $-f_I$  и  $-f_{II}$ ; фокусное расстояние предшествующей части системы примем равным  $f'_{o\delta}$ .

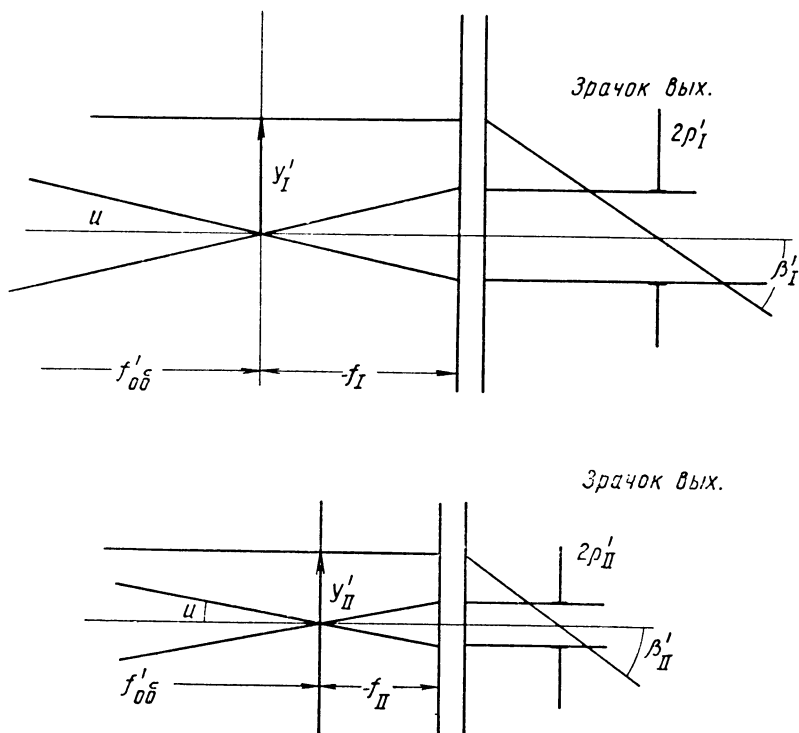


Рис. 74

Апертурный угол предшествующей части системы примем равным  $u$ . Оба увеличения при смене окуляров определятся отношениями соответственных фокусных расстояний:

$$\Gamma_I = \frac{f'_{o\delta}}{f_I}; \quad \Gamma_{II} = \frac{f'_{o\delta}}{f_{II}}. \quad (438)$$

Значения полей зрения окуляров вычисляют по формулам:

$$\operatorname{tg} \beta'_I = \frac{y'_I}{f'_I}; \quad \operatorname{tg} \beta'_{II} = \frac{y'_{II}}{f'_{II}}. \quad (439)$$

Радиусы выходных зрачков при обоих увеличениях могут быть вычислены как произведения фокусных расстояний обоих окуляров на апертурный угол предшествующей части системы

$$\rho_I' = -f_I' u; \quad \rho_{II}' = -f_{II}' u. \quad (440)$$

Из формулы (440) без труда находим отношение радиусов обоих выходных зрачков

$$\frac{\rho_{II}'}{\rho_I'} = \frac{f_{II}'}{f_I'} = \frac{\Gamma_I}{\Gamma_{II}}. \quad (441)$$

Формула (441) показывает, что одной из характерных особенностей изменений увеличений путем применения сменных окуляров является изменение величины выходного зрачка; при диапазоне увеличений в 3—4 раза диаметр выходного зрачка изменяется также в 3—4 раза.

Такое большое изменение диаметра выходного зрачка приводит либо к очень малому диаметру зрачка при большом увеличении, либо к очень большому диаметру зрачка при малом увеличении.

Это последнее обстоятельство ограничивает диапазон увеличений, практически осуществимый путем смены окуляров.

Обратимся к формуле (439). Величина окулярного поля зрения может быть одинаковой для обоих окуляров. Поэтому

$$\operatorname{tg} \beta_I' = \operatorname{tg} \beta_{II}', \quad (442)$$

откуда

$$\frac{y_{II}'}{y_I'} = \frac{f_{II}'}{f_I'} = \frac{\Gamma_I}{\Gamma_{II}}. \quad (443)$$

Из этой формулы следует, что используемое при большем увеличении поле зрения составляет очень небольшую часть поля зрения системы при малом увеличении, иными словами — при большем увеличении предшествующая окуляру часть оптической системы используется очень нерационально.

Габаритный расчет системы со сменными окулярами вполне определяется расчетом по малому увеличению; единственной особенностью такой системы служит возможность допущения значительно большего виньетирования на краю поля зрения при малом увеличении (ширина наклонного пучка может быть уменьшена до величины выходного зрачка при большем увеличении).

Положение выходного зрачка при изменении увеличений, вообще говоря, непостоянно; величина перемещения выходного зрачка в общем случае не превосходит удвоенного фокусного расстояния слабого окуляра и может быть искусственно уменьшена посредством применения сильного окуляра с большим удалением выходного зрачка.

Сменные окуляры в зрительных трубах встречаются сравнительно редко; более широко они применяются в микроскопах, где

в обычном наборе встречаемся с окулярами 7-, 10- и 15-кратным увеличением; довольно часто можно встретить также окуляры с увеличением 20×; эти окуляры обеспечивают диапазон изменений увеличений примерно 3×.

Более слабые окуляры (4—5× увеличения) встречаются очень редко. Сменные окуляры находят применение в астрономической оптике, где смена увеличений другими способами не представляется возможной ввиду уникальности объективной системы и нежелательности усложнения всей оптической системы добавочной системой переменного увеличения.

Изменение увеличений посредством применения сменных окуляров конструктивно выгодно тем, что в этом случае легко обеспечивается постоянство наводки оптической системы и ее визирной линии.

**Сменные объективы.** В простейшем случае сменные объективы встречаются в виде набора в киносъемочных и телевизионных камерах; весьма широко сменные объективы применяются в микроскопах, где они по существу являются основным средством, изменяющим увеличения.

Что же касается применения сменных объективов в телескопических системах, то в этом случае, как это нетрудно видеть, сменность объективов приводит к очень сильному изменению габаритов системы, так как наиболее короткое из фокусных расстояний объективов, как правило, значительно превосходит фокусные расстояния окуляров, и потому все то, что было уже сказано нами относительно неудобств сменности окуляров, будет в еще большей степени справедливо по отношению к сменности объективов.

Действительно, обращаясь к формулам для увеличений телескопической системы при постоянном окуляре, получаем

$$\Gamma_I = \frac{f'_I}{f_{ок}}; \quad \Gamma_{II} = \frac{f'_{II}}{f_{ск}}; \quad \frac{\Gamma_I}{\Gamma_{II}} = \frac{f'_I}{f'_{II}}. \quad (444)$$

Необходимо заметить, что при смене объективов обязательно должна учитываться величина перемещения выходного зрачка (аналогично перемещению выходного зрачка при смене окуляров); одним из наиболее благоприятных случаев будет случай телецентрического хода лучей после сменных объективов, когда все сменные объективы будут иметь единообразное расположение входного зрачка относительно объектива.

Сменность объективов в микроскопии должна осуществляться с непременным сохранением оптической длины тубуса микроскопа, равной, как известно, 180 мм; решение этой задачи осуществляют с учетом расположения главных плоскостей в оптической системе того или иного типа микрообъектива путем пересчета на заданную оптическую длину тубуса по подобию оптической системы, вычисленной при произвольном расстоянии между предметом и изображением.

Изменения увеличений посредством смены линз в оборотной системе. Сменность линз оборотной системы предполагает неизменность фокусных расстояний как объектива, так и окуляра оптической системы; в равной степени неизменными остаются изображения после объектива и перед окуляром.

Следовательно, габариты всей оптической системы должны остаться неизменными. Это и представляет серьезный практический интерес.

Рассматривая оборотную систему и окуляр как эквивалентный окуляр с переменным фокусным расстоянием, можно сразу же установить, что объектив такой системы должен работать и при большем поле (соответственно малому увеличению) и при большем зрачке входа.

Изменения увеличений в оборачивающей системе могут осуществляться посредством смены задней линзы оборотной системы, передней линзы и обеих линз.

Все эти три случая предполагают сохранение параллельного хода между линзами, хотя при смене обеих линз это условие не является обязательным.

Сначала рассмотрим, когда сменной является вторая линза оборотной системы (рис. 75).

При малом увеличении всей системы выгодно для более полного использования габаритов диаметр предмета и диаметр изображения принять равными, т. е. сделать увеличение системы равным  $V_I = -1$ ; для этого, очевидно, необходимо соблюсти равенство фокусных расстояний обеих линз.

Чтобы повысить увеличение в такой системе, следует увеличить фокусное расстояние второй линзы.

На рис. 75:  $L$  — длина системы;  $2\rho$  — диаметр параллельного хода;  $f_1'$ ,  $f_2'$  — фокусные расстояния сменных линз;  $d_i$  и  $d_{II}$  — расстояния между линзами при обоих увеличениях;  $u_1'$ ,  $u_{II}'$  — выходные апертурные углы.

Нетрудно написать соотношение обоих увеличений оборотной системы

$$\frac{V_{II}}{V_I} = -V_{II} = \frac{f_2'}{f_1'}, \quad (445)$$

откуда

$$f_2' = -V_{II}f_1', \quad (446)$$

но

$$d_1 + f_1' = d_{II} + f_2' = \text{const}, \quad (447)$$

следовательно,

$$d_1 - d_{II} = f_2' - f_1' = -(V_{II} + 1)f_1'. \quad (448)$$

Из этой формулы легко определить увеличение  $V_{II}$ .



Нетрудно видеть, что если при малом увеличении соблюдено равенство  $d_1 = f_1'$  или в самом лучшем случае  $d_{II} = 0$ , получим увеличение  $V_{II} = -2$ .

Существенно, что при сменности второй линзы оборотной системы и большем увеличении получаем падение апертуры.

На рис. 75 находим величины выходных апертурных углов:

$$u_1' = \frac{\rho}{f_1'}; \quad u_{II}' = \frac{\rho}{f_2'}, \quad (449)$$

откуда

$$\frac{u_{II}'}{u_1'} = \frac{f_1'}{f_2'} = -\frac{1}{V_{II}}. \quad (450)$$

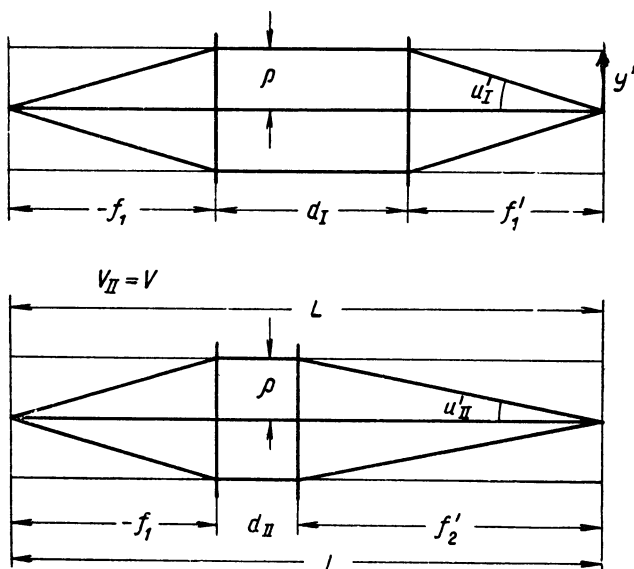


Рис. 75

Заметим, что если фокусное расстояние второй линзы сделать короче фокусного расстояния первой, поле зрения после оборотной системы уменьшится, а следовательно, не полностью будет использовано поле зрения окуляра.

Когда же сменной является первая линза оборотной системы, соотношение увеличений определится, как и ранее, формулой (445).

На рис. 76 обозначения аналогичны обозначениям на рис. 75. Тогда

$$-f_2 + d_1 = f_2' + d_1 = f_1' + d_{II}, \quad (451)$$

откуда

$$d_{II} - d_I = \frac{f_2'}{V_{II}} + f_2' = \left( \frac{1}{V_{II}} + 1 \right) f_2'. \quad (452)$$

Из формулы (452) следует

$$\frac{1}{V_{II}} + 1 = \frac{d_{II} - d_I}{f_2'}. \quad (453)$$

Нетрудно видеть, что в этом случае можно осуществить любые увеличения; выходные апертурные углы сохраняются неизменными.

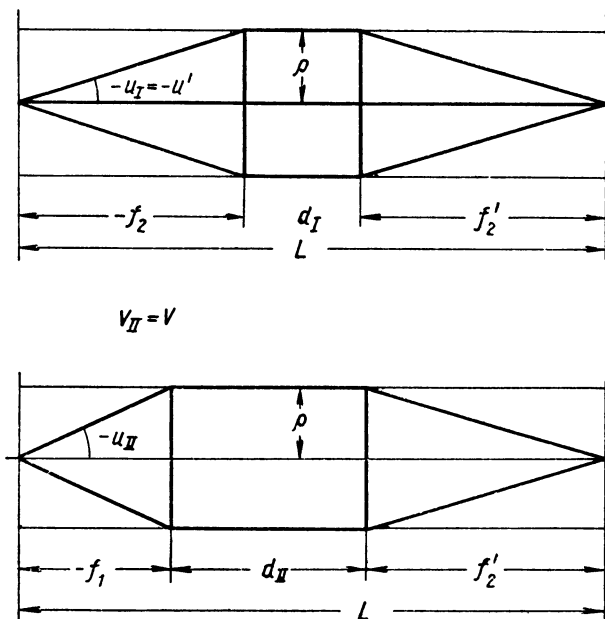


Рис. 76

Наоборот, входные апертурные углы  $u_I$  и  $u_{II}$  (рис. 76) уже перестанут быть равными, так как

$$-u_I = \frac{\rho}{f_2}; \quad -u_{II} = \frac{\rho}{f_1}, \quad (454)$$

откуда

$$\frac{u_{II}}{u_I} = \frac{f_2'}{f_1} = -V_{II}. \quad (455)$$

Изменения увеличений посредством вращающейся галилеевской телескопической системы. На рис. 77:  $\varphi_1$  — первая линза галилеевской системы;  $\varphi_2$  — вторая

линза;  $f_1'$  и  $f_2'$  — фокусные расстояния соответственно первой и второй линз;  $d$  — расстояние между линзами;  $\rho_I$  и  $\rho_{II}$  — соответственно радиусы зрачков входа и выхода.

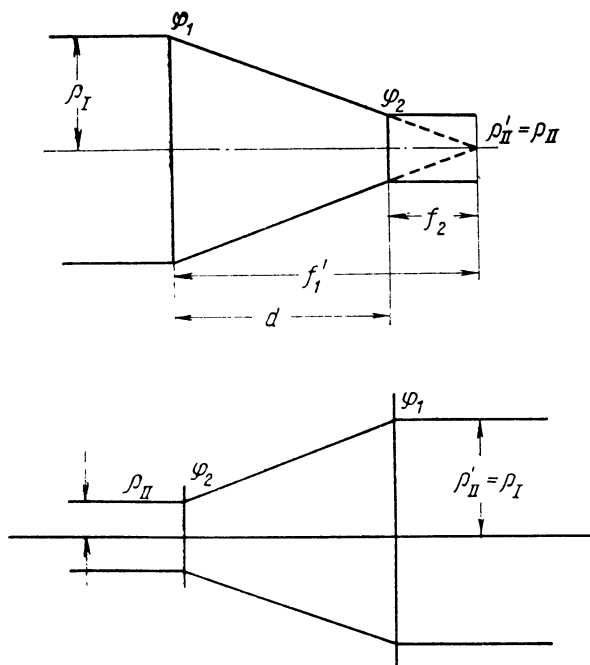


Рис. 77

При переворачивании линзы галилеевской системы меняются между собой местами; в соответствии с этим определяются оба увеличения галилеевской системы

$$\Gamma_I = \frac{f_1'}{f_2}; \quad \Gamma_{II} = \frac{f_2'}{f_1} = \frac{1}{\Gamma_I}, \quad (456)$$

откуда

$$\Gamma_{II} \Gamma_I = 1 \quad \text{и} \quad \frac{\Gamma_I}{\Gamma_{II}} = \Gamma_I^2. \quad (457)$$

Положение зрачков входа и выхода целесообразно совместить одно с другим, а также и с осью вращения галилеевской системы (для фиксации положений системы переменного увеличения). На рис. 78:  $t_1$  и  $t_2$  — отрезки от первой и второй линз соответственно до зрачков входа и выхода;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_3$  — углы между главным

лучом и осью при входе этого луча в систему, между линзами системы и после системы;  $h_1$  и  $h_2$  — высоты главного луча на первой и на второй линзах. Из рис. 78 следует

$$d = f_1' - f_2, \quad (458)$$

кроме того,

$$\beta_1 = \frac{h_1}{t_1}; \quad \beta_2 = \frac{h_2}{t_2'}. \quad (459)$$

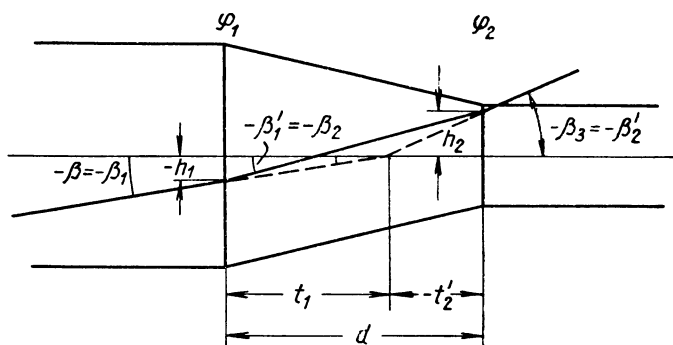


Рис. 78

Из формулы перехода луча через линзу (269) получаем для первой и второй линз соответственно:

$$\beta_2 = \beta_1 + h_1 \varphi_1 = \beta_1 \left(1 + \frac{t_1}{f_1'}\right); \quad \beta_3 = \beta_2 + h_2 \varphi_2 = \beta_2 + \beta_2 \frac{t_2'}{f_2'}, \quad (460)$$

откуда

$$\beta_1 \left(1 + \frac{t_1}{f_1'}\right) = \beta_3 \left(1 - \frac{t_2'}{f_2'}\right). \quad (461)$$

Но так как

$$\frac{\beta_3}{\beta_1} = \Gamma = -\frac{f_1'}{f_2'}, \quad (462)$$

то из (461) находим

$$f_1' + t_1 = \frac{\beta_3}{\beta_1} \cdot \frac{f_1'}{f_2'} (f_2' - t_2') = -\Gamma^2 (f_2' - t_2'). \quad (463)$$

Далее следует, что

$$d = t_1 - t_2' = f_1' + f_2', \quad (464)$$

откуда

$$f_1' - t_1 = -f_2' - t_2'. \quad (465)$$

Исключая из (463) и (465)  $t_2'$ , находим

$$\frac{f_1' + t_1}{\Gamma^2} + f_1' - t_1 = -2f_2' = \frac{2f_1'}{\Gamma} \quad (466)$$

или

$$(\Gamma^2 - 2\Gamma + 1)f_1' = (\Gamma^2 - 1)t_1, \quad (467)$$

откуда

$$\frac{t_1}{f_1'} = \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}. \quad (468)$$

При переворачивании галилеевской системы отрезку  $t_2'$  будет соответствовать отрезок  $t_1$ ,  $\bar{f}_1' = f_2'$ , увеличение  $\bar{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma}$ , тогда

$$\frac{t_2'}{\bar{f}_2'} = \frac{1 + \frac{1}{\Gamma}}{1 - \frac{1}{\Gamma}} = \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1} = \frac{t_1}{f_1'} \quad (469)$$

или

$$\frac{t_2'}{t_1} = \frac{f_2'}{f_1'} = -\frac{1}{\Gamma} = -\frac{\beta_1}{\beta_3}. \quad (470)$$

Из (459) и (470) следует

$$h_1 = -h_2. \quad (471)$$

Таким образом, условие совмещения зрачков осуществимо; но во избежание перемещения зрачков при смене увеличений ось вращения галилеевской системы следует размещать на половине расстояния между зрачками (если зрачки не совмещены).

При помощи вращающейся галилеевской системы можно осуществить третье увеличение, если исключить действие галилеевской системы путем поворота ее на  $90^\circ$ .

Заметим, что использование галилеевской системы для перемены увеличения возможно не только при ее расположении перед всей системой, но и внутри системы — где-либо в параллельном ходе лучей (например, между линзами оборотных систем).

Применять вращающуюся галилеевскую систему можно и в сходящемся ходе лучей, но при этом необходимо обеспечить совмещение предмета и изображения с совмещенными зрачками системы (перестающими, естественно, при этом играть роль зрачков) и осью ее вращения.

Применяя вращающуюся галилеевскую систему в сходящемся ходе лучей для сохранения стабильности положения зрачков, важно иметь телецентрический ход главных лучей (параллельно оси системы).

## § 32. Системы переменного увеличения с передвигными линзами

Простейшей системой переменного увеличения служит система, состоящая из одного передвигного элемента; основное требование к такой системе—сохранить постоянство длины системы (рис. 79).

На рис. 79:  $A$  и  $A'$ —предмет и изображение, создаваемое системой с передним  $F$  и задним  $F'$  фокусами;  $f$  и  $f'$ —переднее и заднее фокусные расстояния системы;  $x_1$  и  $x_1'$ —отрезки от фокусов до предмета и изображения;  $s_1$  и  $s_1'$ —расстояния между линзой и соответственно предметом и изображением.

Напишем общее выражение, определяющее длину системы,

$$L = -x_1 - f + f' + x_1' = \frac{f}{V_1} - f + f' - f'V_1. \quad (472)$$

или, когда система находится в воздухе и  $-f = f'$ ,

$$L = \left[ -\frac{1}{V_1} + 2 - V_1 \right] f'. \quad (473)$$

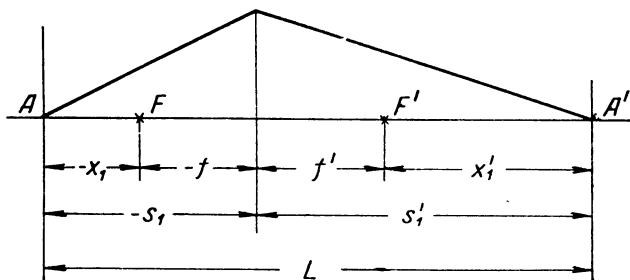


Рис. 79

Предположим, что то же самое расстояние между предметом и изображением будет сохранено и при некотором другом увеличении  $V_2$ .

Тогда, на основании формулы (473) можно написать

$$L = \left[ -\frac{1}{V_2} + 2 - V_2 \right] f'. \quad (474)$$

Из (473) и (474) следует

$$\frac{1}{V_1} + V_1 = \frac{1}{V_2} + V_2. \quad (475)$$

Увеличение  $V_1$  было принято нами отличным от нуля. Поэтому, умножая (475) на  $V_1$ , получаем квадратное уравнение

$$V_1^2 - \left( \frac{1}{V_2} + V_2 \right) V_1 + 1 = 0, \quad (476)$$

откуда

$$V_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{V_2} + V_2 \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{V_2} + V_2 \right)^2 - 1} \quad (477)$$

или

$$V_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{V_2} + V_2 \right) \pm \frac{1}{2} \left( \frac{1}{V_2} - V_2 \right) = \frac{1}{V_2} \quad (478)$$

Второй корень  $V_1 = V_2$  не представляет для нас практического интереса.

Нетрудно определить необходимое для изменения увеличения перемещение системы. Обозначая это перемещение через  $a$ , пишем

$$a = x_1' - x_2', \quad (479)$$

$$a = -f' V_1 + f' V_2 \quad (480)$$

или

$$a = - \left( V_1 - \frac{1}{V_1} \right) f'. \quad (481)$$

Чтобы выразить расстояние между предметом и изображением через величину  $a$ , находим

$$L = 2(1 - V)f' - a. \quad (482)$$

Предположим, что при том же самом перемещении  $a$  системы существует другое положение предмета и изображения, не изменяющееся при передвижении системы. Обозначая расстояние между этим новым предметом и его изображением через  $L'$ , можно написать

$$L' = \left[ -\frac{1}{V_1'} + 2 - V_1' \right] f' = \left[ -\frac{1}{V_2'} + 2 - V_2' \right] f', \quad (483)$$

причем, согласно (478)

$$V_1' = \frac{1}{V_2'}, \quad (484)$$

а согласно (481)

$$a = - \left[ V_1 - \frac{1}{V_1} \right] f' = - \left[ V_1' - \frac{1}{V_1'} \right] f', \quad (485)$$

откуда

$$V_1 - \frac{1}{V_1} = V_1' - \frac{1}{V_1'}. \quad (486)$$

Умножая (486) на  $V_1$ , получаем квадратное уравнение

$$V_1^2 - \left( V_1' - \frac{1}{V_1'} \right) V_1 - 1 = 0, \quad (487)$$

после решения которого находим

$$V_1 = \frac{1}{2} \left( V_1' - \frac{1}{V_1'} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( V_1' - \frac{1}{V_1'} \right)^2 + 1} \quad (488)$$

или

$$V_1 = \frac{1}{2} \left( V_1' - \frac{1}{V_1'} \right) \pm \frac{1}{2} \left( V_1' + \frac{1}{V_1'} \right). \quad (489)$$

Окончательно

$$V_1 = -\frac{1}{V_1'} \quad \text{и} \quad V_1 = V_1'. \quad (490)$$

Равенство  $V_1 = V_1'$  не представляет для нас практического интереса.

Займемся определением величины  $L'$ . Пользуясь (483), получаем

$$L' = \left[ V_1 + 2 + \frac{1}{V_1} \right] f' \quad (491)$$

или, имея в виду (481),

$$L' = \left[ 2(1 + V_1) + \frac{a}{f'} \right] f'. \quad (492)$$

Суммируя  $L$  и  $L'$ , получаем

$$L + L' = 4f' = \text{const.} \quad (493)$$

Расшифруем полученные зависимости. Полагая

$$-V_1 = 1 + \alpha, \quad (494)$$

а  $\alpha$  — малым, найдем

$$L = [4 + \alpha^2] f' > 4f'. \quad (495)$$

В случае же, если величина  $V$  равна по абсолютной величине 2 или более, условие (495) также имеет место.

Поэтому приходим к выводу, что при любых отрицательных значениях  $V_1$  и при положительном фокусном расстоянии системы переменного увеличения расстояние между предметом и изображением всегда положительно и больше учетверенной величины фокусного расстояния системы.

Из (493) нетрудно видеть, что второе возможное расстояние  $L'$  между предметом и изображением непременно должно оказаться отрицательным, т. е. второе возможное положение предмета окажется расположенным правее его изображения.

Также нетрудно видеть, что увеличения  $V_1$  и  $V_2$  должны быть [на основании (479)] одного знака.



Наоборот, увеличения  $V_1'$  и  $V_2'$  будут иметь обратный знак по отношению к увеличениям  $V_1$  и  $V_2$ , т. е. должны быть для рассмотренного случая положительными.

При отрицательных увеличениях  $V_1$  и  $V_2$  расстояния между предметом и системой переменного увеличения и между системой переменного увеличения и изображением будут всегда больше фокусного расстояния системы; для положительных увеличений система переменного увеличения будет переходить через плоскости предмета и изображения.

Существование двух стабильных положений предмета и изображения при двух различных увеличениях позволяет разрешить задачу изменений увеличений при сохранении стабильного положения зрачков системы при обоих увеличениях; действительно, размещая предмет и изображение в одной паре сопряженных плоскостей, следует разместить зрачки в другой паре стабильно расположенных плоскостей предмета и изображения.

В случае, когда расстояние между предметом и его изображением будет положительным, а увеличение — отрицательным, получим оборачивающую систему переменного увеличения; наоборот, когда расстояние между предметом и изображением отрицательно, а увеличение — положительно, будем иметь случай передвигного коллектива переменного увеличения.

В первом случае положение стабильных зрачков будет расположено внутри системы; второй случай дает расположение стабильных зрачков вне системы.

Необходимо заметить, что фокусное расстояние самой системы переменного увеличения может быть как положительным, так и отрицательным. Таким образом, решение задачи об изменении увеличений при помощи движущейся системы возможно четырьмя различными способами.

### § 33. Панкратические системы

В настоящее время известны два типа простых панкратических систем (оборотная панкратическая система из двух положительных линз и система из раздвижного панкратического коллектива, состоящего из положительной и отрицательной линз).

Эти оба случая могут быть обобщены путем анализа панкратической системы, состоящей из двух линз с различными силами.

Перейдем к конкретному разбору этого случая. На рис. 80:  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — силы первого и второго компонентов исследуемой системы;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  — углы нулевого луча с осью системы;  $h_1$  и  $h_2$  — высоты нулевого луча на обоих компонентах;  $d$  — расстояние между компонентами и  $s_1$  и  $s_2'$  — отрезки от предмета до первого компонента и от второго компонента до изображения. На основании формулы (269) перехода через оптическую систему можно написать:

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1 \varphi_1; \quad \alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \varphi_2, \quad (496)$$

$$h_1 = s_1 \alpha_1; \quad h_2 = s_2' \alpha_3. \quad (497)$$

Кроме того, на основании (270)

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d, \quad (498)$$

а из рис. 79

$$-s_1 + d + s_2' = L = \text{const.} \quad (499)$$

Пользуясь (499) и (497), можно написать

$$-\frac{h_1}{\alpha_1} + d + \frac{h_2}{\alpha_3} = L. \quad (500)$$

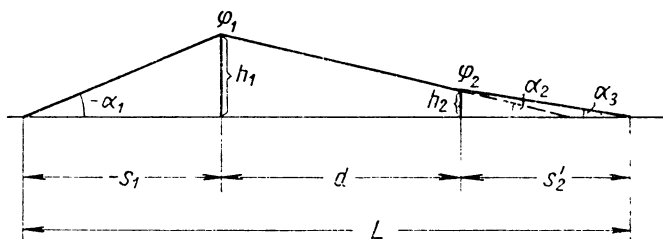


Рис. 80

Расстояние между компонентами

$$d = \frac{h_1 - h_2}{\alpha_2}, \quad (501)$$

на основании (500)

$$h_1 \left( \frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1} \right) + h_2 \left( \frac{1}{\alpha_3} - \frac{1}{\alpha_2} \right) = L. \quad (502)$$

Из (496) следует

$$h_1 = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\varphi_1}; \quad h_2 = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\varphi_2}. \quad (503)$$

Пользуясь (502), найдем

$$\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\varphi_1} \left( \frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1} \right) + \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\varphi_2} \left( \frac{1}{\alpha_3} - \frac{1}{\alpha_2} \right) = L \quad (504)$$

или после преобразований

$$f_1' \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{\alpha_1 \alpha_2} + f_2' \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{\alpha_2 \alpha_3} = L. \quad (505)$$

Так как увеличение первого компонента  $V_1$ , а увеличение второго компонента  $V_2$ , то, пользуясь (270), можно написать

$$V_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}; \quad V_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_3}. \quad (506)$$

Тогда (505) представляется в следующем виде

$$\left(2 - V_1 - \frac{1}{V_1}\right)f_1' + \left(2 - V_2 - \frac{1}{V_2}\right)f_2' = L \quad (507)$$

или

$$2f_1' + 2f_2' - L = \left(V_1 + \frac{1}{V_1}\right)f_1' + \left(V_2 + \frac{1}{V_2}\right)f_2'. \quad (508)$$

Эту формулу можно рассматривать как основную формулу, определяющую действие панкратической системы.

Рассмотрим несколько частных случаев.

1. Оба компонента положительны и имеют одинаковые фокусные расстояния. В этом случае (508) может быть представлена в виде

$$4 - \frac{L}{f_1'} = V_1 + \frac{1}{V_1} + V_2 + \frac{1}{V_2}. \quad (509)$$

Рассматривая левую часть этой формулы, можно себе представить случай, когда эта левая часть окажется равной нулю; для этого необходимо соблюсти дополнительное условие

$$L = 4f_1', \quad (510)$$

тогда (509) переходит в формулу вида

$$V_1 + \frac{1}{V_1} = -V_2 - \frac{1}{V_2}. \quad (511)$$

Нетрудно усмотреть, что корнями уравнения (511) будут:

$$V_2 = -V_1; \quad V_2 = -\frac{1}{V_1}. \quad (512)$$

Из (512) следует, что увеличения первого и второго компонентов всегда имеют разные знаки (в более общем случае, когда условие (510) не соблюдается, увеличения можно получить с одинаковыми знаками).

Общее увеличение панкратической системы

$$V = V_1 V_2, \quad (513)$$

откуда и из (512) следует, что общее увеличение всей системы всегда отрицательно; соответственно первому и второму корням уравнения (511) получим два значения общего увеличения всей системы

$$V = -V_1^2; \quad V = -1. \quad (514)$$

Второй корень дает постоянное общее увеличение и поэтому не представляет практического интереса.

Возвращаясь к (496) и (497), представим их в виде:

$$\alpha_2 = (1 + s_1 \varphi_1) \alpha_1; \quad \alpha_2 = (1 - s_2' \varphi_2) \alpha_3, \quad (515)$$

откуда

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{1}{V_1} = 1 + \frac{s_1}{f_1'}; \quad \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = V_2 = 1 - \frac{s_2'}{f_2'} \quad (516)$$

или

$$\frac{s_1}{f_1'} = \frac{1}{V_1} - 1; \quad \frac{s_2'}{f_2'} = 1 - V_2. \quad (517)$$

Для случая системы из двух компонентов с одинаковыми силами

$$\frac{s_1}{f_1'} = \frac{1}{V_1} - 1; \quad \frac{s_2'}{f_1'} = 1 - V_2. \quad (518)$$

Физическая возможность существования панкратической системы обуславливается равенством нулю воздушного промежутка между компонентами. Рассмотрим этот случай, обращаясь к (501):

$$h_1 = h_2 \quad (519)$$

или, пользуясь (503),

$$\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\varphi_1} = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\varphi_2}. \quad (520)$$

В случае, когда  $\varphi_1 = \varphi_2$ , получаем

$$\alpha_1 + \alpha_3 = 2 \alpha_2 \quad (521)$$

или

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} = 2 = V_1 + \frac{1}{V_2}. \quad (522)$$

Но помня (514), найдем

$$V_1 - \frac{1}{V_1} - 2 = 0, \quad (523)$$

а после умножения на  $V_1$

$$V_1^2 - 2 V_1 - 1 = 0. \quad (524)$$

Решая это уравнение, получаем

$$V_1 = 1 \pm \sqrt{2}. \quad (525)$$

Сообразно этим корням получаем два значения увеличения для всей системы

$$V = -V_1^2 = -(1 \pm \sqrt{2})^2 = -3 \pm 2\sqrt{2}, \quad (526)$$

откуда диапазон увеличений всей системы равен

$$\frac{V'}{V''} = \frac{3 + 2\sqrt{2}}{3 - 2\sqrt{2}} = (3 + 2\sqrt{2})^2 = 17 + 12\sqrt{2}. \quad (527)$$

2. Оба компонента панкратической системы имеют одинаковые фокусные расстояния по абсолютной величине, но различные по знаку  $\varphi_1 = -\varphi_2$  (рис. 81).

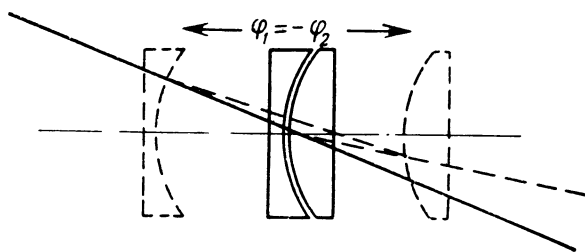


Рис. 81

Тогда при длине панкратической системы  $L=0$  формула (508) принимает вид

$$V_1 + \frac{1}{V_1} = V_2 + \frac{1}{V_2}. \quad (528)$$

Решение этого уравнения дает два корня:

$$V_2 = V_1; \quad V_2 = \frac{1}{V_1}. \quad (529)$$

Отсюда находим также два корня для общего увеличения:

$$V = V_1^2; \quad V = 1. \quad (530)$$

Второй корень дает постоянное увеличение и потому не имеет практического значения.

Заметим, что общее увеличение в этом частном случае всегда остается положительным.

Рассмотрим случай существования системы только этого вида, полагая, как и ранее, воздушный промежуток  $d=0$ . Находим на основании (520)

$$\alpha_2 - \alpha_1 = -\alpha_3 + \alpha_2, \quad (531)$$

откуда

$$\alpha_1 = \alpha_3; \quad V = 1. \quad (532)$$

Определим отрезки между предметом и первым компонентом, между вторым компонентом и изображением для различных зна-

чений увеличения  $V_1$  первого компонента. Обращаясь к (517), получаем

$$s_1 = \left( \frac{1}{V_1} - 1 \right) f_1'; \quad s_2' = (1 - V_2) f_2'. \quad (533)$$

Дадим геометрическую интерпретацию рассмотренных частных случаев.

Обратимся к первому случаю. Полагая увеличение  $V_1$  первого компонента равным одному из корней, определяющих граничный случай, например

$$V_1 = 1 + \sqrt{2}, \quad (534)$$

можно проследить поведение системы для ряда других увеличений; особо обратим внимание на положение обоих компонентов

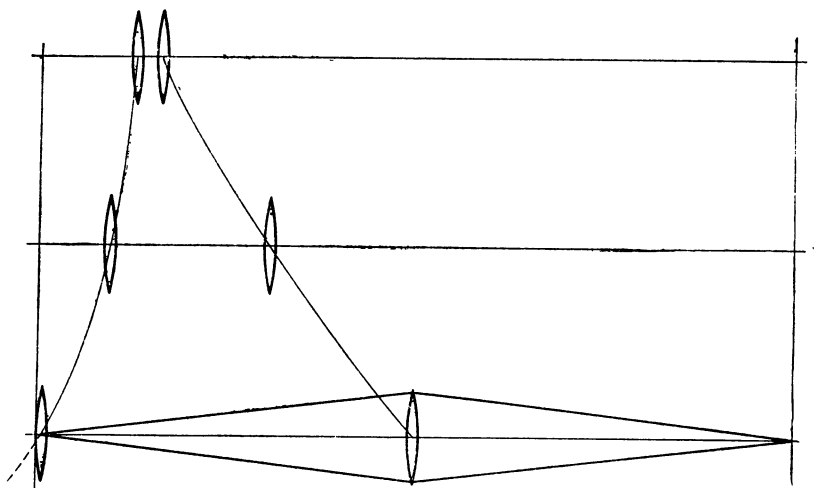


Рис. 82

для общего увеличения  $V = -1$ . Чтобы получить такое увеличение, необходимо иметь увеличение первого компонента  $V_1 = +1$ ; при этом первый компонент должен совпасть своей передней главной плоскостью с предметом, а второй компонент будет иметь увеличение  $V_2 = -1$  и расположится на расстоянии, равном половине расстояния между предметом и изображением.

При дальнейшем понижении общего увеличения  $V$  (меньше единицы по абсолютной величине) первый компонент перейдет через плоскость предмета и начнет удаляться в бесконечность. В пределе получим, очевидно, общее увеличение, равное нулю; второй компонент при этом будет отстоять от плоскости изображения на величину своего фокусного расстояния. Картина зависимости

положения обоих компонентов от величины общего увеличения системы  $V$  представлена на рис. 82.

Совершенно аналогично, приравнявая увеличение первого компонента второму корню уравнения, определяющего граничный случай, можем проследить изменение положения обоих компонентов системы при росте общего увеличения; при этом также обратим внимание на расположение обоих компонентов при общем увеличении  $V = -1$ .

Нетрудно усмотреть, что тогда второй компонент должен совпасть своей задней главной плоскостью с изображением, а первый компонент, имея увеличение  $V = -1$ , займет положение посередине между предметом и изображением. При дальнейшем росте увеличения по своей абсолютной величине второй компонент должен перейти через изображение и устремиться в бесконечность.

Эта зависимость достаточно наглядно представлена на рис. 83. Переход того или иного компонента через плоскость предмета или

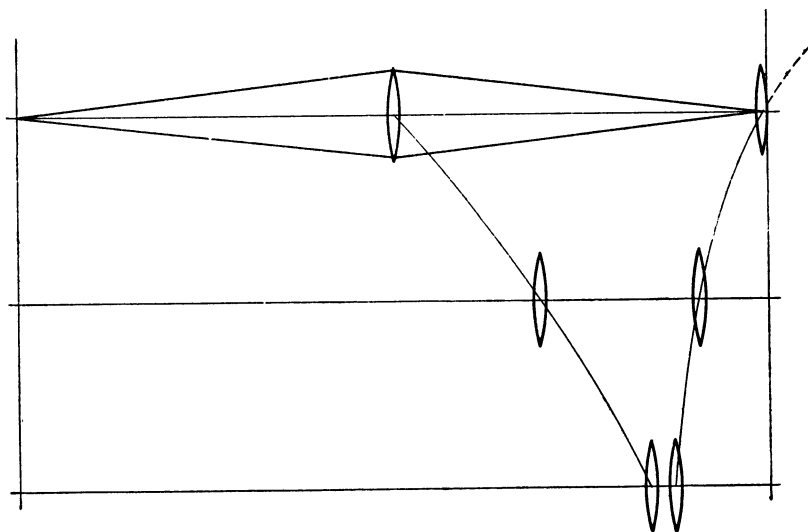


Рис. 83

изображения хотя и возможен, но практически нежелателен; было бы весьма естественно ограничить движение обоих компонентов промежутком между предметом и его изображением. Таким образом, можно было бы представить себе, что в обоих случаях вторым граничным увеличением окажется увеличение, равное минус единице.

Тем не менее технически вполне возможно существенно расширить диапазон увеличений путем соединения частей интервалов, принадлежавших граничным корням, в которых оба компонента системы не выходят за пределы пространства между предметом

и изображением. Для этого можно взять от первого граничного корня интервал увеличений от  $V = -3 - 2\sqrt{2}$  до  $V = -1$  и от второго корня интервал увеличений от  $V = -3 + 2\sqrt{2}$  до  $V = -1$ .

При этом для перехода от одного интервала увеличений к другому необходимо выполнить перемещение обоих компонентов так, чтобы расстояние между ними равнялось удвоенному фокусному расстоянию, а общее увеличение было постоянным и равнялось минус единице.

Такое искусственное соединение этих двух интервалов проиллюстрировано на рис. 84.

Второй частный случай — случай равенства сил обоих компонентов по абсолютной величине при разных знаках сил —  $\varphi_1 = \varphi_2$  возможен лишь при отклонениях от исходного общего увеличения  $V = +1$  в ту или другую сторону без ограничений.

Следует напомнить, что оба частных случая, рассмотренных нами, были построены при значениях  $L$ , существенно упрощающих уравнения, которые связывают увеличения обоих компонентов системы; на практике вполне возможны и другие значения расстояний  $L$ .

Естественно, что, принимая для расстояний между предметом и изображением иные значения величины  $L$ , должны будем получить и другие зависимости для положения компонентов системы при изменении общего увеличения.

Однако общий характер этих зависимостей должен оставаться более или менее подобным тому, который был рассмотрен уже нами выше.

Возвращаясь к (508) и умножая на увеличение первого компонента  $V_1$ , получаем

$$[2(f_1' + f_2') - L]V_1 = (V_1^2 + 1)f_1' + \left(V + \frac{V_1^2}{V}\right)f_2', \quad (535)$$

откуда нетрудно образовать квадратное уравнение для увеличения первого компонента  $V_1$

$$\left(f_1' + \frac{f_2'}{V}\right)V_1^2 - [2(f_1' + f_2') - L]V_1 + f_1' + Vf_2' = 0. \quad (536)$$

Решая это уравнение, найдем

$$V_1 = \frac{2(f_1' + f_2') - L \pm \sqrt{[2(f_1' + f_2') - L]^2 - 4\left(f_1' + \frac{f_2'}{V}\right)(f_1' + Vf_2')}}{2\left(f_1' + \frac{f_2'}{V}\right)}. \quad (537)$$

Определив увеличение первого компонента  $V_1$ , на основании (513) можем определить увеличение второго компонента  $V_2$ , а затем по (517) вычислить отрезки  $s_1$  и  $s_2'$ , характеризующие положение обоих компонентов.



Рассмотрев работу панкратической системы из двух положительных линз, мы видим, что между движением обоих компонентов наблюдается нелинейная зависимость, что в значительной степени усложняет конструкцию системы.

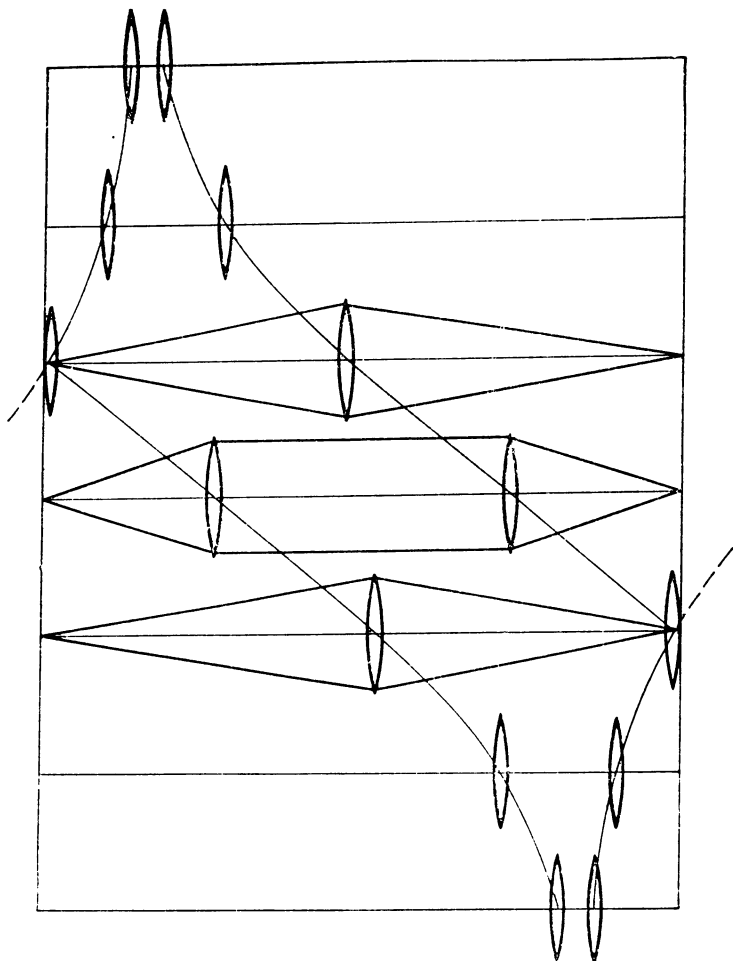


Рис. 84

Вместе с тем, анализируя работу отдельного движущегося положительного компонента, можно установить, что при его движении в ту и другую сторону от исходного положения определяемого увеличения  $V = -1$ , расстояние  $L$  между предметом и изображением возрастает, что равносильно в первом приближении квадратичной зависимости от изменения увеличения; пользуясь же отрицательным компонентом, для которого расстояние  $L$  от-

рицательно при увеличении  $V = -1$ , встретимся с укорочением расстояния между предметом и изображением при изменении увеличения как в ту, так и в другую сторону от  $V = -1$ , т. е. тоже с квадратичной зависимостью.

В принципе это позволяет, сочетая определенным образом движения положительного и отрицательного компонентов, добиться взаимной компенсации изменений длины всей системы в совокупности; в частности, подобная совокупность положительного и отрицательного компонентов уже встречалась при рассмотрении раздвижного коллектива.

Компенсация изменения расстояний между предметом и изображением может быть осуществлена также при трех или большем числе компонентов; особый интерес представляет для нас система, построенная из двух одинаковых положительных компонентов с одним отрицательным компонентом между ними. В подобного рода системах может быть достигнута хорошая взаимокompенсация изменений расстояний между предметом и изображением при линейных перемещениях компонентов друг относительно друга: в частности, движение обоих положительных компонентов может быть совместным, а движение отрицательного компонента — линейным; более того, соответственным подбором соотношений между силами всех трех компонентов и расстояниями между компонентами можно обеспечить неподвижность отрицательного компонента.

Анализ работы трехкомпонентной панкратической системы ввиду его сложности здесь производить не будем и ограничимся лишь приведением данных для двух трехкомпонентных панкратических систем.

Пример. Система с подвижным отрицательным компонентом  $\varphi_1 = 1,0$ ;  $\varphi_2 = -2,26$ ;  $\varphi_3 = \varphi_1 = 1,0$ ;

$$V_1 = -1; \quad s_1 = -3,817; \quad d_1 = 0,47; \quad d_2 = 0,47; \quad s_3' = 3,817;$$

$$V_2 = -2,03; \quad s_2 = -3,217; \quad d_1 = 0,6725; \quad d_2 = 0,2675; \quad s_3' = 4,417.$$

Максимальное изменение расстояния  $\Delta L$  между предметом и изображением для этой системы не превосходит  $-0,0084$  во всем диапазоне увеличений от  $V = -2,03$  до  $V = \frac{1}{2,03}$ . Схема этой системы приведена на рис. 85, а.

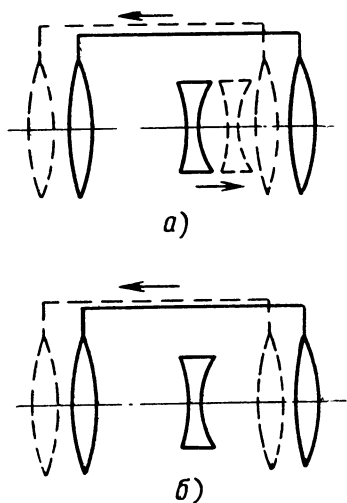


Рис. 85

II пример. Система с неподвижным отрицательным компонентом  $\varphi_1 = 1,0$ ;  $\varphi_2 = -2,2222$ ;  $\varphi_3 = 1,0$ ;  $-s_1 + d_1 = 3,266 = \text{const}$

$V$	$s_1$	$d_1$	$d_2$	$\Delta L$	
-2,031	-2,221	1,045	0,485	0,00016	$d_1 + d_2 = 1,530 = \text{const.}$
-1,789	-2,272	0,994	0,536	-0,0049	
-1,001	-2,501	0,765	0,765	0,0000	
-0,559	-2,730	0,536	0,994	-0,0053	
-0,426	-2,841	0,425	1,105	-0,0011	
-0,416	-2,851	0,415	1,115	-0,0003	
-0,412	-2,855	0,411	1,119	+0,0002	

Схема этой системы приведена на рис. 85, б.

---

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

# РАСЧЕТ ПРИЗМ

---

### Глава IX

## ЭЛЕМЕНТЫ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПРИЗМ

### § 34. Задачи, решаемые при помощи призм

Использование той или иной оптической системы в каком-либо оптическом приборе нередко ставит перед конструктором задачи, решение которых не всегда можно осуществить при помощи централизованной оптической системы с прямой осью; в равной степени встречается необходимость создания определенного поворота изображения, изменения оси визирования и т. п. Все эти задачи приходится разрешать при помощи зеркал, отражательных и преломляющих призм.

Исходя из этого, можно сформулировать следующие задачи, решение которых требует отказа от использования только строго централизованных систем. Применение в оптической системе призм и зеркал обеспечивает:

- 1) изменение направления оси системы (постоянное или переменное) при переходе от пространства предмета к пространству изображений;
- 2) поступательное смещение оси системы;
- 3) оборачивание изображения (постоянное или переменное);
- 4) изменение увеличения в одном или различных направлениях;
- 5) исправление некоторых аберраций, возникающих при создании нецентрированных оптических систем (кособокий астигматизм, наклон плоскости изображения, кособокая кома, дисторсия, хроматизм увеличения).

Для успешного решения перечисленных задач необходимо познакомиться с основными свойствами зеркал и призм как отражательных, так и преломляющих, а также с основными методами и приемами расчета призм и зеркал, применяемыми в настоящее время (§ 35).

### § 35. Работа одного плоского зеркала

Обратимся к рис. 86, а;  $N_1N_2$  — сечение плоскости зеркала плоскостью чертежа; нормали в точках  $N_1$  и  $N_2$ , соответствующих точкам отражения двух параллельных лучей  $1-N_1-1'$  и  $2-N_2-2'$ ,

предполагаются совпадающими с плоскостью чертежа, равно как и направление хода названных лучей.

Расстояние между лучами 1 и 2 примем равным  $h$ . Тогда, поскольку оба луча параллельны, угол падения  $i$  равен углу отражения  $i'$ , то

$$i_1' = -i_1 = -i_2 = i_2', \quad (538)$$

$$h = N_1 N_2 \cos i = -h'. \quad (539)$$

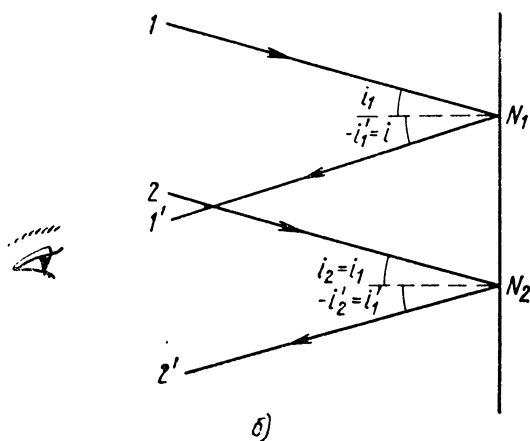
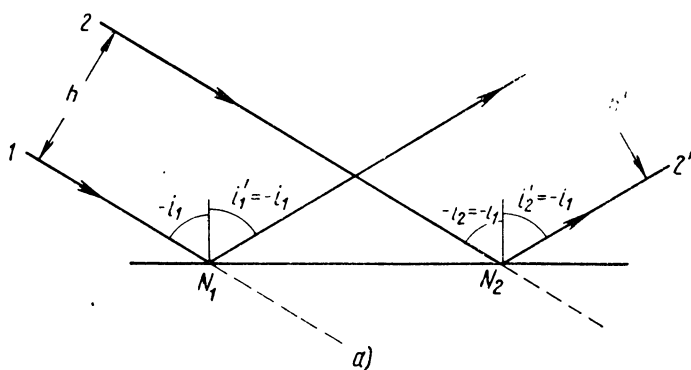


Рис. 86

Из (539) следует, что ширина параллельного пучка лучей, отраженного от плоского зеркала, остается равной ширине падающего пучка; единственным отличием будет то обстоятельство, что в отраженном от зеркала пучке оба падающие луча поменяются своими местами (нижний падающий луч 1 станет верхним отра-

женным лучом  $1'$  и, наоборот, верхний падающий луч 2 делается нижним отраженным лучом  $2'$ ).

Все это позволяет рассматривать явление отражения параллельного пучка лучей от плоского зеркала как процесс преобразования пучка, производимого телескопической системой с увеличениями

$$V_t = W_t = -1. \quad (540)$$

При этом плоскость рисунка следует рассматривать как некоторую меридиональную плоскость.

Если некоторый луч  $3-3'$  параллелен лучу  $1-1'$ , но лежит в сагиттальной плоскости (перпендикулярной плоскости чертежа и не показанной на чертеже), то для этого случая и падающий и отраженный лучи не поменяются своими местами, а увеличение

$$V_s = W_s = +1. \quad (541)$$

Таким образом, в этих двух взаимно перпендикулярных плоскостях получены угловые увеличения разных знаков, вследствие чего в меридиональной плоскости и произошло оборачивание изображения при отсутствии оборачивания в сагиттальной плоскости (возникает так называемое зеркальное изображение).

Рассмотрим случай, когда отраженные от плоского зеркала пучки лучей направлены в обратном направлении (рис. 86, б). При этом глаз наблюдателя расположен слева, и, таким образом, отраженные лучи  $1'$  и  $2'$  останутся с той же стороны плоскости  $N_1N_2$ , что и на рис. 86, а.

Поэтому оба линейных увеличения  $V_t$  и  $V_s$  окажутся равными единице

$$V_t = V_s = +1. \quad (542)$$

Тем не менее оба угловых увеличения  $W_t$  и  $W_s$  будут равными минус единице

$$W_t = W_s = -1, \quad (543)$$

так как углы, образованные отраженными лучами и нормалью, меняют свои знаки на обратные. Это явление полностью соответствует случаю телескопической системы, если явление отражения от зеркала рассматривать как преломление при

$$n' = -n. \quad (544)$$

Действительно, инвариант Лагранжа—Гельмгольца

$$y \alpha n = y' \alpha' n' \quad (545)$$

при условии (544) дает

$$y \alpha = -y' \alpha' \quad (546)$$

или

$$\frac{y' \alpha'}{y \alpha} = VW = -1, \quad (547)$$

откуда при  $V = 1$  угловое увеличение  $W = -1$ .

Заметим, что для наблюдателя, расположенного справа от зеркала, отраженное изображение будет казаться неперевернутым и незеркальным; но для наблюдателя, расположенного слева и рассматривающего изображение с другой стороны, возникает зеркальность изображения.

Выведенные формулы (540), (541), (542), (543) и (547) вполне определяют собой ход всех отраженных от зеркала лучей, если известен ход одного отраженного параллельного пучка лучей.

Эти формулы характеризуют свойства зеркала на основании свойств телескопической системы; в равной степени известные нам свойства зеркала могут быть получены в соответственной телескопической системе с различными по знаку угловыми увеличениями, но по абсолютной величине равными единице (например, в телескопической системе, построенной из двух цилиндрических линз с равными фокусными расстояниями).

Из рис. 86, *а* нетрудно видеть, что оборачивание изображения происходит только в плоскости рисунка, называемой меридиональной, а также плоскостью главного сечения зеркала; эта плоскость может быть определена так же, как плоскость, проходящая через падающий луч и нормаль к зеркалу, восстановленную в точке падения луча.

Если нормаль к зеркалу будем вращать вокруг падающего луча, то вместе с нормалью будет вращаться и главное сечение зеркала; вместе же с вращением главного сечения будет изменяться и направление оборачивания изображения, т. е. произойдет вращение изображения.

Наоборот, если имеем случай, представленный на рис. 86, *б*, то видим, что при вращении нормали зеркала вокруг падающего луча изображение не будет вращаться, так как угловое увеличение в любых направлениях имеет один и тот же знак и положение главного сечения зеркала не влияет на оборачивание изображения.

Применение плоского зеркала обычно преследует цель отклонить отраженный луч от направления падающего луча на некоторый угол  $\epsilon$ ; величина этого угла определится для первого случая работы зеркала как  $180^\circ - 2i$ , а для второго случая — как  $2i$ .

### § 36. Отражение от системы двух зеркал

Предположим, что имеем два зеркала, главные сечения которых совпадают, или, иными словами, луч, упавший на первое зеркало, не выходит после обоих отражений из одной и той же плоскости. На рис. 87:  $i_1$  и  $i_1'$  — углы падения и отражения на первом зеркале *A* в некоторой точке  $N_1$ ;  $i_2$  и  $i_2'$  — углы падения и отражения на втором зеркале *B* в точке  $N_2$ ;  $\alpha$  — угол между зеркалами;  $\epsilon$  — угол отклонения дважды отраженного луча от первоначального направления.

На основании ранее проведенных рассуждений нетрудно установить, что после отражения от двух зеркал приходим к случаю телескопической системы с угловыми увеличениями  $W_t = W_s = +1$ ; поэтому поворот падающего на систему зеркал луча на некоторый угол  $\beta$  будет соответствовать повороту отраженного после зеркал луча на тот же самый угол  $\beta$  и в том же направлении; кроме того, зеркальность изображения также будет отсутствовать.

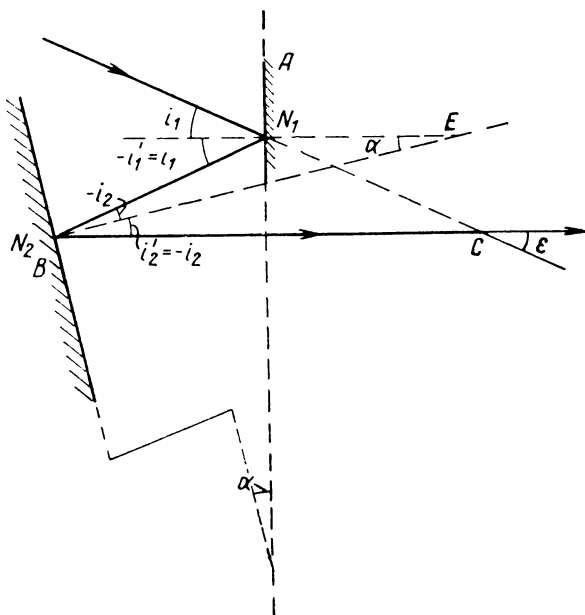


Рис. 87

Нас, очевидно, должна интересовать величина отклонения отраженного луча от его первоначального направления, которая согласно предыдущему должна оказаться постоянной и не зависящей от угла  $i_1$  падения луча на первое зеркало. Из треугольника  $N_1N_2C$

$$2i_1 = \varepsilon - 2i_2, \quad (548)$$

откуда

$$\varepsilon = 2(i_1 + i_2); \quad (549)$$

из треугольника  $N_1N_2E$

$$i_1 = \alpha - i_2, \quad (550)$$

а следовательно,

$$\varepsilon = 2\alpha \quad (551)$$

и не зависит (как и говорилось) от величины угла  $i_1$ .



Рассмотрим случай, когда отраженный пучок лучей направлен влево (рис. 88); отражение на первом зеркале  $A$  происходит так же, как в первом случае работы простого зеркала, когда считали, что первая и вторая среды имеют один и тот же коэффициент преломления. На втором же зеркале  $B$  отражение происходит наоборот, подобно второму случаю работы простого зеркала, т. е. при разных знаках коэффициентов преломления у второй и третьей среды. Исходя из этого, установим, что знаки показателей преломления первой и последней среды следует считать различными. Отсюда нетрудно установить и знаки увеличений:

$$V_t = -1 = W_i; \quad V_s = 1 = -W_s. \quad (552)$$

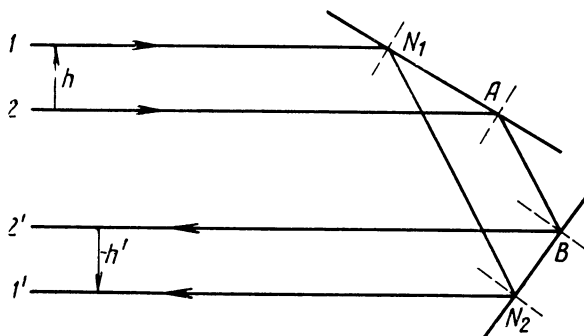


Рис. 88

Таким образом, эта система зеркал в отличие от предшествующей будет иметь разные знаки для угловых увеличений и сохранит постоянство угла отклонения лишь в плоскости главного сечения; но возникающая в ней зеркальность изображения при наблюдателе, расположенном справа, будет скомпенсирована переходом наблюдателя влево. Кроме того, при вращении плоскости главного сечения этой системы вокруг входящего луча и в связи с изменением направления обораживания произойдет вращение изображения. Угол отклонения луча в этом случае можно определить по формуле

$$\epsilon = 180^\circ - 2\alpha. \quad (553)$$

Разбирая работу системы двух зеркал, необходимо обратить внимание на то, что вполне возможно осуществление непрерывного перехода от первого из рассматриваемых случаев ко второму. Однако при таком переходе должно произойти, во-первых, изменение знака у одного из коэффициентов преломления (например, у последней среды) и, во-вторых, изменение положения наблюдателя. Оба эти изменения суть изменения скачкообразные; чтобы не нарушить справедливости всех ранее сделанных выводов, оба

изменения должны происходить одновременно, равно как и переход от (551) к (553).

Существенно, что в системе двух зеркал в обоих случаях сохраняются незеркальность изображения и постоянство угла отклонения в общей плоскости главного сечения; сохранение же постоянства угла отклонения во второй плоскости возможно лишь для одного первого случая расположения наблюдателя.

Для системы из двух зеркал может быть и такой случай, когда главное сечение первого зеркала окажется перпендикулярным главному сечению второго зеркала; рассматривая такую систему зеркал как телескопическую и полагая, что при обоих отражениях наблюдатель находится справа, сейчас же придем к выводу, что и линейные и угловые увеличения в обеих плоскостях будут равны минус единице

$$V_t = V_s = W_t = W_s = -1. \quad (554)$$

Таким образом, эта система зеркал будет давать полное обращение изображения, и изображение будет получаться незеркальным.

Кроме того, так как угловое увеличение в обоих направлениях равно минус единице, то изменение угла отклонения пучков в обоих направлениях будет аналогично отражению от плоского зеркала в обратном направлении.

### § 37. Отражение от системы трех зеркал

Отражение от системы трех зеркал может происходить либо тогда, когда главные сечения всех трех зеркал совпадают, либо тогда, когда такого совпадения нет и получаем пространственный ход луча. Первый случай всегда может быть сведен к двум первым случаям отражения от одного плоского зеркала; в этом нетрудно убедиться, рассматривая возможные при таких трех зеркалах комбинации увеличений.

Кроме того, присоединяя к системе двух зеркал третье, совпадающее своим главным сечением с главным сечением двух первых зеркал, добавляем к постоянному углу отклонения луча до двух первых зеркал переменный угол отклонения от третьего зеркала. Точно так же к незеркальности изображения после двух первых зеркал присоединится зеркальность от третьего отражения. Эти соображения могут быть распространены на любые числа зеркал, главные сечения которых лежат в одной и той же плоскости (системы из нечетного числа зеркал всегда будут эквивалентны одному плоскому зеркалу; системы же из четного числа зеркал — системе из двух зеркал).

Таким образом, система из трех зеркал с общей плоскостью всех трех главных сечений не обладает какими-либо новыми оптическими свойствами. Однако случай, когда три зеркала не совпадают своими главными сечениями, представляет особый интерес.

Действительно, сочетая случай системы двух зеркал с главными сечениями, находящимися во взаимно перпендикулярных плоскостях, со случаем зеркала, дающего отраженный пучок' лучей в обратном направлении, приходим к системе, у которой линейное увеличение в обеих плоскостях будет равно минус единице при показателе преломления последней среды с обратным знаком по отношению к первой среде; вследствие этого получим

$$W_t = W_s = 1. \quad (555)$$

Этот последний — шестой случай дает нам систему, обладающую постоянством угла отклонения в обеих плоскостях при обратном ходе отраженных пучков.

Нетрудно видеть, что все рассмотренные шесть случаев полностью исчерпывают все возможные комбинации угловых увеличений как при прямом, так и при обратном ходе отраженных лучей.

Сведем эти шесть случаев в единую таблицу.

I. Прямой ход;  $W_t = W_s = 1$ ; система из двух зеркал с совпадающими главными сечениями.

II. Прямой ход;  $W_t = -1$ ;  $W_s = 1$ ; одно зеркало (две ориентировки).

III. Прямой ход;  $W_t = W_s = -1$ ; система из двух зеркал с перпендикулярными главными сечениями.

IV. Обратный ход;  $W_t = W_s = 1$ ; система из трех зеркал.

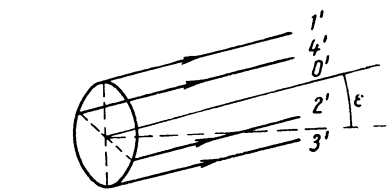
V. Обратный ход;  $W_t = -1$ ;  $W_s = 1$ ; система из двух зеркал с совпадающими главными сечениями (две ориентировки).

VI. Обратный ход;  $W_t = W_s = -1$ ; одно зеркало, работающее с обратным ходом отраженных лучей. Картины хода лучей, иллюстрирующие все шесть случаев, представлены на рис. 89, а, б, в, г, д, е, ж, з.

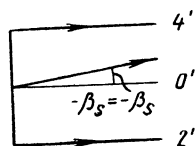
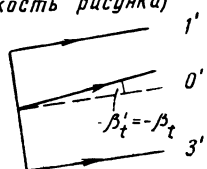
### § 38. Вращение изображения

Выше уже говорилось, что при вращении системы зеркал в двух случаях (во втором и пятом) происходит вращение изображения, так как знаки угловых увеличений в обеих взаимно перпендикулярных плоскостях различны. Рассмотрим вращение изображения более детально. Обратимся к рис. 90, на котором показан вид изображения вдоль оси пучка до и после его отражения в системе зеркал.

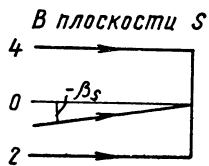
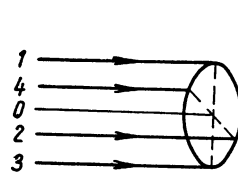
Нетрудно видеть, что при повороте плоскости  $AB$  вокруг оси пучка на некоторый угол  $\gamma$  по часовой стрелке сопряженная ей плоскость  $AB'$  после отражения от системы зеркал повернется на угол  $\gamma$  в противоположном направлении, если изображение обрабатывалось только вдоль направления 2-4. Отсюда легко можно прийти к выводу, что при повороте системы зеркал на угол  $\gamma$  вокруг оси входящего в нее пучка лучей отраженный системой пу-



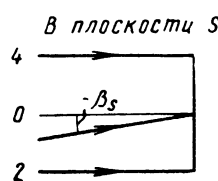
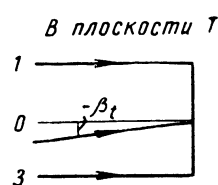
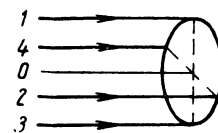
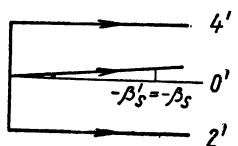
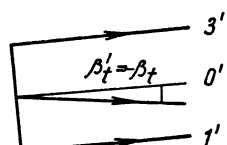
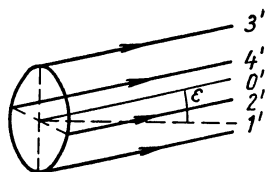
(плоскость рисунка)



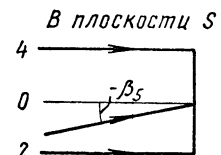
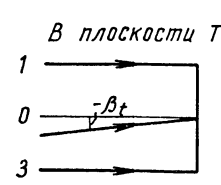
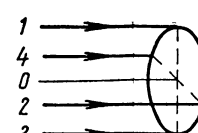
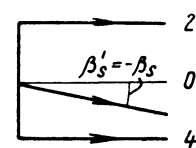
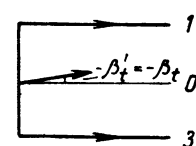
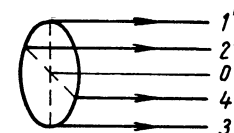
а)



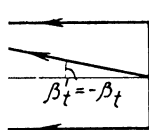
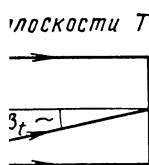
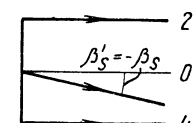
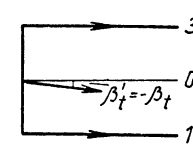
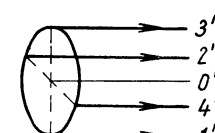
б)



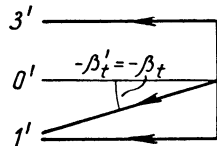
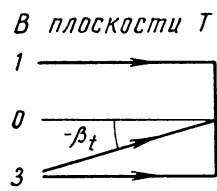
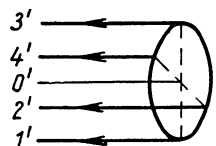
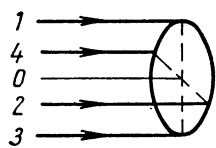
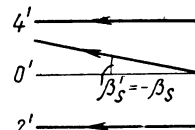
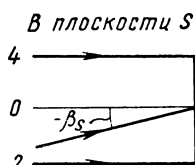
в)



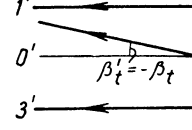
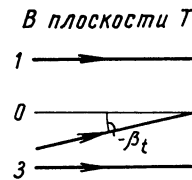
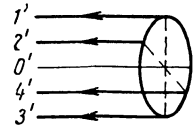
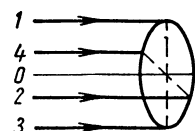
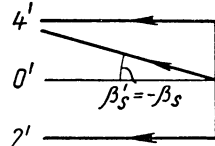
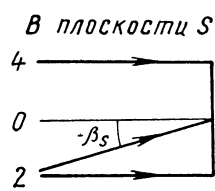
г)



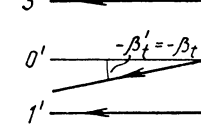
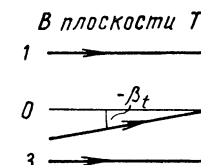
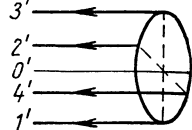
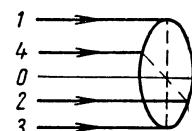
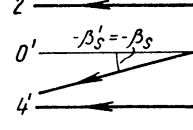
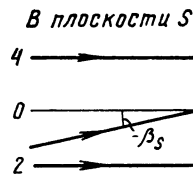
д)



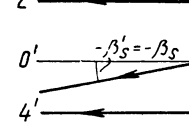
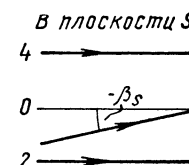
е)



ж)



з)



чок лучей повернется относительно своего первоначального положения на угол  $2\gamma$ , т. е. изображение будет вращаться в ту же сторону со скоростью, вдвое большей, чем скорость вращения самой системы зеркал.

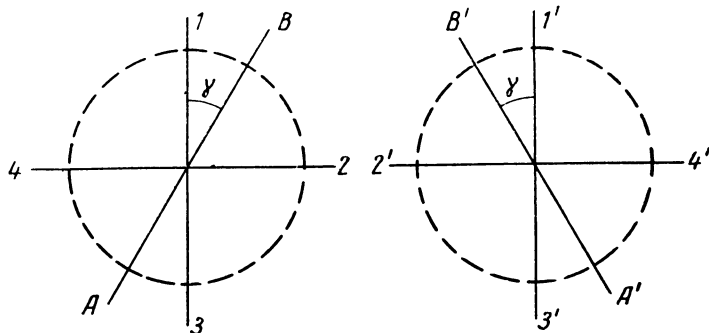


Рис. 90

Таким образом, система с неполным оборачиванием (оборачиванием в одной плоскости), будучи неподвижной, может изменять направление вращения изображения на обратное, а при своем вращении вокруг оси пучка создавать вращение отраженного пучка в том же направлении, но с удвоенной скоростью.

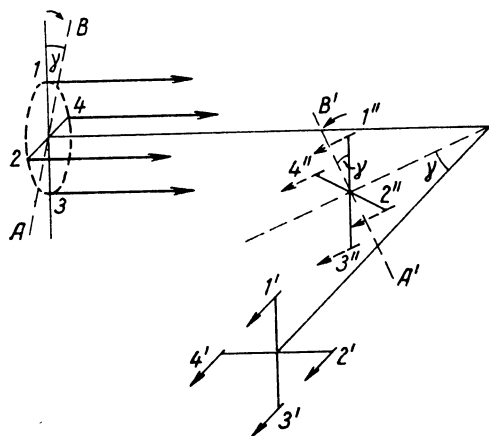


Рис. 91

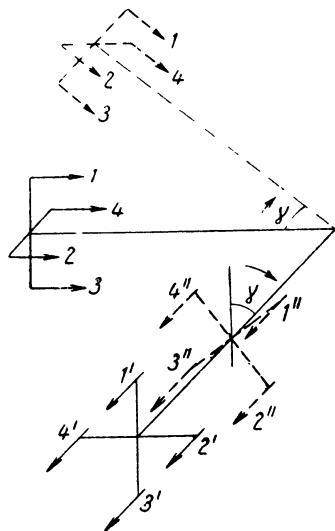


Рис. 92

Заметим, что вращение изображения с удвоенной скоростью будет наблюдаться только в том случае, когда наблюдатель сохраняет свое первоначальное положение; если это условие не будет

соблюдаться (например, в случае вращения самого наблюдателя вместе с системой), то скорость вращения изображения не увеличивается вдвое. Действительно, если наблюдатель будет составлять как бы единое целое с плоскостью главного сечения системы, то в этом случае он сможет обнаружить лишь поворот изображения относительно плоскости главного сечения, равный, как уже говорилось, углу поворота самой системы. Точно такое же явление будет наблюдаться, когда входящий пучок лучей связан с вращающейся системой, которая сама будет вращаться вокруг оси выходящего пучка при неизменном положении наблюдателя в пространстве.

Этот последний случай, впрочем, вполне очевиден, так как при связанности входящего пучка с системой будет связанность с системой и выходящего пучка и, таким образом, будет наблюдаться лишь вращение вышедшего пучка лучей относительно наблюдателя (рис. 91 и 92).

## Глава X

### ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА

#### § 39. Общие свойства плоско-параллельной пластинки

Предположим, что имеем плоско-параллельную пластинку в воздухе (рис. 93). На рис. 93 показан ход произвольного луча, падающего на плоско-параллельную пластинку под углом  $i_1 = \alpha_1 = u_1$  к нормали и к оси пластинки. Расстояние от первой поверхности пластинки до точки пересечения луча с осью обозначим через  $s_1$ ; высоту луча на первой поверхности обозначим через  $h_1$  и на второй поверхности — через  $h_2$ ; показатель преломления пластинки примем равным  $n$ ; толщину пластинки — равной  $d$ ; отрезок от последней поверхности до точки пересечения выходящего луча с осью пусть будет  $s_2'$ ; угол преломления луча на первой поверхности  $i_1'$  будет равен углу  $\alpha_2 = u_2$  пересечения преломленного луча с осью и углу падения  $i_2$  — на вторую поверхность.

На основании закона преломления

$$n \sin i_1' = \sin i_1 = n \sin i_2 = \sin i_2'. \quad (556)$$

Из рис. 93 следует

$$u_3 = i_2' = i_1 = u_1. \quad (557)$$

Кроме того,

$$h_2 - h_1 = -d \operatorname{tg} u_2, \quad (558)$$

откуда

$$h_2 = h_1 - d \operatorname{tg} u_2. \quad (559)$$

Нетрудно выразить через высоты  $h_2$  и  $h_1$  отрезки  $s_2'$  и  $s_1$  до точки пересечения луча с осью до и после прохождения его через плоско-параллельную пластинку. Имеем

$$s_2' = \frac{h_2}{\operatorname{tg} u_3} = \frac{h_2}{\operatorname{tg} u_1}; \quad s_1 = \frac{h_1}{\operatorname{tg} u_1}. \quad (560)$$

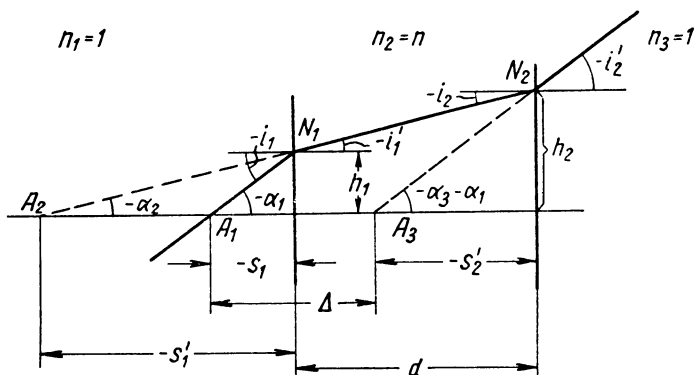


Рис. 93

Деля обе части равенства (559) на  $\operatorname{tg} u_1$ , получаем

$$s_2' = s_1 - \frac{\operatorname{tg} u_2}{\operatorname{tg} u_1} d. \quad (561)$$

Учитывая (556) и (557), преобразуем (561)

$$s_2' = s_1 - \frac{\cos u_1}{\cos u_2} \cdot \frac{d}{n} \quad (562)$$

или, выражая косинусы через синусы,

$$s_2' = s_1 - \frac{d}{n} \sqrt{\frac{1 - \sin^2 u_1}{1 - \frac{\sin^2 u_1}{n^2}}}. \quad (563)$$

Из (563) следует, что при конечных значениях угла  $u_1$  и постоянном  $s_1$  отрезок  $s_2'$  не будет постоянным.

При малых же углах  $u_1$ , когда можно пренебречь величиной  $\sin^2 u_1$  по отношению к единице, (563) будет иметь вид

$$s_{02}' = s_1 - \frac{d}{n}. \quad (564)$$

Заметим, что эта приближенная формула является основой метода редуцирования плоско-параллельной пластинки к воздуху. Определим смещение изображения  $\Delta$ . Из рис. 93.

$$\Delta - s_2' = -s_1 + d, \quad (565)$$

откуда, учитывая (563), получаем

$$\Delta = d + s_2' - s_1 = \left[ 1 - \frac{1}{n} \sqrt{\frac{1 - \sin^2 u_1}{1 - \frac{\sin^2 u_1}{n^2}}} \right] d. \quad (566)$$

Эта формула показывает, что смещение изображения  $\Delta$  не зависит от положения предмета относительно пластинки; поступательное перемещение пластинки относительно предмета не вызывает какого-либо дополнительного смещения изображения.

Пользуясь (564), легко получим приближенную формулу для смещения изображения, т. е.

$$\Delta_0 = (n - 1) \frac{d}{n}. \quad (567)$$

Определим сферическую aberrацию плоско-параллельной пластинки. Для этого достаточно составить разность отрезков  $s_2' - s'_{02}$  или разность смещений изображений  $\Delta - \Delta_0$ .

Получаем

$$\Delta s' = s_2' - s'_{02} = \left[ 1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 u_1}{1 - \frac{\sin^2 u_1}{n^2}}} \right] \frac{d}{n}. \quad (568)$$

Пренебрегая в (568) значением  $u_1$  в степени выше третьей, получаем приближенное значение для сферической aberrации III порядка плоско-параллельной пластинки.

$$\Delta s_{III}' = \left[ 1 - \frac{1 - \frac{u_1^2}{2}}{1 - \frac{u_1^2}{2n^2}} \right] \frac{d}{n} \quad (569)$$

или после некоторых преобразований

$$\Delta s_{III}' = \frac{u_1^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{d}{n}. \quad (570)$$



Оценим порядок величин, полагая  $n = 1,5$ . В этом случае для смещения  $\Delta_0$  находим

$$\Delta_0 = \frac{d}{3}.$$

Для сферической аберрации III порядка

$$\Delta s_{III}' = \frac{5}{27} u_1^2 d < 0,2 u_1^2 d,$$

но при апертурных углах  $u \leq 0,1$  сферическая аберрация

$$\Delta s_{III}' < 0,002 d = \frac{d}{500}.$$

Оценим порядок сферической аберрации  $\Delta s'$  при больших углах, полагая, например, угол  $u = 45^\circ$ ;  $\sin^2 u = 0,5$ .

На основании (568) находим

$$\Delta s' = \left[ 1 - \sqrt{\frac{0,5}{1 - \frac{1}{4,5}}} \right] \frac{d}{n} = \left[ 1 - \sqrt{\frac{4,5}{7}} \right] \frac{d}{1,5} = \frac{d}{7,5}.$$

Эта величина несколько превышает сферическую аберрацию III порядка, вычисленную для  $\sin^2 u = 0,5$  и равную

$$\Delta s_{III}' \cong \frac{d}{10}.$$

Заметим, что сферическая аберрация плоско-параллельной пластинки всегда положительна и при малых значениях апертурного угла  $u$  ею можно вполне пренебречь.

При больших же апертурных углах сферическая аберрация, вносимая плоско-параллельной пластинкой, становится соизмеримой с толщиной пластинки.

Малость сферической аберрации плоско-параллельной пластинки при малых апертурных углах является второй из основ метода редуцирования плоско-параллельной пластинки к воздуху.

Хроматизм плоско-параллельной пластинки. Возвратимся к формуле (567). Дифференцируя формулу (567) по  $n$ , получаем величину хроматизма положения

$$\delta s' = \varepsilon \Delta_0 = \frac{d}{u^2} \delta n = \frac{n-1}{n^2} \cdot \frac{d}{v}. \quad (571)$$

Хроматизм увеличения, вносимый плоско-параллельной пластинкой, легко можно получить, умножая формулу (571) на полевой угол  $\beta'$ ,

$$\delta y' = \beta' \delta s'. \quad (572)$$

## § 40. Наклонная плоско-параллельная пластинка

Предположим, что имеем дело с плоско-параллельной пластинкой, наклоненной к оси системы под углом  $\beta$  (рис. 94). Поместим предметную точку  $A$  на первой поверхности нашей наклонной плоско-параллельной пластинки. Тогда в меридиональной и сагиттальной плоскостях вдоль луча можно принять

$$t_1 = s_1 = t_1' = s_1' = 0. \quad (573)$$

Точка  $A_1'$ , являющаяся предметной точкой для второй поверхности, совпадает с точкой  $A$  и, таким образом, отрезками  $s_2$  и  $t_2$  для второй поверхности будет расстояние между точками  $N_1$  и

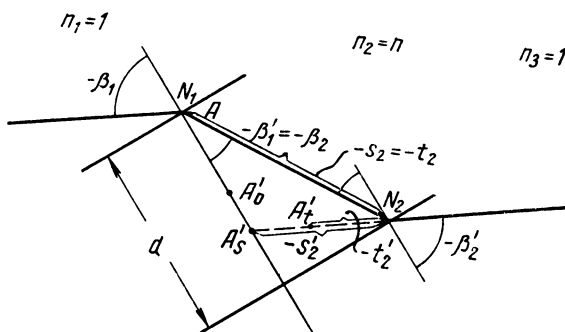


Рис. 94

$N_2$ . Это расстояние легко может быть выражено через толщину плоско-параллельной пластинки  $d$ . Имеем

$$s_2 = t_2 = -\frac{d}{\cos \beta_2}. \quad (574)$$

Пользуясь меридиональным и сагиттальным инвариантами вдоль луча, можем написать

$$\begin{aligned} \frac{n' \cos^2 i'}{t'} - \frac{n \cos^2 i}{t} &= 0, \\ \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} &= 0, \end{aligned} \quad (575)$$

так как правые части инвариантов ввиду равенства  $r = \infty$  обращаются в нуль. В нашем случае значения отрезков  $s$  и  $t$  определяются по формуле (574); показатель преломления  $n' = 1$ , роль угла  $i$  играет угол  $\beta_2$ , а угла  $i'$  — угол  $\beta_1$ .

Таким образом, формулы (575) можно преобразовать:

$$\frac{1}{t_2'} = -\frac{n}{d} \cdot \frac{\cos^3 \beta_2}{\cos^2 \beta_1} \quad (576)$$

и

$$\frac{1}{s_2'} = -\frac{n \cos \beta_2}{d} . \quad (577)$$

Нас интересуют проекции отрезков  $t_2'$  и  $s_2'$  на ось пластинки (ось пластинки предполагается нормальной к ее поверхности). Эти проекции равны

$$t_2' \cos \beta_1 = -\frac{\cos^3 \beta_1}{\cos^3 \beta_2} \cdot \frac{d}{n} \quad (578)$$

и

$$s_2' \cos \beta_1 = -\frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \cdot \frac{d}{n} . \quad (579)$$

Зная эти проекции, аналогично смещению изображения для не-наклонной пластинки можем вычислить меридиональное  $\Delta_t$  и сагиттальное  $\Delta_s$  смещения изображения:

$$\Delta_t = d + t_2' \cos \beta_1 = \left(1 - \frac{1}{n} \frac{\cos^3 \beta_1}{\cos^3 \beta_2}\right) d, \quad (580)$$

$$\Delta_s = d + s_2' \cos \beta_1 = \left(1 - \frac{1}{n} \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}\right) d. \quad (581)$$

Нетрудно составить отношение меридионального и сагиттального смещения изображения. Деля (580) на (581), получаем

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_s} = \frac{1 - \frac{1}{n} \frac{\cos^3 \beta_1}{\cos^3 \beta_2}}{1 - \frac{1}{n} \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}} \Bigg\} . \quad (582)$$

Определим порядок величины, полагая  $n = 1,5$  и угол  $\beta = 45^\circ$ .

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_s} \cong \frac{1 - \frac{1}{1,5} 0,8^3}{1 - \frac{1}{1,5} 0,8} \cong 1,5.$$

Отношение же сагиттального смещения изображения к смещению вдоль оси будет

$$\frac{\Delta_s}{\Delta_0} = \frac{1 - \frac{1}{n} \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}}{1 - \frac{1}{n}} . \quad (583)$$

После подстановки чисел для рассматриваемого случая найдем

$$\frac{\Delta_s}{\Delta_0} \cong \frac{1 - \frac{1}{1,5} 0,8}{1 - \frac{1}{1,5}} \cong 1,35.$$

Формулы (582) и (583) показывают, что смещения изображения для наклонной плоско-параллельной пластинки в меридиональной и сагиттальной плоскостях получаются существенно различными при больших углах наклона и их следует всегда учитывать.

## Глава XI

### ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ПРИЗМЫ

#### § 41. Преломление пучка на наклонной плоскости

Предположим, что имеем наклонную плоскость, разделяющую две среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$  (рис. 95). Падающий пучок лучей образует при своем преломлении углы  $i$  и  $i'$ ; примем ширину падающего пучка равной  $h$ , а ширину преломленного пучка —  $h'$ , тогда

$$N_1 N_2 = \frac{h}{\cos i} = \frac{h'}{\cos i'}, \quad (584)$$

откуда линейное увеличение

$$V_t = \frac{h'}{h} = \frac{\cos i'}{\cos i} \neq 1. \quad (585)$$

Сагиттальное увеличение  $V_s$  сохранится равным единице. Определим угловые увеличения для этого случая. Обращаясь к (65), можем написать

$$VW = \frac{n}{n'}, \quad (586)$$

а зная увеличения  $V_t$  и  $V_s$ , легко найдем угловые увеличения

$$W_t = \frac{n \cos i}{n' \cos i'} \quad \text{и} \quad W_s = \frac{n}{n'}. \quad (587)$$

Существенно, что для случая преломления на плоской поверхности угловые увеличения не равны единице.

#### § 42. Преломляющий клин в воздухе

Преломляющий клин состоит из двух плоских поверхностей, угол между которыми не равен нулю. На рис. 96 показан ход двух преломляющихся через клин параллельных пучков лучей 1-2 и

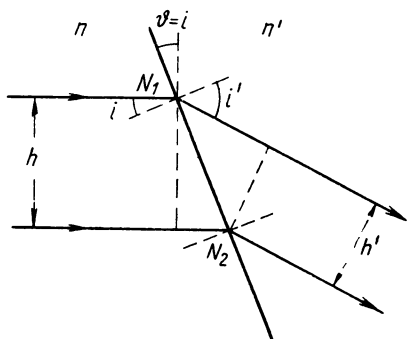


Рис. 95

3-4; первый из этих двух пучков первую преломляющую поверхность клина проходит без преломления (по нормали), а преломляется только лишь на второй поверхности; второй пучок, наоборот, преломляется на первой поверхности и проходит без преломления через вторую поверхность.

Обращаясь к первому пучку, видим, что в этом случае первая поверхность не будет влиять на величины обоих линейных увеличений; таким образом, оба линейных увеличения клина при данном ходе луча окажутся такими же, как в ранее разобранным случае преломления на наклонной поверхности:

$$V_t = \frac{\cos i_2'}{\cos i_2} = \sqrt{\frac{1 - n^2 \sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \alpha}}; \quad V_s = 1. \quad (588)$$

Однако угловые увеличения для клина уже не будут равными таковым для случая преломления на наклонной плоскости, так как для клина первая и последняя среды (воздух) имеют один и тот же коэффициент преломления. Учитывая это, получаем угловые увеличения

$$W_t = \frac{1}{V_t} = \frac{\cos i_2}{\cos i_2'} = \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}; \quad W_s = 1. \quad (589)$$

Нетрудно определить угол отклонения  $\varepsilon$ , даваемый клином при рассматриваемом ходе луча. Обращаясь к рис. 96, находим

$$\varepsilon = i_2' - i_2, \quad (590)$$

$$\sin \varepsilon = \sin i_2' \cos i_2 - \sin i_2 \cos i_2' \quad (591)$$

или, пользуясь законом преломления,

$$\sin \varepsilon = \sin \alpha [n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}]. \quad (592)$$

В случае малости преломляющего угла  $\alpha$  клина формулу (592) можно заменить приближенной

$$\varepsilon = (n - 1) \alpha. \quad (593)$$

Перейдем к рассмотрению хода лучей 3-4, преломляющихся на первой поверхности и проходящих вторую поверхность без преломления. Нетрудно видеть, что переход к этому ходу луча равносильен зеркальному отображению хода лучей 1-2, а потому величина угла отклонения  $\varepsilon$  должна будет остаться неизменной. Величина меридионального линейного увеличения в этом втором

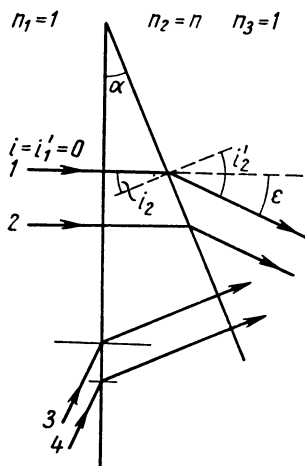


Рис. 96

случае будет обратной по отношению к меридиональному линейному увеличению в первом случае, так как ширина входящего пучка окажется меньшей, чем для выходящего.

Обозначая увеличения для этого второго хода пучка индексом сверху, можно написать

$$V'_t = \frac{1}{V_t} = \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}; \quad V'_s = \frac{1}{V_s} = 1. \quad (594)$$

Аналогично изменятся и угловые увеличения

$$W'_t = \frac{1}{V'_t} = \sqrt{\frac{1 - n^2 \sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \alpha}}; \quad W'_s = \frac{1}{V'_s} = 1. \quad (595)$$

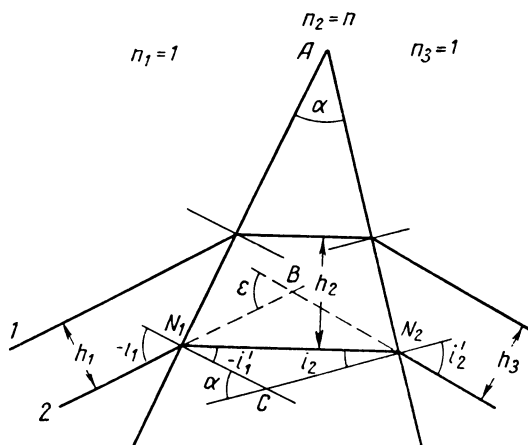


Рис. 97

Сопоставляя (588), (589), (594) и (595), сейчас же приходим к весьма важному выводу, что меридиональные увеличения для клина (как линейное, так и угловое) являются переменными и зависят от хода преломляющегося пучка через клин.

Перейдем к рассмотрению общего случая произвольного хода преломляющегося пучка через клин.

На рис. 97 представлен ход двух параллельных лучей 1 и 2, преломляющихся через клин, причем величины углов падения  $i$  и преломления  $i'$ , а также величина угла отклонения  $\epsilon$  даны по второму из лучей. Из треугольника  $N_1 N_2 C$

$$\alpha = i_2 - i_1', \quad (596)$$

а из треугольника  $N_1 N_2 B$

$$\epsilon = i_2' - i_2 - i_1 + i_1' \quad (597)$$

или, пользуясь (596),

$$\varepsilon = i_2' - i_1 - \alpha. \quad (598)$$

Беря  $\sin \frac{\varepsilon + \alpha}{2}$  и помня, что на основании закона преломления

$$\sin i_1 = n \sin i_1' \quad \text{и} \quad \sin i_2' = n \sin i_2, \quad (599)$$

получаем

$$\sin \frac{\varepsilon + \alpha}{2} = \sin \frac{i_2' - i_1}{2}. \quad (600)$$

В случае симметричного хода луча через клин углы  $-i_1'$  и  $i_2$  будут равны по величине и обратны по знаку

$$-i_1' = i_2 = \frac{\alpha}{2}. \quad (601)$$

Из (599) и (600) следует, что

$$-i_1 = i_2', \quad (602)$$

а следовательно,

$$\sin \frac{\varepsilon + \alpha}{2} = \sin i_2' = n \sin i_2 = n \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (603)$$

откуда

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \varepsilon}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (604)$$

Перейдем к определению угла  $\varepsilon$ . Пользуясь (604), получаем

$$n \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\varepsilon}{2} + \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\varepsilon}{2}, \quad (605)$$

а перенеся  $\cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\varepsilon}{2}$  в левую часть и возведя в квадрат, найдем

$$\begin{aligned} n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} - 2 n \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\varepsilon}{2} + \cos^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} = \\ = \left(1 - \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}\right) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (606)$$

или

$$\sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - 2 n \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\varepsilon}{2} + (n^2 - 1) \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 0, \quad (607)$$

откуда

$$\sin \frac{\varepsilon}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos^2 \frac{\alpha}{2} - (n^2 - 1) \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (608)$$

или

$$\sin \frac{\varepsilon}{2} = \sin \frac{\alpha}{2} \left[ n \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \pm \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right] \quad (609)$$

Сопоставляя (609) и (592), видим, что (609) можно получить непосредственно из (592), если клин с симметричным ходом луча разделить на два симметричных составляющих клина.

Таким образом, из (592) следует, что при увеличении  $\alpha$  второй член в квадратных скобках будет уменьшаться медленнее, нежели первый член, благодаря чему коэффициент при  $\sin \alpha$  будет возрастать одновременно с увеличением  $\alpha$ . Поэтому угол отклонения  $\varepsilon$  для клина с симметричным ходом луча меньше, чем для хода луча, перпендикулярного одной из преломляющих поверхностей. Отсюда можно прийти к выводу, что при симметричном ходе луча через клин угол отклонения  $\varepsilon$  наименьший.

Переходя к рассмотрению ширины преломляемого пучка в общем случае, пользуясь дважды (585), можем написать

$$V_t = \frac{h_3}{h_1} = \frac{h_3 h_2}{h_2 h_1} = V_n V_{r2} = \frac{\cos i_1' \cos i_2'}{\cos i_1 \cos i_2}, \quad (610)$$

а при симметричном ходе пучка, когда  $i_1 = -i_2'$  и  $i_1' = -i_2$ ,

$$V_t = 1. \quad (611)$$

## Глава XII

### ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И ПРИЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРИЗМ

#### § 43. Развертка систем плоских зеркал

Метод развертки является одним из наиболее широко применяемых при расчете призм. Существо этого метода заключается в том, что при каждом из отражений на плоских поверхностях строят зеркальное отображение от рассматриваемой грани всех отраженных от нее лучей и всех последующих отражающих граней.

При этом на развертываемом таким образом отражении произойдет спрямление всех отраженных лучей; вследствие такого развертывания всех последующих отражений, в конечном итоге исключатся все изломы лучей, происходящие на отражающих гра-



нях; все лучи (в том числе и ось) окажутся спрямленными. Вместе с тем на следах каждого из отражений можно определить точки встречи любого из лучей с данной отражающей гранью, можно определить все углы падения и отражения.

На рис. 98 показаны два плоских зеркала I и II, составляющих между собой некоторый угол  $\alpha$ , и ход какого-то произвольного луча, составляющего с нормалью к I зеркалу некоторый угол  $i_1$  в точке  $N_1$ , а с нормалью ко II зеркалу — некоторый угол  $i_2$ .

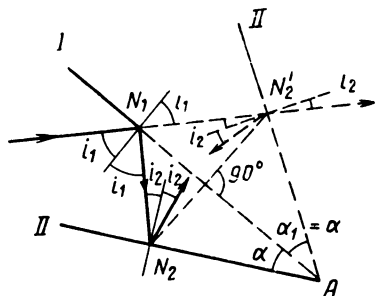


Рис. 98

Построим зеркальное изображение зеркала II в зеркале I. Для этого необходимо в точке A пересечения обоих зеркал построить угол  $\alpha' = \alpha$ ; этим самым будет однозначно определено зеркальное изображение II' зеркала II в зеркале I.

Строя по другую сторону зеркала I угол  $i_1$ , зададим тем самым ход отраженного от зеркала I луча после развертки отражения; этот луч встретит развернутое изображение II' зеркала II в некоторой точке  $N_2'$ . Нетрудно установить равенство треугольников

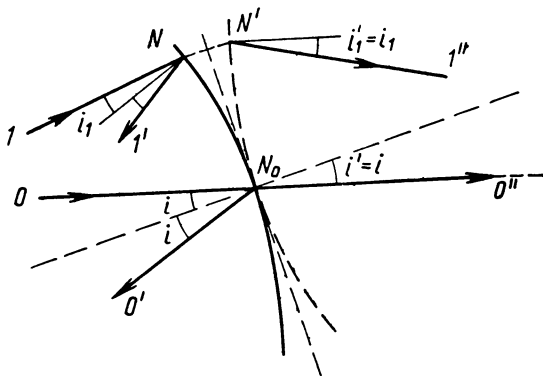


Рис. 99

$N_1N_2A$  и  $N_1N_2'A$ , как имеющих равные углы при точках  $N_1$  и  $A$  и общую сторону. Из равенства этих двух треугольников сейчас же вытекает равенство отрезков  $AN_2$  и  $AN_2'$ , определяющих положение точки  $N_2'$ , и равенство углов  $i_2$  между нормалью к зеркалу II и его изображением II'. Заметим, что метод развертки с успехом можно распространить и для случая неплоских отражающих поверхностей; при этом зеркальное изображение хода отраженных лучей строится относительно касательной к неплоской поверхности в точке пересечения последней с осью (рис. 99); при таком

развертывании обеспечивается спрямление оси системы и лучей, проходящих через точку пересечения отражающей поверхности с осью; лучи, проходящие через все другие точки отражающей поверхности, уже не будут спрямлены; излом этих лучей явится следствием существования оптической силы отражающей поверхности, аналогично преломлению лучей в линзах, имеющих оптическую силу, отличную от нуля.

#### § 44. Приведение к воздуху

Аналогично спрямлению луча при развертке отражений от плоских зеркал можем добиться спрямления лучей, если заменить преломление на плоских поверхностях плоско-параллельной пластинки приведением толщины этой пластинки к воздуху. В отличие от метода развертки, являющегося точным, метод редуцирования к воздуху будет приближенным и справедливым лишь для случая малых углов падения и преломления, а также наклона пластинки к оси системы. Сущность метода редуцирования плоско-параллельной пластинки заключается в том, что излом луча при прохождении его через плоско-параллельную пластинку связан с величиной удлинения  $\Delta$ , создаваемого пластинкой.

На рис. 100 представлен ход луча через нередуцированную пластинку с толщиной  $d$  (слева) и через редуцированную пластинку с толщиной  $d'$  (справа).

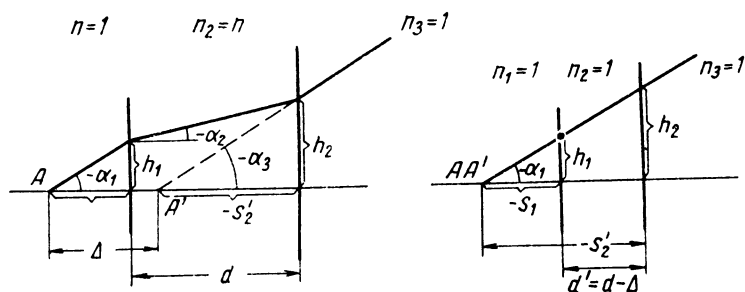


Рис. 100

Толщина  $d'$  может быть определена из условия совмещения точки  $A$  пересечения луча с осью перед входом в плоско-параллельную пластинку с точкой  $A'$  по выходе луча из пластинки. Таким образом, толщина

$$d' = d - \Delta. \quad (612)$$

Обращаясь к (567), определяющей удлинение  $\Delta_0$  для случая малых углов  $u$ , получаем

$$d' = d - \Delta_0 = d - (n - 1) \frac{d}{n} = \frac{d}{n}. \quad (613)$$

Эта формула служит формулой для редуцирования плоско-параллельной пластинки к воздуху.

Обращаясь к рис. 100, видим, что при редуцировании плоско-параллельной пластинки к воздуху все внешние элементы хода луча сохраняются неизменными (как, например, отрезки  $s_1$  и  $s_2'$ , высоты  $h_1$  и  $h_2$ ), конечно, в пределах погрешности, определяемой формулой (567).

В случае большого угла наклона плоско-параллельной пластинки к оси системы формула (567) будет неточной и ее следует заменить формулами (580) и (581); таким образом, наклонная плоско-параллельная пластинка будет редуцироваться в меридиональной и сагиттальной плоскостях различно.

При редуцировании к воздуху наклонной плоско-параллельной пластинки спрямление оси будет происходить согласно редуцированию в сагиттальной плоскости; однако при этом не произойдет спрямления лучей в плоскости меридиональной. Для обеспечения спрямления лучей в меридиональной плоскости необходимо изменить толщину пластинки соответственно редуцированию в меридиональной плоскости. Заметим, что при редуцировании в меридиональной плоскости можно сохранить ось спрямленной, если переход к редуцированию в меридиональной плоскости осуществлять изменением толщины пластинки и смещением выходной плоскости не в направлении ее нормали, а в направлении оси выходящего пучка лучей.

Естественно, что и при таком осуществлении редуцирования в меридиональной плоскости спрямление лучей в сагиттальной плоскости будет нарушено.

Совокупное применение методов развертки отражений и редуцирования плоско-параллельной пластинки к воздуху позволяют расчеты круглой оптики сложных оптических систем и отражательных призм выполнять совершенно независимо.

## Глава XIII

### КОНСТРУКЦИИ ПРОСТЫХ ПРИЗМ

#### § 45. Некоторые конструктивные приемы

Перед тем, как перейти к непосредственному разбору конструкций отражательных призм, рассмотрим некоторые конструктивные приемы, нередко применяемые при разработке призм. К числу таких приемов можно отнести:

- 1) использование явления полного внутреннего отражения;
- 2) использование разделения хода лучей и
- 3) использование клина, дополняющего призму до плоско-параллельной пластинки.

1. Полное внутреннее отражение. Как известно,

$$n \sin i = n' \sin i', \quad (614)$$

а при  $n > n'$  (например, при  $n' = 1$ , когда последующей средой служит воздух) преломление будет возможно лишь для таких

углов, которые меньше некоторого угла  $i_0$ , определяемого по формуле

$$\sin i_0 = \frac{n'}{n}. \quad (615)$$

При углах  $i > i_0$  значение  $\sin i'$  должно быть больше единицы, что фактически невозможно. Угол  $i_0$ , как известно, называется углом полного внутреннего отражения. В силу невозможности преломления при углах  $i$ , больших  $i_0$ , лучи будут отражаться от преломляющей поверхности, как от зеркала.

При углах падения  $i$ , меньших

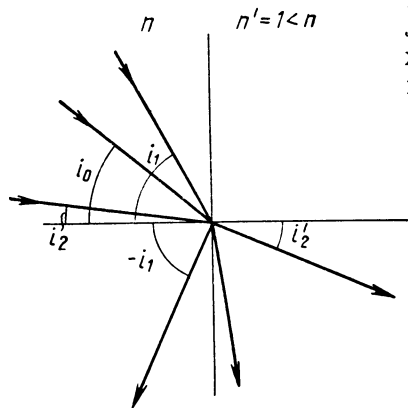


Рис. 101

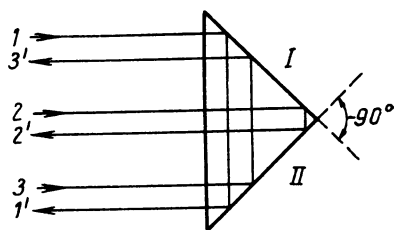


Рис. 102

$i_0$ , лучи, проходящие через поверхность, будут преломляться; таким образом, одна и та же поверхность может быть использована и как отражающая, и как преломляющая (рис. 101).

Определим численные значения углов полного внутреннего отражения для среды стекло—воздух при различных сортах стекла.

Для стекол: К8  $n_D = 1,5163$ ;  $i_0 = 42^\circ$

ТФ7  $n_D = 1,7280$ ;  $i_0 = 35^\circ 20'$ .

2. Разделение хода лучей. Иногда не представляется возможным осуществить необходимые размеры для некоторых отражающих граней в соответствии с шириной отражаемого пучка; в подобных случаях можно прибегнуть к разделению пучков лучей на две (или более) части, с самостоятельным преобразованием каждой из них; в последующем такой разделенный пучок лучей должен быть снова воссоединен в единый пучок.

При этом необходимо, чтобы в каждой части системы или в каждом канале были сохранены все оборачивания и отклонения пучков, длины ходов лучей и т. д.

Поясним сказанное на примере работы двух зеркал, составляющих между собой прямой угол.

На рис. 102 представлена картина отражения параллельного пучка лучей 1-2-3 от системы зеркал I и II, расположенных под

углом  $90^\circ$ . Так как угол между отражающими гранями равен  $90^\circ$ , угол отраженного пучка лучей с первоначальным его направлением должен быть равен нулю; при этом лучи 1-2-3 после обоих отражений должны поменяться местами и расположиться в последовательности 3'-2'-1'. На рис. 102 видно, что луч 1 претерпевает отражение сначала от зеркала I и уже потом от зеркала II, а луч 3 — сначала от зеркала II, а потом от зеркала I. Таким образом, система из двух зеркал, расположенных под прямым углом, обеспечивает правильное преобразование отраженного пучка, несмотря на то, что отражаемый пучок при этом разделяется по линии пересечения зеркал на две части (два канала), каждая из которых преобразуется независимо, а в конечном итоге снова объединяются в единый пучок.

Такую систему из двух взаимно перпендикулярных зеркал, производящую преобразование падающего пучка по частям, называют крышей. Заметим, что разделение пучка на самостоятельные части осуществляется и другими конструкциями, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

### 3. Дополнительный клин.

Тогда, когда та или иная призма при развертке не разворачивается в плоско-параллельную пластинку (например, когда выходная грань призмы до этого работала в качестве грани, на которой происходило полное внутреннее отражение), к развертке призмы присоединяют дополнительный клин с преломляющим углом, равным тому же самому углу, который получился на развертке, но с обратным знаком (дополнительный клин направлен вершиной в обратную сторону). Между дополнительным клином и основной разверткой сохраняют тонкую воздушную прослойку (рис. 103); стекло дополнительного клина должно быть того же сорта, что и стекло, принятое в основной развертке.

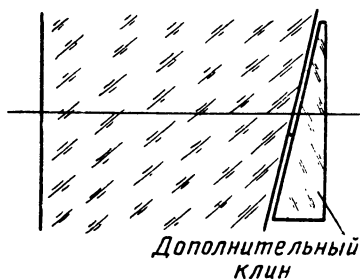


Рис. 103

## § 46. Простейшие призмы

К простейшим призмам следует отнести: прямоугольную, с одним отражением, пентапризму, полупентапризму, ромбическую и прямоугольную призмы с двумя отражениями.

Простая прямоугольная призма при параллельном габарите хода лучей. Развертка такой призмы представляет собой полный квадрат со стороной  $a$  (рис. 104). Следовательно, длина хода луча

$$d = a, \quad (616)$$

а редуцированная длина

$$d' = \frac{d}{n} = \frac{a}{n} . \quad (617)$$

Длина хода может быть определена по любому из лучей:  $1-1'$ ;  $1-1''$ ;  $2-2'$  и т. п.

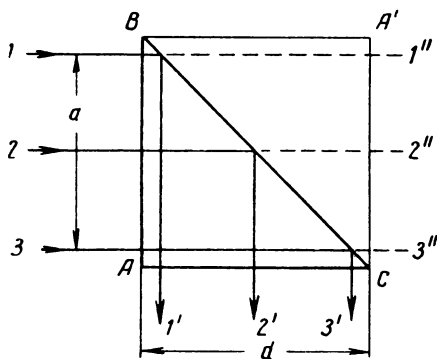


Рис. 104

Простая прямоугольная призма при коническом габарите хода лучей и с большим углом конуса  $2\beta$  (рис. 105). Вершина конического габарита предполагается вне призмы.

В этом случае необходимая длина хода лучей в призме может быть получена несколько меньшей, нежели размер выходной грани  $a'$  призмы; сама призма может быть выполнена в этом случае в виде многоугольника  $ADEMC$ ,

составляемого из двух треугольников: треугольника  $AMC$ , не развортывающего в плоско-параллельную пластинку, и добавочного клина  $DEM$ , дополняющего развертку до плоско-параллельности.

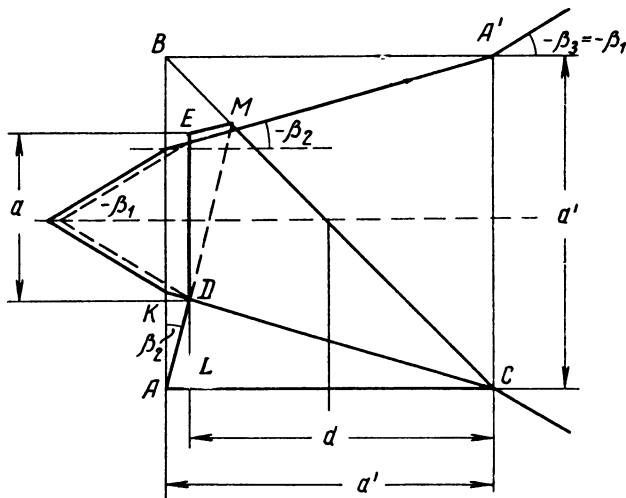


Рис. 105

Определим необходимую длину хода  $d$ , полагая известными выходную сторону  $a'$  и угол  $\beta_2$  внутри призмы. Из рис. 105 следует

$$DL = d \operatorname{tg} \beta_2; \quad AL = DL \operatorname{tg} \beta_2 = d \operatorname{tg}^2 \beta_2. \quad (618)$$

Но так как выходная сторона

$$a' = AL + d = (1 + \operatorname{tg}^2 \beta_2) d = \frac{d}{\cos^2 \beta_2}, \quad (619)$$

то

$$d = a' \cos^2 \beta. \quad (620)$$

Нас интересует величина входной грани  $a$ . Имеем

$$a = a' - 2 d \operatorname{tg} \beta_2 = a' (1 - \sin^2 \beta_2). \quad (621)$$

Длину хода нетрудно выразить и через входной угол  $\beta_1$ . Действительно, из (620) следует

$$d = a' \left( 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{n^2} \right). \quad (622)$$

Полагая для предельного случая  $\beta_1 = 90^\circ$ ,  $\sin \beta = 1$  и  $n = \sqrt{3}$  (стекло, близкое по коэффициенту к сорту ТФ-7, когда  $n_D = 1,7280$ ), получаем

$$d = \left( 1 - \frac{1}{3} \right) a' = \frac{2}{3} a'.$$

Тогда синус угла  $\beta_2$  определится как  $\frac{1}{n} = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0,577 < \frac{\sqrt{2}}{2}$ .

Таким образом, угол  $\beta_2$  будет меньше  $45^\circ$ , а входная сторона  $a$ , согласно (621), — больше нуля. Из этого примера видно, что при вынесенном из призмы входном зрачке принципиально возможно увеличение пропускаемого через призму поля до  $180^\circ$ , в то время как простое зеркало, наклоненное под углом  $45^\circ$  и создающее излом оси под углом  $90^\circ$ , не способно обслужить поле, большее  $90^\circ$ .

Заметим, что если пользоваться только лишь методом редуцирования к воздуху, то для простой прямоугольной призмы при зрачке, совмещенном с одной из наружных поверхностей, можно получить величину наибольшего возможного поля зрения, равную

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a'}{2} : \frac{a'}{n} = \frac{n}{2} < 1; \quad 2\beta < 90^\circ.$$

Этот последний пример убеждает в необходимости использования точных формул при расчете призм, работающих в напряженных условиях и при больших полях зрения.

Непрямоугольные призмы с одним отражением могут иметь отклонения луча меньше  $90^\circ$  (рис. 106) и больше  $90^\circ$  (рис. 107).

В случае, если угол отклонения меньше  $90^\circ$ , то длина хода в призме определяется по ходу луча  $BD$  по формуле

$$d = \frac{a}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (623)$$

Например для призмы с углом  $\varepsilon = 45^\circ$

$$d = \frac{a}{\sqrt{2} - 1} = a\sqrt{2} + 1.$$

а следовательно, отражающая грань в этой призме работает при углах падения и отражения, значительно больших угла полного внутреннего отражения, и поэтому нет необходимости отражающую грань серебрить.

Если же угол отклонения луча больше  $90^\circ$ , то длину хода луча в призме можно определить по ходу луча  $BDC$  по формуле

$$d = a \left[ \operatorname{tg}(\varepsilon - 90^\circ) + \frac{1}{\cos(\varepsilon - 90^\circ)} \right]. \quad (624)$$

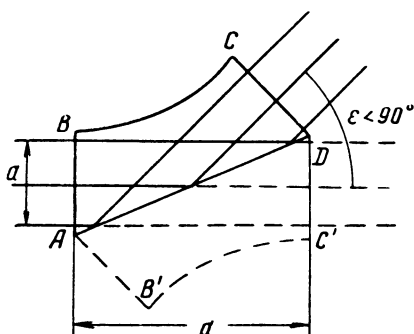


Рис. 106

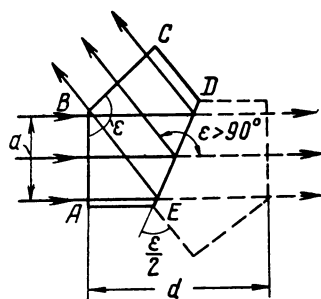


Рис. 107

В последнем случае углы падения и отражения легко могут оказаться меньшими угла полного внутреннего отражения; в силу этого отражательная грань в этой призме будет требовать серебрения.

Пентапризма (рис. 108) является призмой с двумя отражающими гранями и дает постоянный угол отклонения луча  $\varepsilon$ , равный  $90^\circ$ . На основании (551) легко найти угол  $\alpha$  между отражающими гранями призмы, который должен быть равен  $45^\circ$ .

Длина  $d$  хода луча в призме может быть определена, например, по лучу  $ABEA$

$$d = a + a\sqrt{2} + a = a(2 + \sqrt{2}). \quad (625)$$

Углы падения и отражения на отражающих гранях пентапризмы меньше угла полного внутреннего отражения, поэтому эти грани необходимо серебрить.

Полупентапризма (рис. 109) по своему внешнему виду напоминает половину пентапризмы, откуда и произошло ее назва-



ние. Полупентапризма также является призмой с двумя отражающими гранями; она дает постоянный угол отклонения луча  $\epsilon$ , равный  $45^\circ$ . Поэтому угол между ее отражающими гранями должен быть равен  $22^\circ 30'$ . Длину  $d$  хода луча в полупентапризме легко определить, например, по лучу  $AB'E$

$$d = \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) a. \quad (626)$$

Рассматривая работу грани  $AD$ , видим, что эта грань вначале работает как первая отражающая грань, а затем как выходная преломляющая грань призмы.

Для этого, очевидно, необходимо, чтобы на этой грани было полное внутреннее отражение; причем угол полного внутреннего

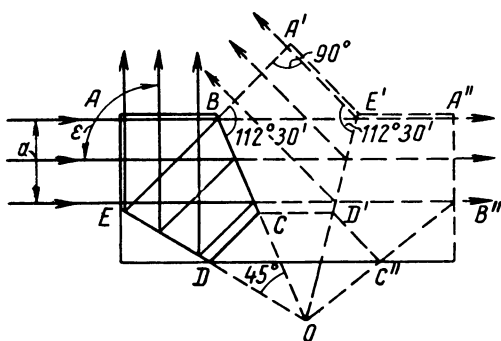


Рис. 108

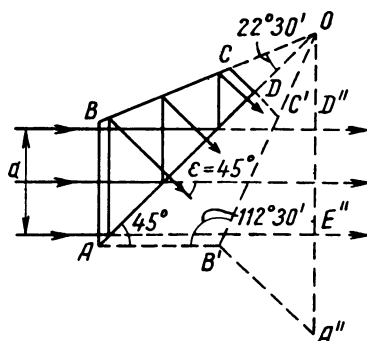


Рис. 109

отражения должен быть меньше разности углов  $45^\circ - u$  или  $45^\circ - \beta$  ( $u$  и  $\beta$  — апертурные, или полевые углы в стекле, образующиеся при прохождении световых пучков через призму).

Ромбическая призма. В ряде случаев встречается необходимость поступательного (параллельного) смещения всех световых пучков, выходящих из оптической системы, без оборачивания изображения; решение этой задачи может быть легко осуществлено при помощи так называемой ромбической призмы (рис. 110).

Длина  $d$  хода луча легко может быть определена, например, по лучу  $BDC$

$$d = 2a. \quad (627)$$

Отражательные грани ромбической призмы могут работать и на полном внутреннем отражении, и будучи посеребренными. Определим величину смещения оси, создаваемого ромбической призмой, если базис призмы  $b$ . Нетрудно видеть, что в рассматриваемом случае величина базиса равна ширине пучка  $a$ .

Однако величину базиса всегда можно увеличить путем соответственного увеличения входной грани  $AB$  призмы; при этом длину хода с увеличенным базисом определяют по формуле

$$d = a + b. \quad (628)$$

Заметим, что в простой ромбической призме величина базиса не должна быть меньше ширины пучка  $a$ .

Прямоугольная призма с двумя отражениями. Иногда встречается необходимость обратного направления пучков лучей с выводом их из падающего пучка; эта задача может быть решена при помощи прямоугольной призмы с двумя отражениями (рис. 111). Длина хода в прямоугольной призме с

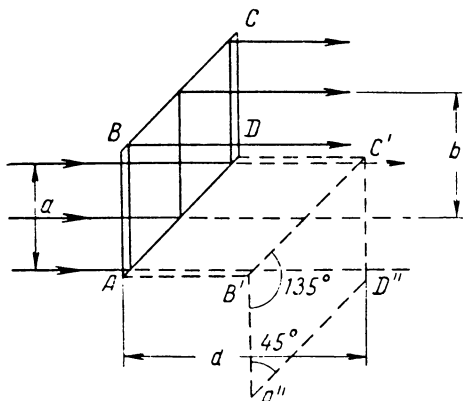


Рис. 110

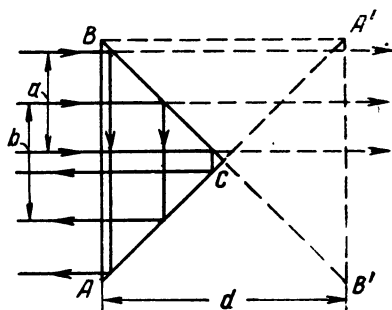


Рис. 111

двумя отражениями может быть определена по лучу  $BA'$ , идущему вдоль входной грани призмы; эта длина будет аналогично случаю ромбической призмы равна

$$d = a + b. \quad (629)$$

Точно так же, как и в ромбической призме, величина базиса не должна быть меньше ширины пучка  $a$ .

Проанализировав увеличения (линейные или угловые) конструкций призм, приведенных выше, и проследив ход лучей, нетрудно видеть, что во всех рассмотренных случаях всегда  $V_s = +1$ , а для ромбической призмы

$$V_s = V_t = W_s = W_t = 1. \quad (630)$$

К этой же группе призм можно отнести полупентапризму и пентапризму (напомним, что эта группа была принята нами в качестве I группы; § 37).

Призмы с одним отражением и углом отклонения луча  $\epsilon \leq 90^\circ$  будут обладать увеличениями

$$V_s = 1; \quad W_s = 1; \quad W_t = -1; \quad V_t = -1, \quad (631)$$

а следовательно, могут быть причислены ко II группе.

Призмы с одним отражением и углом  $\epsilon > 90^\circ$  будут обладать увеличениями

$$V_t = V_s = 1; \quad W_t = W_s = -1; \quad (632)$$

эта призма может быть отнесена к IV группе.

Последняя же из рассмотренных нами призм, — прямоугольная призма с двумя отражениями, будет обладать увеличениями:

$$V_s = 1; \quad V_t = -1; \quad W_s = -1; \quad W_t = 1. \quad (633)$$

Такая призма должна быть отнесена к V-ой из рассмотренных групп.

Таким образом, нами не были рассмотрены призмы, относящиеся по своим свойствам к III и VI группам.

Напомним, что призмы III группы должны давать оборачивание изображения в двух направлениях; поэтому в дальнейшем их будем называть оборачивающими призмами или оборачивающими системами призм.

Призма с тремя отражениями. К числу простых призм можно отнести также призму с тремя отражениями (рис. 112).

Эта призма дает угол отклонения  $\epsilon$  отраженного пучка, равный  $180^\circ$ ; сам пучок оказывается смещенным на некоторый базис  $b$ , величина которого равна  $a$ . Пучок претерпевает в призме три отражения: первое на грани  $BC$ , нуждающейся в серебрении, второе, являющееся полным внутренним отражением, на границ  $AB$ , которая одновременно служит входной и выходной гранями призмы, и третье — на грани  $AC$ , которая опять-таки нуждается в серебрении. Определим длину хода луча в призме, воспользовавшись для этой цели лучом  $BCK$ . Находим

$$d = a\sqrt{3}. \quad (634)$$

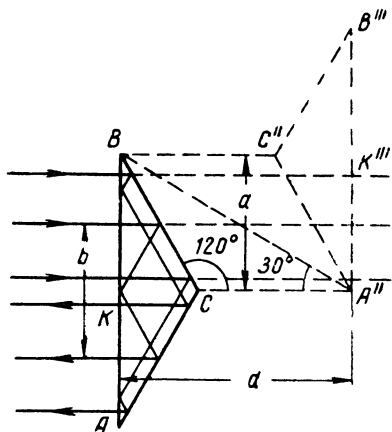


Рис. 112

Оба линейных увеличения, даваемые этой призмой, будут равны единице, а оба угловых увеличения будут равны минус единице, т. е.

$$V_t = V_s = 1; \quad W_t = W_s = -1. \quad (635)$$

В силу этого призма с тремя отражениями должна быть отнесена к IV группе.

#### § 47. Оборачивающие призмы и оборачивающие системы призм

**Крышеобразная призма.** Одной из простейших призм, дающих полное оборачивание изображения, является прямоугольная призма с крышей, нанесенной на гипотенузной грани (рис. 113). Главное сечение (через ребро крыши) развертки этой призмы так же, как и простой прямоугольной призмы, имеет вид квадрата. Однако входная грань призмы уже не может быть равной ширине пучка  $a$ . При определении величины входной грани призмы необходимо учитывать срезание входной грани с боковыми гранями крыши. Полагая, что входящий пучок лучей имеет в сечении круг, необходимо, чтобы он вписывался в угол между гранями крыши.

На рис. 113 показаны две проекции крышеобразной призмы: вид сбоку (рис. 113, а) и вид на входную грань спереди (рис. 113, б). Обратимся ко второй проекции. Определим величину угла  $2\gamma$  между линиями пересечения граней крыши с входной гранью призмы. Помня, что угол между гранями крыши должен быть равен  $90^\circ$ , нетрудно определить ширину основания входной грани. Она будет равна высоте входной грани  $c$ , умноженной на  $\sqrt{2}$ . Отсюда уже легко определяется

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1/\sqrt{2}}{2} = 0,7071, \quad (636)$$

а следовательно,

$$\gamma = 35^\circ 16'. \quad (637)$$

Так как окружность, ограничивающая входящий в призму световой пучок, вписана в угол  $2\gamma$ , то радиус  $\frac{a}{2}$  окружности, ограничивающей пучок, будет равен

$$\frac{c}{2} = \frac{a}{2 \sin \gamma}. \quad (638)$$

Но величина  $c$  (по развертке) равна длине хода луча в призме  $d$ . Таким образом,

$$d = \frac{a}{\sin \gamma}. \quad (639)$$

Острые уголки призмы  $B$ ,  $C$  и ребро  $A$  могут быть срезаны, как это показано на первой поверхности, включая до касания срезов к сечению пучка на входной и выходной гранях призмы. При отражении светового пучка от обеих граней крыши будет происходить полное внутреннее отражение; поэтому грани крыш нет необходимости серебрить.

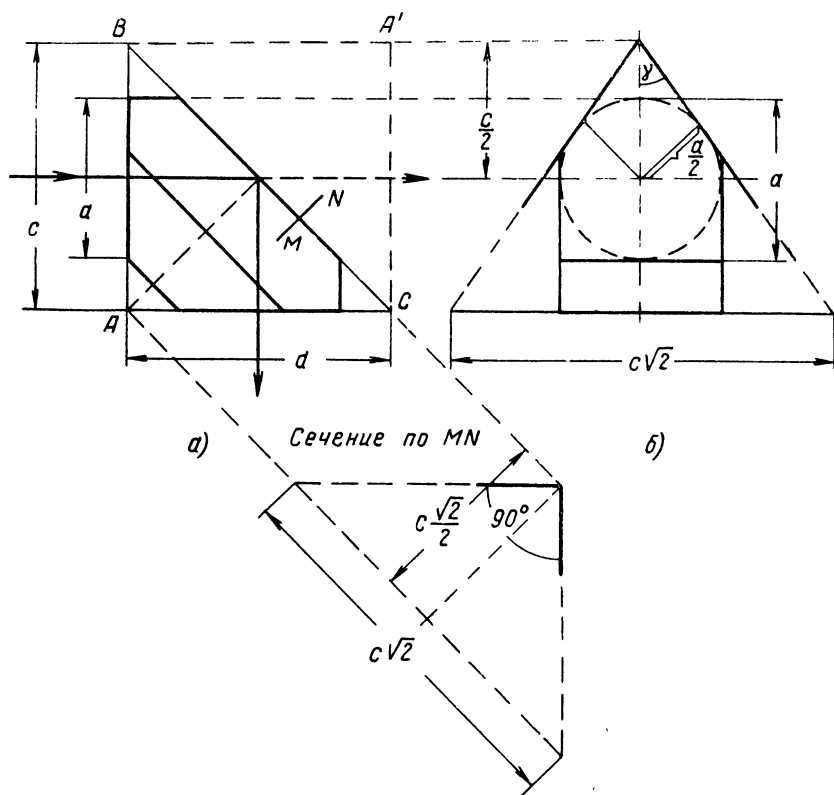


Рис. 113

Призма Аббе. Призма Аббе (рис. 114) представляет собой оборачивающую призму с углом отклонения  $\epsilon$ , равным нулю; ось выходящего пучка лучей является продолжением оси входящего пучка. Призма Аббе имеет отражающие грани  $AB$  и  $BC$ , работающие на полном внутреннем отражении; грань  $DE$  представляет собой крышу. Таким образом, в этой призме обеспечивается равенство увеличений  $V_i$  и  $V_s$  минус единице; точно так же получаются равными минус единице и увеличения  $W_i$  и  $W_s$ . Равенство линейных и угловых увеличений дает нам основание отнести

призму Аббе к III группе систем, т. е. к оборачивающим призмам. Развертка призмы Аббе несколько усложнена тем, что при развертке последовательных отражений отдельные контуры призмы накладываются один на другой; тем не менее процесс развертки сравнительно нетрудно проследить, наблюдая, куда переходят те или иные точки контура.

Точки контура после первой развертки отмечены одним штрихом вверху, после второй — двумя и третьей — тремя штрихами.

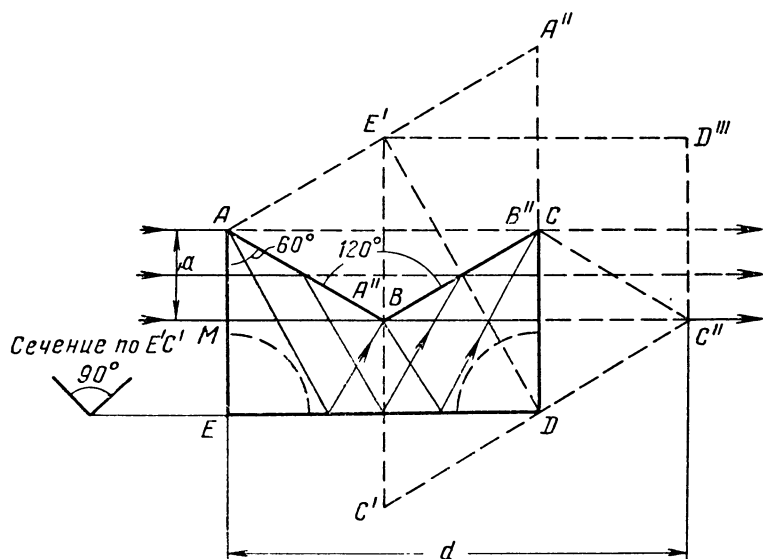


Рис. 114

Длину хода луча в призме легче всего определить по ее развертке, например вдоль развернутого луча  $MBC''$

$$d = 3\sqrt{3}a. \quad (640)$$

Заметим, что введение крыши в призме Аббе никак не отражается на зависимости между длиной хода луча и шириной входящего пучка (как это было в крышеобразной призме); наоборот, углы  $E$  и  $D$  призмы могут быть срезаны без всякого ущерба для проходящих через призму световых пучков.

**Призма Лемана.** Призма Лемана (рис. 115) имеет два отражения на гранях  $AB$  и  $BC$  (причем на грани  $AB$ , являющейся входной гранью, происходит полное внутреннее отражение) и крышу, ребро которой расположено по линии  $EK$ . Таким образом, по числу отражений призма Лемана эквивалентна призме Аббе;

однако в отличие от призмы Аббе базис в призме Лемана отличен от нуля; величина базиса

$$b = AB = a + MB = \frac{a}{2} + BN.$$

Но отрезок  $BN$  должен быть равен отрезку  $BC = 2a$ ; тогда

$$b = 2,5 a. \quad (641)$$

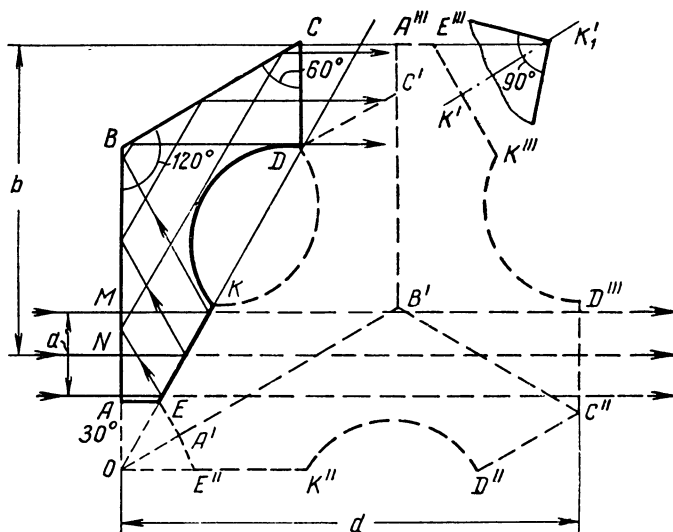


Рис. 115

Перейдем к определению длины хода луча. Пользуясь для этой цели лучом  $MKB'D'''$ , получим

$$d = MK + KB' + B'D''', \quad (642)$$

но так как

$$MK = \frac{KB'}{2} \text{ и } KB' = KB = BD = B'D''', \quad (643)$$

то

$$d = 2,5 BD = 2,5 \sqrt{3} a. \quad (644)$$

Призма Шмидта. Призма Шмидта (рис. 116) аналогично призмам Аббе и Лемана имеет два отражения на гранях  $AB$  и  $BC$ , которые одновременно являются входными и выходными гранями (обе эти грани работают на полном внутреннем отражении), и

два отражения на крыше, ребром которой служит отрезок  $AC$ . На рис. 116 справа показана развертка призмы Шмидта; в отличие от призм Аббе и Лемана призма Шмидта дает угол отклонения  $\epsilon$ , не равный нулю; для этой призмы  $\epsilon = 45^\circ$ . Длина хода луча в призме Шмидта легко определяется через длину входной грани  $c$ ; имеем

$$d = c \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right). \quad (645)$$

Здесь, как и в случае простой крышеобразной призмы, необходимо учитывать срезание входной и выходной граней призмы

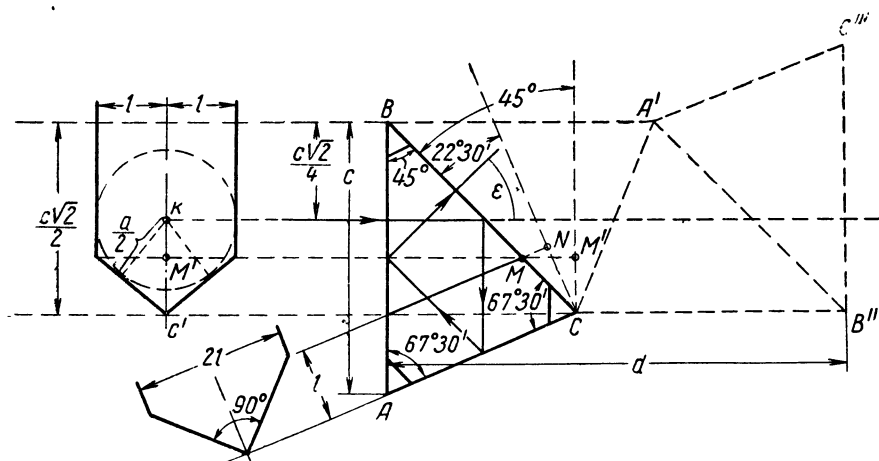


Рис. 116

гранями крыши; однако в случае призмы Шмидта решение этой задачи усложняется тем, что ширину входящего пучка будет ограничивать срезание на выходной грани, на которую входящий пучок падает не перпендикулярно, а под углом  $45^\circ$ . В силу этого сечением входящего пучка на грани  $BC$  будет уже не круг, а эллипс. Подобный случай легко может встретиться и в других конструкциях призм; поэтому несколько подробнее остановимся на решении этого вопроса.

Поступим следующим образом. Спроектируем выходную грань на плоскость, перпендикулярную оси пучка; в этом случае эллиптическое сечение пучка на этой грани снова превратится в окружность; тем не менее проекции касательных, ограничивающие эллипс (линии пересечения граней крыши с гранью  $BC$ ), останутся касательными и к этой окружности. Определим угол между этими проекциями. Зададимся произвольной толщиной призмы  $2l$ . Тогда на развертке призмы отрезок  $NC$  выразится величиной



$l$ ; отрезок же  $MC$  можно будет определить как проекцию  $NC$  на грань  $BC$ , т. е.

$$MC = \frac{NC}{\cos 22^\circ 30'} = \frac{l}{\cos 22^\circ 30'}; \quad (646)$$

проекция же отрезка  $MC$  на плоскость, перпендикулярную оси пучка, будет

$$M'C' = MC \cos 45^\circ = NC \frac{2 \sin 22^\circ 30' \cos 22^\circ 30'}{\cos 22^\circ 30'} = 2 l \sin 22^\circ 30'. \quad (647)$$

Далее определим

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{l}{M'C'} = \frac{1}{2 \sin 22^\circ 30'}.$$

Радиус  $\frac{a}{2}$  окружности сечения пучка равен

$$\frac{a}{2} = KC \sin \gamma' = \frac{c \sqrt{2}}{4} \sin \gamma'. \quad (648)$$

Решая (648) относительно величины  $c$  и входя с полученным значением в (695), получаем длину хода луча в призме Шмидта, выраженную через ширину пучка  $a$ ,

$$d = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sin \gamma'} a. \quad (649)$$

В призме Шмидта аналогично крышеобразной призме могут быть обрезаны все три острых угла параллельно противоположащим граням вплоть до касания к контуру свободного сечения пучка.

Призма Шмидта, равно как и призмы Аббе и Лемана, не требует серебрения отражающих граней.

Призма Пехана. Как уже говорилось, призма Шмидта дает полное оборачивание изображения при наличии угла отклонения  $\epsilon$ , равного  $45^\circ$ . В то же время ранее была рассмотрена полупентапризма, не дающая оборачивания изображения и также обладающая углом отклонения  $\epsilon$ , равным  $45^\circ$ . Присоединяя эти две призмы одна к другой так, чтобы их суммарный угол отклонения оказался равным нулю при базисе, также равном нулю, получим оборачивающую систему призм, известную под названием призмы Пехана (рис. 117). Так как оба элемента, входящие в конструкцию призмы Пехана, уже были рассмотрены ранее, то нет необходимости заниматься разверткой призмы Пехана; однако условие совпадения направлений осей входящего и выходящего из призмы пучков заставляет определить длину хода луча, при которой это условие будет соблюдено. Из рисунка нетрудно усмотреть, что для соблюдения такого условия необходимо, чтобы ход

луча и в полупентапризме и в призме Шмидта образовал совместно правильный равносторонний прямоугольный треугольник. Рассматривая этот треугольник, определим длину хода луча

$$d = \frac{1}{2} (5 + 3\sqrt{2}) a. \quad (650)$$

Заметим, что в конструкции призмы Пехана крыша ввиду некоторого увеличения длины хода по отношению к сечению пучка в составляющей призме Шмидта (необходимого для приведения величины базиса к нулю) уже не будет оказывать влияния на ограничение диаметра, входящего в систему пучка лучей.

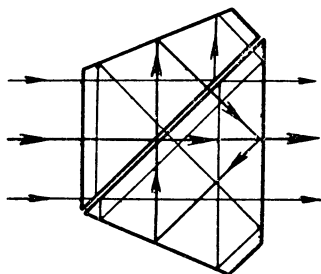


Рис. 117

В результате соединения двух призм, принадлежащих I и III группам оборачивания (призма, дающая полное оборачивание, и призма, не дающая оборачивания) и обладающих одинаковыми углами отклонения, могут быть созданы и иные системы оборотных призм, например в результате сочетания пентапризмы с крышеобразной призмой. Анализ подобных кон-

струкций достаточно ясен из предыдущего и поэтому не будем останавливаться на их рассмотрении.

Однако оборачивающие системы призм могут быть созданы не только лишь путем сочетания призм, принадлежащих к I и III группам по даваемому ими оборачиванию, но вполне успешно могут быть использованы и другие сочетания.

Оборачивающие системы призм Малафеева. Оборачивающие системы призм I и II рода Малафеева отличаются от ранее рассмотренных конструкций тем, что, во-первых, в этих системах призм не сохраняется ход пучка в одной и той же плоскости и, во-вторых, эти системы не принадлежат к системам, которые могут быть составлены из призм, принадлежащих ко II и III группам по оборачиванию.

Система I рода призм Малафеева представлена в перспективе (из-за пространственного хода оси оборачиваемого пучка) на рис. 118, а. Эта оборачивающая система состоит из двух прямоугольных призм с двумя отражениями, развернутых относительно друг друга на угол  $90^\circ$ . Длина хода луча в этих призмах равна удвоенной длине хода в прямоугольной призме с двумя отражениями; таким образом, для этого случая

$$d = 4a. \quad (651)$$

Составляющие призмы дают оборачивание, определяющее обе ориентировки случая IV (см. § 37). Если развернуть вторую призму относительно первой таким образом, чтобы ось пучка вошла

в плоскость чертежа, то тогда вторую призму можно отнести к группе V, а система призм стала бы принадлежать I группе, не дающей оборачивания.

Система II рода призм Малафеева представлена также в перспективе на рис. 118, б. Ее можно рассматривать либо как систему из четырех простых прямоугольных призм с одним отражением в каждой, либо как систему трех призм — первой и последней — с одним отражением каждая — и средней — прямоугольной призмы

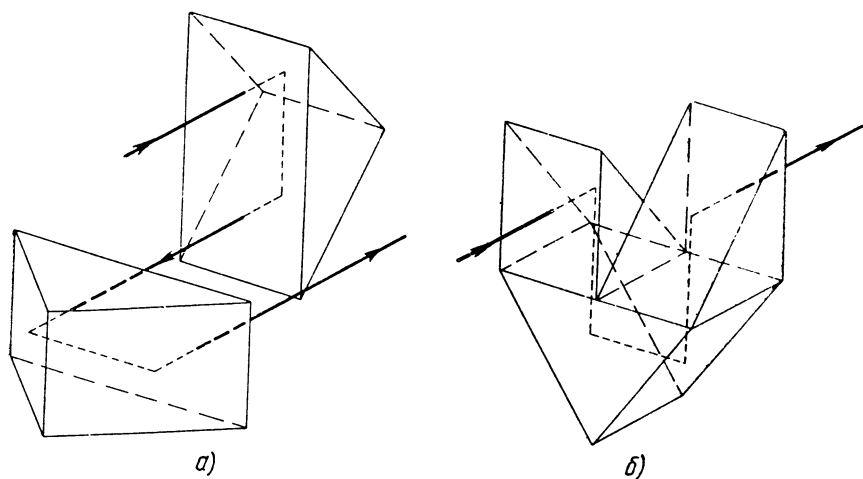


Рис. 118

с двумя отражениями, аналогичной по своим свойствам крыше. В этой второй интерпретации система II рода призм Малафеева приближается к оборачивающей призме Аббе. Длина хода луча в этой системе призм, как это нетрудно усмотреть из рисунка, равна учетверенному диаметру сечения пучка, как и для системы I рода призм Малафеева.

Тройное зеркало. Соединяя прямоугольную призму с крышей и простую прямоугольную призму с одним отражением, а затем осуществляя их в едином куске стекла, приходим к конструкции тройного зеркала. Такое сочетание двух призм представлено на рис. 119; в верхней части системы получаем крышу  $ABCE$ ; в нижней части — одну отражающую грань  $BD$ . Нетрудно видеть, что лучи 1 и 2, отражаясь вначале от крыши, а затем от нижней грани, переходят вниз; луч 1 займет положение луча 3, вошедшего в призму и ее нижней части; луч 2', выходя из призмы, совместится с лучом 2; луч 3' займет положение луча 1; но этот луч вначале отразится от плоской грани и уже после — на крыше. Если рассматривать лучи, шедшие параллельно лучам 1, 2 и 3, но под плоскостью рисунка, то эти лучи благодаря крыше будут

после отражения лежать в плоскости, расположенной над плоскостью чертежа. Таким образом, будем иметь и в меридиональной и в сагиттальной плоскостях полное оборачивание, а следовательно,

$$V_t = V_s = -1. \quad (652)$$

Ввиду того что отраженный лучок выходит из призмы по обратному направлению, должны принять  $n' = -n$  и тогда

$$W_t = W_s = -V_t = -V_s = 1. \quad (653)$$

Отсюда явствует, что тройное зеркало принадлежит к VI группе по оборачиванию. В точке  $B$  призмы встречаются три грани: две грани крыши, образующие, как известно, прямой угол, и грань, перпендикулярная ребру крыши  $AB$ . Поэтому третья грань будет в свою очередь перпендикулярной обоим граням крыши. Вполне естественно расположить входную грань этой призмы таким образом, чтобы все три взаимно перпендикулярные грани были одинаковыми по своим размерам.

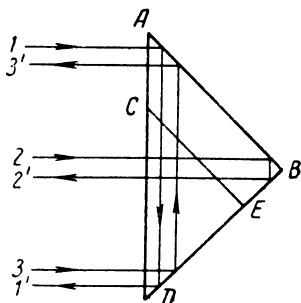


Рис. 119

На рис. 120 представлен вид на тройное зеркало со стороны вершины  $O$  пересечения всех трех взаимно перпендикулярных граней. Располагая эти грани под углом  $120^\circ$ , получим в основании призмы равносторонний треугольник  $ABC$ .

Нетрудно видеть, что круглый пучок лучей, ось которого проходит через вершину призмы  $O$ , должен коснуться всех трех сто-

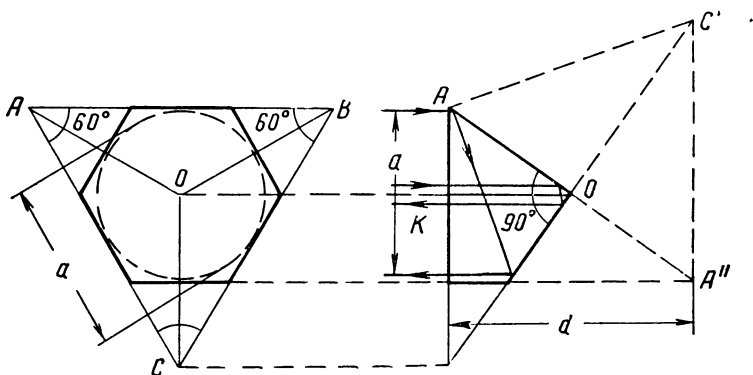


Рис. 120

рон треугольника  $ABC$ ; диаметр пучка  $a$  в этом случае равен расстоянию от любой из вершин треугольника  $ABC$  до вершины  $O$ .

Рассмотрим сечение призмы по ребру  $OC$ . В этом сечении образуется прямоугольный треугольник  $AOC$ , при этом расстоя-

ние  $AK$  от стороны  $AB$  до основания перпендикуляра, опущенного из вершины  $O$  на входную грань призмы, будет равно  $\frac{a}{2}$ . Из этого треугольника легко определить и величину перпендикуляра  $OK$ , равную половине длины хода луча в призме. На основании известной теоремы о средней пропорциональной получаем

$$d = 2 OK = \frac{2a}{\sqrt{2}} = a\sqrt{2}. \quad (654)$$

Острые углы  $ABC$  тройного зеркала могут быть обрезаны согласно рис. 120.

Сочетая призму типа тройного зеркала с призмой с тремя отражениями, можно получить оборотную систему призм, представленную на рис. 121.

Не будем определять длину хода луча в этой системе призм, а ограничимся лишь указанием на некоторые особенности ее конструкции. Так как в системе имеется полное оборачивание или отсутствие оборачивания в каждом отдельном компоненте, оба компонента могут быть развернуты друг относительно друга на любой угол; при этом в отличие от системы I рода призм Малафеева не будет возникать поворот изображения.

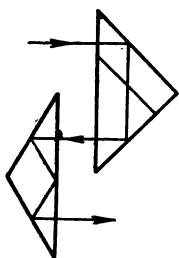


Рис. 121

Оборотная система с башмачной призмой. В качестве последнего примера оборотной системы призм рассмотрим сочетание плоского зеркала с так называемой башмачной призмой (рис. 122). Первое, или головное, зеркало нередко используется как элемент, позволяющий изменять угол отклонения в вертикальной плоскости; вторая же призма дает постоянный угол отклонения в вертикальной плоскости, равный  $90^\circ$ , и, кроме того, при помощи крыши осуществляет оборачивание в горизонтальной плоскости. Таким образом, башмачная призма по своим свойствам аналогична пентапризме с крышей. Особенность башмачной призмы состоит в том, что ее основной элемент  $ABC$  не разворачивается в плоско-параллельную пластинку, а следовательно, необходим дополнительный клин. Длина хода луча в башмачной призме может быть измерена, например, по лучу  $MAN$ , проходящему через вершину призмы  $A$  (хотя на самом деле такой луч не пропускается через башмачную призму); если бы было известно расстояние  $c$  от оси выходящего пучка до вершины  $A$ , то длина хода

$$d = AM + AN \quad (655)$$

или, определяя из рис. 122 отрезки  $AM$  и  $AN$ ,

$$d = \left(c + \frac{a}{2}\right) \operatorname{tg} 60^\circ + \left(c + \frac{a}{2}\right) \operatorname{tg} 30^\circ. \quad (656)$$

Вынося множитель  $(c + \frac{a}{2})$  за скобку, найдем

$$d = \left(c + \frac{a}{2}\right) \frac{4\sqrt{3}}{3}. \quad (657)$$

Определим величины  $c$  и отрезок  $AK$ . Из рис. 122 следует

$$AK = \frac{a}{2} \sqrt{2}, \quad (658)$$

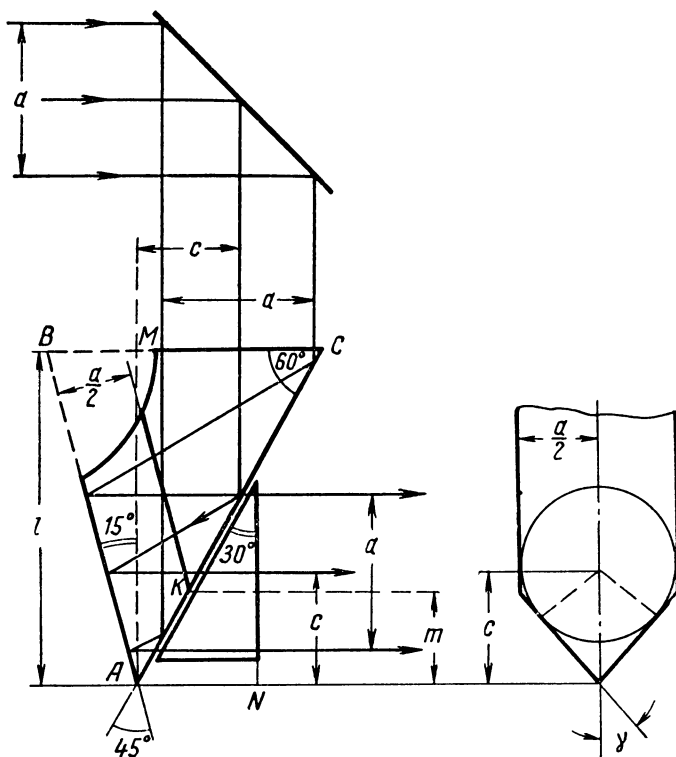


Рис. 122

его проекция на плоскость, перпендикулярную выходящему чку,

$$m = AK \cos 30^\circ = AK \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{a}{4} \sqrt{6} \quad (659)$$

Далее нетрудно определить угол  $\gamma$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{a}{2m} = \frac{2}{\sqrt{6}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \quad (660)$$

и, наконец, отрезок  $c$  из уравнения

$$a = 2c \sin \gamma. \quad (661)$$

При этом, как и в других подобных случаях, вершины  $A$  и  $B$  основной призмы могут быть отрезаны. Нетрудно видеть, что в этом случае грань  $AC$  работает с полным внутренним отражением.

#### § 48. Призмы, развертывающиеся в наклонную плоско-параллельную пластинку, и призмы с разделением хода лучей

**Призма Дове.** Призма Дове обычно имеет входную и выходную грани, наклоненные к оси входящего и выходящего пучков на углы  $45^\circ$ . Имея только одно отражение, призма Дове развертывается в наклонную под  $45^\circ$  к оси плоско-параллельную пластинку. Схема и развертка призмы Дове представлены на рис. 123.

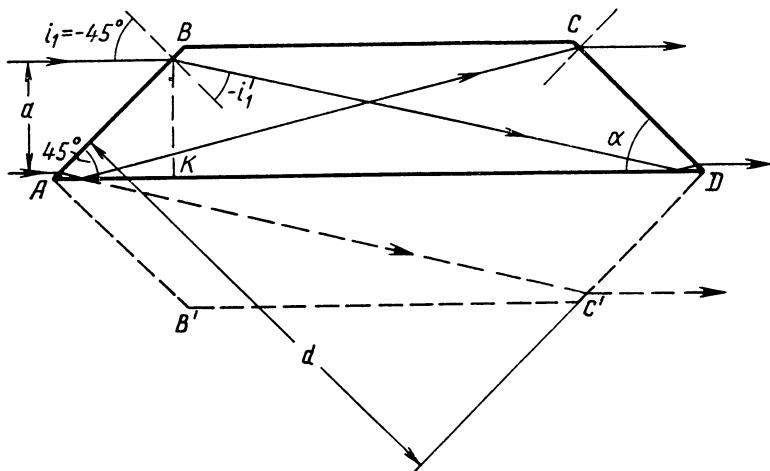


Рис. 123

Определим длину гипотенузной грани  $AD$  призмы, которая, как это видно из рисунка, сейчас же определит и длину (толщину) развертки  $d$ . Определим угол  $i_1'$ . На основании закона преломления

$$\sin i_1' = \frac{1/\sqrt{2}}{2}. \quad (662)$$

Из треугольника  $BKD$  находим

$$KD = BK \operatorname{tg} (i_1' + 45^\circ) = a \operatorname{tg} (i_1' + 45^\circ) \quad (663)$$

и полную длину гипотенузной грани

$$AD = KD + a = a[1 + \operatorname{tg}(i_1' + 45^\circ)]. \quad (664)$$

Длина хода луча

$$d = AD \frac{\sqrt{2}}{2} = a \frac{\sqrt{2}}{2} [1 + \operatorname{tg}(i_1' + 45^\circ)]. \quad (665)$$

Необходимо отметить, что призма Дове может быть осуществлена и при углах наклона входных граней призмы к оси, не равных  $45^\circ$ ; тогда, очевидно, формулы (662), (663), (664), (665) будут несколько усложнены. Вместо (662) будем иметь

$$\sin i_1' = \frac{\sin(90^\circ - \alpha)}{n}. \quad (666)$$

Тогда отрезок

$$KD = a \operatorname{tg}(i_1' + \alpha), \quad (667)$$

а отражающая грань

$$AD = KD + \frac{a}{\operatorname{tg} \alpha} = a \left[ \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \operatorname{tg}(i_1' + \alpha) \right] \quad (668)$$

и, наконец, длина хода

$$d = AD \sin \alpha = a \left[ \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \operatorname{tg}(i_1' + \alpha) \right] \sin \alpha. \quad (669)$$

Необходимо отметить, что призму Дове во избежание внесения астигматизма и комы на оси системы следует устанавливать в параллельном ходе лучей.

Отражательная призма с двумя отражениями (рис. 124) аналогична пентапризме и дает угол отклонения отраженного пучка, равный  $90^\circ$ . Призма имеет три рабочие грани:  $AB$  — входную грань,  $BC$  — работающую на полном внутреннем отражении, и одновременно выходную и зеркальную грань  $DC$ . Определим в этой призме длину хода луча

$$d = BC = \frac{AB}{\operatorname{tg} i_1'}. \quad (670)$$

Но так как грань

$$AB = a \sqrt{2}, \quad (671)$$

а на основании закона преломления

$$\sin i_1' = \frac{\sqrt{2}}{2n}, \quad (672)$$



то, пользуясь (671) и (672), формулу (670) преобразуем к виду

$$d = \frac{a\sqrt{2}}{\operatorname{tg} i_1'} = 2an \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} = 2a \sqrt{n^2 - \frac{1}{2}}. \quad (673)$$

При  $n = 1,5811$

$$n^2 = 2,5; \quad d = a 2 \sqrt{2}.$$

Таким образом, призма по своему сечению может быть вписана в два квадрата со стороной  $a\sqrt{2}$ .

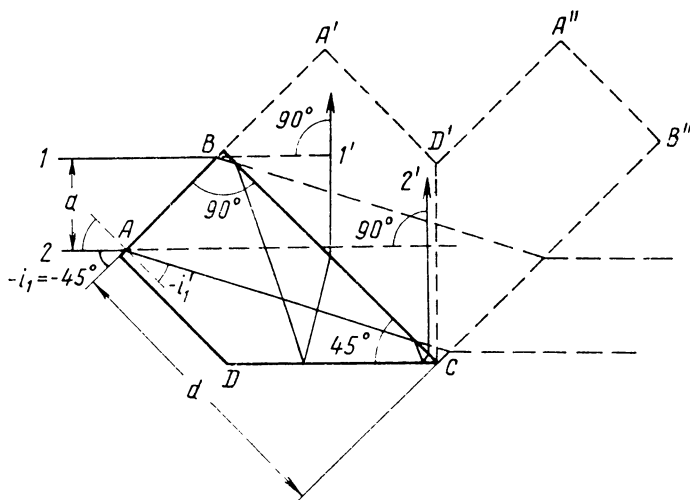


Рис. 124

**Призма Чуриловского.** Рассматривая призму Дове, видели, что она имеет довольно большую величину гипотенузной грани, которая иногда может оказаться нежелательной по конструктивным соображениям. Профессором В. Н. Чуриловским была предложена конструкция призмы с меньшими габаритами из двух преломляющих клиньев, приклеенных к зеркалу, параллельному оси пучка (рис. 125). Два одинаковых клина I и II расположены на плоскости зеркала симметрично; луч, проходящий через верхнюю часть клина I параллельно оси, отклоняется вниз на угол  $\epsilon$  и падает на горизонтальное зеркало у самого основания клина II. После отражения от зеркала этот луч отклоняется вверх, но сейчас же встречает клин II, а после преломления на первой поверхности II клина выходит из нижней части параллельно оси. Развертка системы Чуриловского приводится к плоско-параллельной пластинке с наклонным плоско-параллельным вырезом, который, по сути дела, эквивалентен наклонной плоско-

параллельной пластинке. Определим основные элементы системы Чуриловского. Обращаясь к рис. 125, определим величину расстояния между основаниями обоих клиньев вдоль плоскости зеркала. Находим

$$l + c = \frac{a}{\operatorname{tg} \varepsilon}, \quad (674)$$

где

$$c = a \operatorname{tg} \alpha. \quad (675)$$

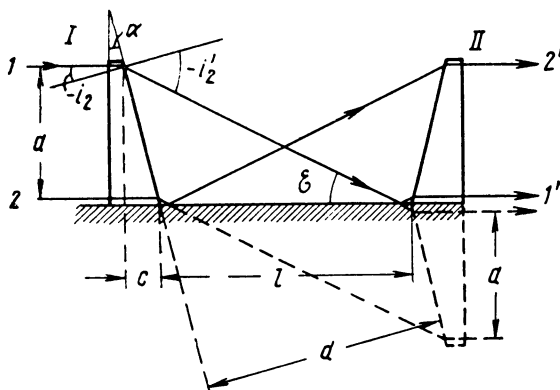


Рис. 125

Таким образом,

$$l = a \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon} - \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (676)$$

Толщина наклонного плоско-параллельного выреза

$$d = l \cos \alpha = a \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon} - \operatorname{tg} \alpha \right) \cos \alpha. \quad (677)$$

Оборачивающая призма с разделением хода  
Иногда встречается необходимость в применении оборачивающей призмы с полным или неполным оборачиванием изображения с весьма короткой длиной хода. В этих случаях оборачивающая призма должна состоять из трех компонентов с разделением хода лучей (рис. 126). Компоненты I и II представляют собой две призмы с двумя отражениями, создающие углы отклонения в  $60^\circ$  от первоначального направления; III компонент — две призмы с одним отражением, обеспечивающие совмещение пучков, первоначально разделенных призмами I и II. Все три компонента развертываются в плоско-параллельные пластинки, перпендикулярные

оси системы. Длины этих разверток в случае призмы с оборачиванием только лишь в плоскости чертежа могут быть определены: для призм I и II — вдоль луча, идущего вдоль большего из катетов; для призмы III — вдоль высоты. Для всех трех компонентов длина хода

$$d_I = d_{II} = d_{III} = \frac{a}{2} \sqrt{3}, \quad (678)$$

а для всей призмы

$$d = d_I + d_{III} = a \sqrt{3}. \quad (679)$$

Следует обратить внимание, что между компонентами I и III (или II и III) имеется воздушный промежуток

$$l = \frac{a}{2} \operatorname{tg} 30^\circ = \frac{a \sqrt{3}}{6}. \quad (680)$$

Переходя к редуцированию к воздуху, должны редуцировать только величину  $d$ ; вместе с тем величина, занимаемая в ходе лучей призмой, будет равна

$$d + l = \frac{a \sqrt{3}}{n} + \frac{a \sqrt{3}}{6} = a \sqrt{3} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{6} \right). \quad (681)$$

Необходимо отметить также, что в рассматриваемой призме пучки лучей 1-2 переходят при оборачивании из верхней половины системы в нижнюю, т. е. так, как это должно было бы быть тогда, когда в оборачивающей призме отсутствует разделение хода.

Рассматриваемой призме может быть придано и полное оборачивание изображения путем нанесения на призмы I и II крыш по длинным катетам; в этом случае, естественно, возникает необходимость учета срезания граней  $AB$  и  $AC$  для призмы I и граней  $AD$  и  $AE$  для призмы II при определении возможного диаметра пучка лучей, пропускаемого через призму.

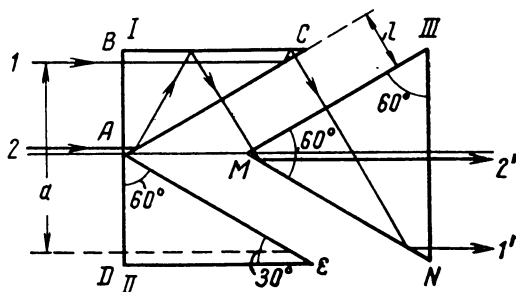


Рис. 126

Так как рассматриваемая призма развертывается в две плоскопараллельные пластинки, перпендикулярные оси, а при оборачивании пучка верхняя его часть переходит вниз, а нижняя часть пучка переходит вверх, рассматриваемая призма может применяться в сходящемся ходе лучей, как и любая из оборотных призм, рассмотренных нами в предыдущем параграфе.

Призма а-ку б. В тех случаях, когда габариты призмы Дове неприемлемы, нередко прибегают к призме с разделением хода

лучей, известной под названием призмы-куб (рис. 127, а), составленной из двух призм Дове, сложенных гипотенузными плоскостями. В этом случае при тех же габаритах пучка призма-куб будет иметь вдвое меньшие габариты, нежели призма Дове; это

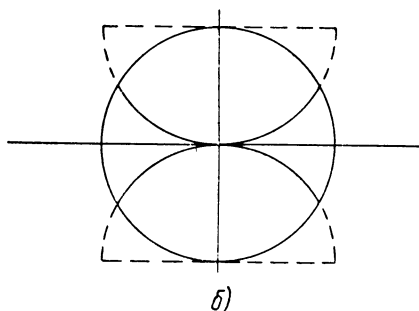
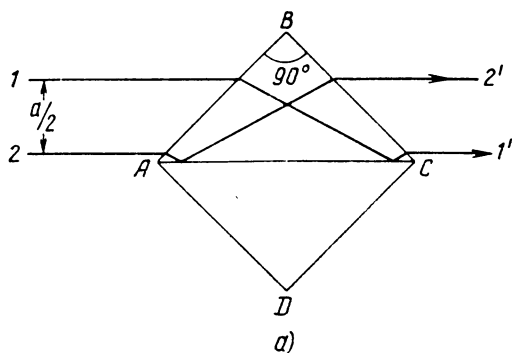


Рис. 127

особенно выгодно тогда, когда применение призмы Дове необходимо для визирования в пределах  $0-90^\circ$  или больше.

При работе всегда необходимо иметь в виду два обстоятельства: во-первых, оба элемента призмы-куб разворачиваются, как и у призмы Дове, в наклонные под углом  $45^\circ$  к оси плоскопараллельной пластинки и, во-вторых, при оборачивании пучков в отдельных элементах призмы-куб верхняя часть пучка после оборачивания не переходит в нижнюю часть системы и наоборот, как это должно быть при правильной работе оборачивающей системы. Поэтому призму-куб можно применять только в параллельных пучках лучей.

Другая особенность работы призмы-куб (рис. 127, б) заключается в следующем.

Если вошедший в призму-куб параллельный пучок лучей имел форму кругового цилиндра, то вследствие оборачивания его отдельных частей широкая часть пучка, ограниченная дугой окружности, будет расположена вблизи оси системы. Если пучок лучей после призмы-куб должен будет попасть в круглое отверстие того же диаметра, что и начальный диаметр пучка, то произойдет срезаание выступающих снаружи широких частей пучка.

Таким образом, призма-куб сильно деформирует выходной зрачок, будучи размещенной внутри системы; это последнее обстоятельство еще более сужает область применения призмы-куб. Однако применение призмы-куб очень выгодно для обеспечения широкого диапазона углов визирования, например  $\pm 90^\circ$  от исходного направления.

Сдвоенная ромбическая призма. В § 46 уже говорилось, что обыкновенная ромбическая призма не может обладать базисом, меньшим ширины пучка  $a$ , и длиной луча, меньшей  $2a$ . Однако для уменьшения длины хода в ромбической призме (что может способствовать, например, увеличению поля зрения в очулях, внутри которых размещается ромбическая призма), таковую можно осуществить, прибегая к разделению хода из двух составляющих ромбических призм (рис. 128). Нетрудно видеть, что в этом случае величина базиса равна  $\frac{a}{2}$  вместо  $a$ , а длина хода — ширина пучка  $a$ .

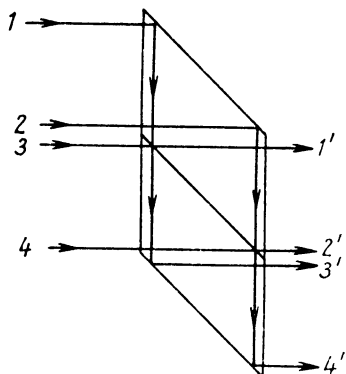


Рис. 128

Отклоняющая призма с разделением хода. На рис. 129 представлена призма с постоянным углом отклонения, равным  $60^\circ$ , которая состоит из двух призм с двумя отражениями. Длина хода луча в обоих элементах призмы одинакова и равна

$$d = a \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (682)$$

Характерная особенность этой призмы в том, что верхняя часть пучка при отсутствии оборачивания переходит вниз; нижняя же

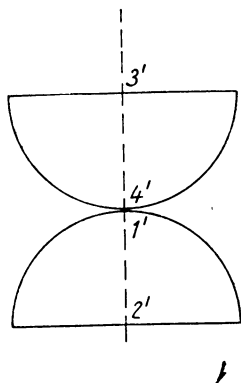
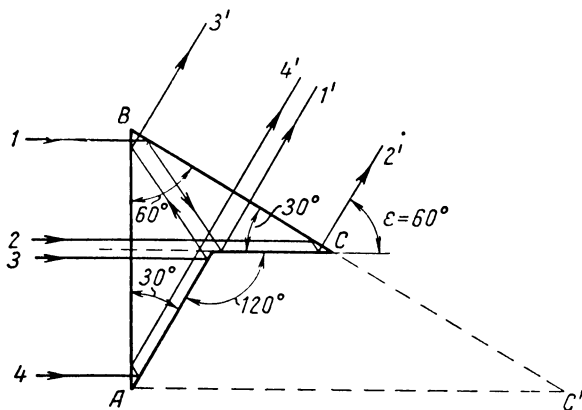


Рис. 129

часть пучка переходит вверх. Таким образом происходит перестройка пучка, аналогичная таковой при работе призмы-куб. Следовательно, эта призма должна, несмотря на то что она развер-

тывается в плоско-параллельные пластинки, перпендикулярные оси пучка, устанавливаться в параллельном ходе перед системой как призма-куб. На рис. 129 пунктиром показаны для сопоставления габариты призмы, дающей тот же угол отклонения, но без разделения хода лучей.

## Глава XIV

### ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПРИЗМЫ

#### § 49. Работа вращающегося зеркала

В тех случаях, когда необходимо изменить направление либо входящего, либо выходящего пучка лучей, прибегают к помощи вращающегося зеркала или системы вращающихся зеркал.

На рис. 130 представлены два случая, когда ось, вокруг которой вращается зеркало, совпадает с осью падающего на зеркало

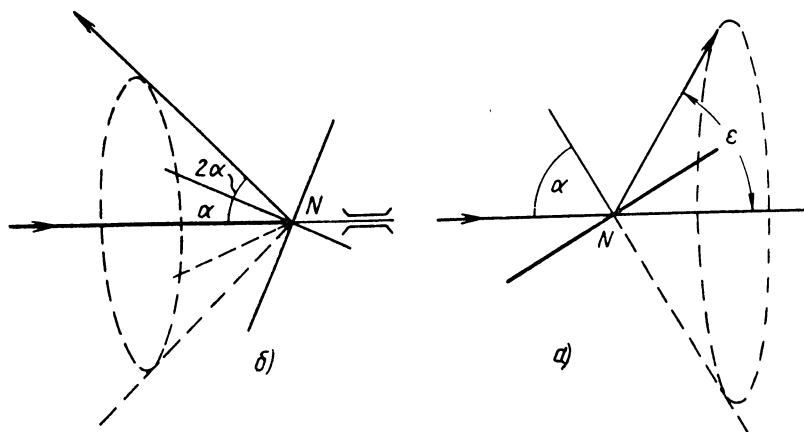


Рис. 130

пучка. Нетрудно видеть, что при вращении зеркала происходит вращение нормали вокруг оси падающего пучка, что сейчас же определит нам направление оси отраженного пучка, которая будет вращаться, оставаясь в той же самой плоскости, в которой находятся нормаль и ось падающего пучка. Но так как ось падающего пучка совпадала с осью вращения зеркала, то отсюда следует, что ось отраженного пучка будет вращаться вокруг оси вращения зеркала, описывая при этом в пространстве некоторый круговой конус. Этот круговой конус может обратиться в плоскость, перпендикулярную оси, в том случае, когда угол отклонения луча равен  $90^\circ$ .

Перейдем к рассмотрению общего случая работы вращающегося зеркала, когда луч, падающий на вращающееся зеркало, не совпадает с осью, вокруг которой вращается зеркало.

Картина работы зеркала в этом случае представлена на рис. 131, а. Ось  $OZ$  — ось вращения зеркала; плоскость зеркала пересекается с осью вращения в точке  $O$ . Будем полагать, что падающий на зеркало луч  $BO$  (который в последующем можно рассматривать как ось некоторого параллельного пучка лучей) претерпевает отражение в точке  $O$ . Обозначим угол, на который отклоняется изображение оси вращения зеркала  $OA'$ , как и ранее,

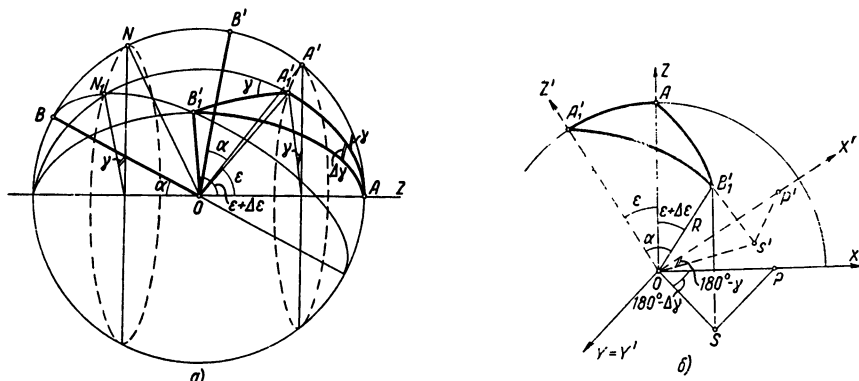


Рис. 131

через  $\epsilon$ . Угол между падающим на зеркало лучом и осью вращения обозначим через  $\alpha$ . Из точки  $O$  как из центра построим сферу произвольного радиуса  $R$ . Первоначально предположим, что плоскость главного сечения зеркала, проходящая через нормаль зеркала и ось вращения, совпадает с плоскостью чертежа. Так как падающий на зеркало луч также лежит в плоскости чертежа, то очевидно, что и отраженный от зеркала луч  $OB'$  также будет находиться в плоскости чертежа. Нетрудно определить угол между отраженным лучом и осью  $OZ$ , который будет равен  $\epsilon + \alpha$ .

Повернем зеркало вокруг оси вращения на некоторый угол  $\gamma$ . В этом случае на угол  $\gamma$  повернется плоскость главного сечения зеркала с лежащими в ней нормалью  $ON$  и отраженным в зеркале изображением оси вращения; обозначим точку пересечения нового изображения оси со сферой через  $A_1'$ .

Падающий луч  $BO$ , как неподвижный в пространстве и принадлежащий плоскости чертежа, должен находиться в плоскости, составляющей с плоскостью главного сечения зеркала угол  $\gamma$ . Отраженный луч после поворота зеркала также выйдет из плоскости главного сечения зеркала и пересечет сферу в точке  $B_1'$ . Обозначим через  $\Delta\gamma$  угол между плоскостью главного сечения и пло-

скостью, проходящей через ось вращения и отраженный луч, а через  $\varepsilon + \Delta\varepsilon$  — угол между отраженным лучом и осью вращения. Определим эти углы аналитически.

На рис. 131, а, согласно сказанному, плоскость  $B_1'OA$  наклонена к плоскости  $A_1'OA$  на угол  $\Delta\gamma$ ;  $\angle B_1'OA = \varepsilon + \Delta\varepsilon$  и  $\angle A_1'OA = \varepsilon$ ; по свойству плоских зеркал, угол между отраженным лучом и изображением оси вращения  $B_1'OA_1'$  равен углу  $\alpha$ , который образован падающим лучом  $BO$  и осью вращения, а угол между плоскостью, проведенной через отраженный луч и ось вращения, и плоскостью главного сечения зеркала равен углу  $\gamma$ , который образован плоскостью, проходящей через падающий луч и ось вращения, и плоскостью главного сечения.

Для удобства выводов совместим новое положение главного сечения зеркала с плоскостью чертежа (рис. 131, б). В центре  $O$  сферы поместим начало прямоугольной системы координат. Ось  $Z$  направим по оси вращения, ось  $X$  — в плоскости главного сечения зеркала, ось  $Y$  — перпендикулярно ей. Введем вторую систему координат  $X', Y', Z'$ , повернув первую около оси  $Y$  на угол  $\varepsilon$ . Ось  $Z'$  второй системы координат, очевидно, совпадает с изображением оси вращения  $OA_1'$ . Обозначим через  $S$  проекцию точки  $B_1'$  на плоскость  $XOY$ , через  $S'$  — проекцию  $B_1'$  на плоскость  $X'OY'$ . Проекции этих точек на оси  $X$  и  $X'$  обозначены буквами  $P$  и  $P'$ . Определим координаты точки  $B_1'$  в обеих системах координат. Из рис. 131, б следует:

$$\left. \begin{aligned} x &= -R \sin(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \cos \Delta\gamma \\ y &= R \sin(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \sin \Delta\gamma \\ z &= R \cos(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (683)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= -R \sin \alpha \cos \gamma \\ y' &= R \sin \alpha \sin \gamma \\ z' &= R \cos \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (684)$$

Из формул перехода от одной системы координат к другой или непосредственно из рис. 130, б получаем

$$\left. \begin{aligned} x &= x' \cos \varepsilon - z' \sin \varepsilon \\ y &= y' \\ z &= x' \sin \varepsilon + z' \cos \varepsilon \end{aligned} \right\}. \quad (685)$$

После подстановки значений координат и сокращения на  $R$  получим

$$\sin(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \cos \Delta\gamma = \sin \alpha \cos \gamma \cos \varepsilon + \cos \alpha \sin \varepsilon, \quad (686)$$

$$\sin(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \sin \Delta\gamma = \sin \alpha \sin \gamma, \quad (687)$$

$$\cos(\varepsilon + \Delta\varepsilon) = -\sin \alpha \cos \gamma \sin \varepsilon + \cos \alpha \cos \varepsilon. \quad (688)$$



Эти формулы можно получить непосредственно из рассмотрения сферического треугольника  $AA_1'B_1'$ .

Разделив второе равенство на первое, получим

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma = \frac{\sin \alpha \sin \gamma}{\sin \alpha \cos \epsilon \cos \gamma + \cos \alpha \sin \epsilon} = \frac{\sin \gamma}{\cos \epsilon \left( \frac{\operatorname{tg} \epsilon}{\operatorname{tg} \alpha} + \cos \gamma \right)}. \quad (689)$$

Формула (688) может быть представлена в несколько ином виде

$$\cos(\epsilon + \Delta\epsilon) = \cos(\epsilon + \alpha) + \sin \epsilon \sin \alpha (1 - \cos \gamma). \quad (690)$$

Формулы (690) и (689) определяют угловые координаты отраженного от вращающегося зеркала луча, падающего на зеркало под некоторым углом к его оси вращения.

Рассмотрим несколько частных случаев работы плоского зеркала.

а. Угол отклонения  $\epsilon$  отраженного изображения оси вращения мал. В этом случае (689) преобразуется и будет иметь вид

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma \cong \frac{\sin \gamma}{\frac{\epsilon}{\operatorname{tg} \alpha} + \cos \gamma} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{1 + \frac{\epsilon}{\operatorname{tg} \alpha \cos \gamma}} = \left( 1 - \frac{\epsilon}{\operatorname{tg} \alpha \cos \gamma} \right) \operatorname{tg} \gamma. \quad (691)$$

Заметим, что это справедливо лишь для значений  $\cos \gamma \gg \epsilon$ , так как в противном случае, когда угол  $\epsilon$  нельзя считать малым по отношению к  $\cos \gamma$ , знаменатель в (691) нельзя рассматривать, как мало отличающийся от единицы.

Поэтому окончательной формулой (691) можно пользоваться лишь в пределах I четверти окружности; однако и в этих пределах нетрудно установить, что дополнительный угол поворота  $\Delta\gamma$  приблизительно равен самому повороту главного сечения зеркала  $\gamma$ , а в случае  $\epsilon = 0$  значение  $\Delta\gamma$  будет точно равно  $\gamma$ . Таким образом, можно написать

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma = \operatorname{tg} \gamma, \quad (692)$$

т. е.

$$\Delta\gamma = \gamma, \text{ если } \epsilon = 0.$$

Обратимся к формуле (688). В рассматриваемом случае она может быть представлена в виде

$$\cos \epsilon \cos \Delta\epsilon - \sin \epsilon \sin \Delta\epsilon = \cos \epsilon \cos \alpha - \sin \epsilon \sin \alpha \cos \gamma, \quad (693)$$

а пренебрегая степенями  $\epsilon$  выше первой,

$$\cos \Delta\epsilon - \epsilon \sin \Delta\epsilon = \cos \alpha - \epsilon \sin \alpha \cos \gamma. \quad (694)$$

Если  $\epsilon = 0$ , (694) примет вид

$$\cos \Delta\epsilon = \cos \alpha, \quad (695)$$

т. е.

$$\Delta\epsilon = \alpha.$$

Поэтому, заменяя в (694) значение  $\sin \Delta\epsilon$  значением  $\sin \alpha$ , сделаем ошибку выше первого порядка; таким образом,

$$\cos \Delta\epsilon = \cos \alpha + \epsilon \sin \alpha (1 - \cos \gamma). \quad (696)$$

Из (696) нетрудно видеть, что величина угла, образованного отраженным лучом и осью вращения системы, будет мало изменяться при изменении угла  $\gamma$  и будет постоянной при угле  $\epsilon = 0$ .

Случай, когда  $\epsilon$  меньше  $90^\circ$ , охватывает случай совмещения оси вращения с плоскостью зеркала, при малых  $\alpha$  это соответствует работе призмы или системы призм, вращающих изображение. Положим, угол  $\alpha = 90^\circ$  и луч падает на зеркало перпендикулярно оси вращения; тогда (692) для угла  $\Delta\gamma$  сохранится неизменной; что же касается формулы (695), то при  $\epsilon = 0$  и  $\alpha = 90^\circ$

$$\cos(\epsilon + \Delta\epsilon) = 0; \quad \Delta\epsilon = 90^\circ = \text{const.}$$

Следовательно, случай «а» является характерным для работы простого отклоняющего зеркала с осью вращения, перпендикулярной к оси пучка.

В случае «б» угол отклонения  $\epsilon$  отраженного изображения оси вращения велик и близок к  $90^\circ$ . Преобразуем (689) следующим образом:

$$\text{tg } \Delta\gamma = \frac{\sin \gamma}{\frac{\sin \epsilon}{\text{tg } \alpha} + \cos \gamma \cos \epsilon}. \quad (697)$$

При  $\epsilon = 90^\circ$  (697) будет иметь вид

$$\text{tg } \Delta\gamma = \sin \gamma \text{tg } \alpha. \quad (698)$$

Рассмотрим (688) для  $\epsilon = 90^\circ$ :

$$\cos(\epsilon + \Delta\epsilon) = -\sin \Delta\epsilon = -\sin \alpha \cos \gamma. \quad (699)$$

Это возможно для зеркала, наклоненного под углом  $45^\circ$  к оси вращения (простой прямоугольной призмы).

Проиллюстрируем работу вращающегося зеркала графически. На рис. 131, а в результате осуществления кругового вращения зеркала точка  $A'$  опишет окружность, а прямая  $A'C$ , касательная к вспомогательной сфере, — круговой конус с вершиной в точке  $C$ .

Эту коническую поверхность можно развернуть на плоскость, сохранив при этом как длину образующей  $A'C$ , так и длины дуг  $A'A_1'$  и т. д.

Напомним основные соотношения, которые получаются при такой развертке конуса. На рис. 132 выделен круговой конус, опирающийся на окружность, описываемую точкой  $A'$  при вращении зеркала вокруг его оси (рис. 131, а). Из рис. 132 следует, что величина радиуса основания конуса равна

$$r = R \sin \epsilon. \quad (700)$$

Величина  $\rho$  образующей конуса, равная радиусу развертки, уже была нами определена,

$$\rho = R \operatorname{tg} \epsilon. \quad (701)$$

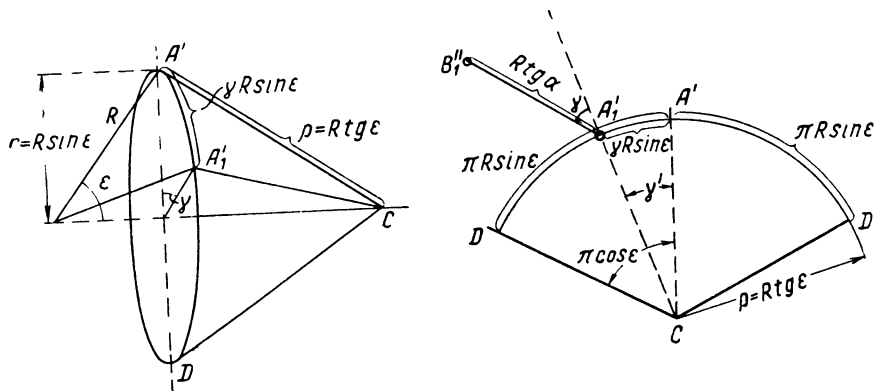


Рис. 132

Длина дуги развертки, равная длине окружности основания конуса,

$$s = 2 \pi r = 2 \pi R \sin \epsilon, \quad (702)$$

а полный угол развертки

$$\frac{s}{\rho} = 2 \pi \cos \epsilon. \quad (703)$$

Угол  $\gamma'$  на развертке, соответствующий углу  $\gamma$  конуса, определится из равенства дуг

$$r \gamma = \rho \gamma', \quad (704)$$

откуда

$$\gamma' = \frac{r}{\rho} \gamma = \gamma \cos \epsilon. \quad (705)$$

Осуществляя развертку конуса, отобразим тем самым на плоскости взаимное расположение главных сечений зеркала при его

вращении; при этом все направления отраженных от зеркала изображений оси вращения должны быть перпендикулярными плоскости рисунка.

Благодаря этому при построении на развертке направления плоскостей, в которых лежат отраженные зеркалом лучи, соответствующие падающему под углом  $\alpha$  к оси вращения лучу, составят те же самые углы  $\gamma$  с направлениями из центра  $C$  развертки на любую из рассматриваемых точек.

Таким образом, строя на развертке некоторый отрезок, равный отрезку  $A_1'B_1' = R \operatorname{tg} \alpha$ , под углом  $\gamma$  к направлению  $CA_1'$ , наглядно проиллюстрируем поведение отраженного зеркалом луча, который при падении на него составлял некоторый постоянный угол  $\alpha$  с осью вращения зеркала.

Следует заметить, что отрезок  $A_1'B_1''$  не определяет собой на развертке положения точки пересечения отраженного луча с поверхностью развертываемого конуса; для такого отображения мы должны были бы получить на развертке не прямую, а некоторую кривую, так как на плоскости, определяемой отраженным лучом и отраженной осью, коническая поверхность вырежет, как известно, кривую второго порядка, преобразуемую при развертке конуса в еще более сложную кривую. Сообразно этой методике, на рис. 133 рассмотрен ряд различных, наиболее характерных случаев.

1. Если угол  $\epsilon = 0$ , основание конуса будет точкой  $C$ , так как обращаются в нуль  $r$  и  $\rho$ . Тем не менее на основании (705) приходим к равенству углов  $\gamma'$  и  $\gamma$ ; поэтому направление плоскости отраженного луча будет строиться из точки  $C$ , составляя при этом угол с осью  $z$ , равный

$$\gamma' + \gamma = 2\gamma. \quad (706)$$

Из (706) приходим к выводу, что при повороте зеркала на угол  $\gamma$  плоскость, в которой лежит отраженный луч, повернется на угол  $2\gamma$ , т. е. такой, что при однократном повороте зеркала вокруг оси, отраженный луч obeжит окружность дважды. Нетрудно видеть, что первый случай соответствует случаю вращения изображения вокруг оси, рассмотренному нами ранее.

2. Если угол  $\epsilon$  невелик, угол  $\alpha$  превышает угол  $\epsilon$ ; в этом случае развертка конуса уже не будет точкой, а угол развертки будет близок к  $360^\circ$ ; точка  $B'$  опишет при повороте вправо и влево две спиралевидные кривые, которые при переходе к предельному случаю  $\epsilon = 0$  (только что рассмотренному нами) перейдут в двоячную окружность.

3. Если угол  $\epsilon = 60^\circ$ , то развертка конуса представится в виде сектора, стягиваемого полуокружностью, и угол поворота плоскости, в которой располагается отраженный зеркалом луч при крайних положениях зеркала, будет составлять с первоначальным направлением угол, равный  $270^\circ$ .

4. Если  $60^\circ < \varepsilon < 90^\circ$ , дуга развертки становится меньше полуокружности, происходит дальнейшее уменьшение угла между начальным направлением и направлениями на концах развертки.

5. Когда угол  $\varepsilon = 90^\circ$ , вершина  $C$  конуса удаляется в бесконечность и конус превращается в цилиндр, а дуга развертки при

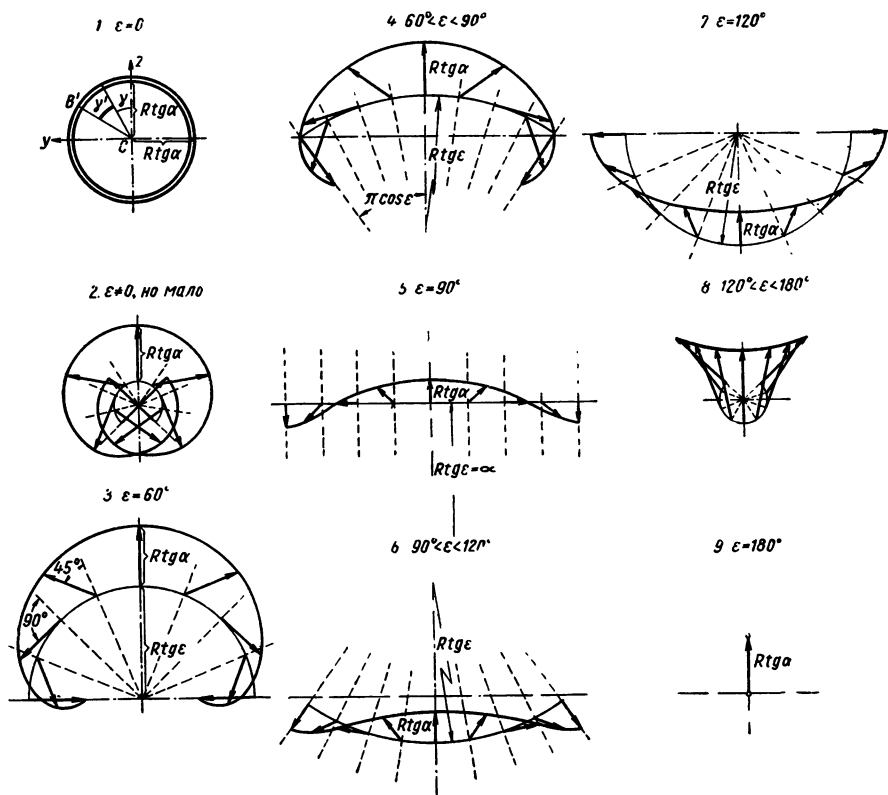


Рис. 133

этом выпрямляется. Угол поворота плоскости, содержащей отраженный луч, на концах развертки делается равным  $180^\circ$ .

6. Если угол  $\varepsilon$  определяется неравенством  $90^\circ < \varepsilon < 120^\circ$ , этот случай характеризуется переносом вершины  $C$  конуса через бесконечность слева от начала координат; соответственно этому должны будем рисовать положение центра развертки уже не внизу, а вверху рисунка. При этом угол между первоначальным направлением плоскости отраженного луча и направлениями на концах развертки будет лежать в пределах между  $180$  и  $90^\circ$ .

7. Когда  $\varepsilon = 120^\circ$ , развертка конуса снова будет ограничена, как и в 3 случае, полуокружностью, однако центр развертки будет

располагаться вверху и угол между направлениями плоскости отраженного луча по концам развертки и первоначальным направлением составит  $90^\circ$ .

8. Если имеем неравенство  $120^\circ < \varepsilon < 180^\circ$ , то этот случай эквивалентен 2 и развертка конуса будет также больше полуокружности, а угол между плоскостями, в которых располагается отраженный луч, будет лежать в пределах между  $90$  и  $0^\circ$ .

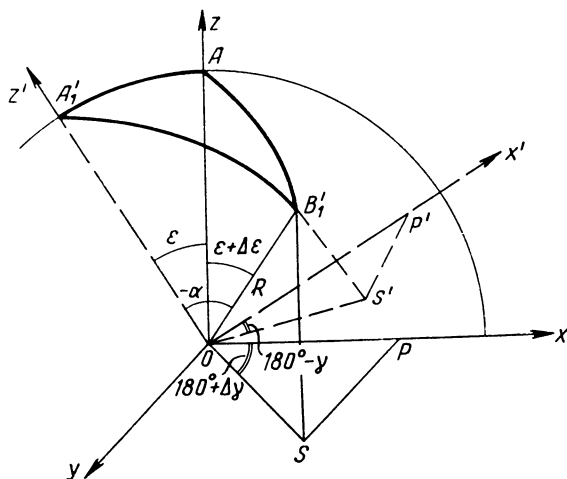


Рис. 134

9. Если этот случай рассматривать как предельный переход от ранее рассмотренного случая, развертка конуса аналогично 1 случаю превращается в точку, направление плоскости отраженного луча становится постоянным и совпадает с зеркальной плоскостью.

Пара вращающихся зеркал. Пару вращающихся зеркал, главные сечения которых совпадают одно с другим, можно рассматривать, как это и делали ранее, в виде телескопической системы с увеличениями  $V_t$  и  $V_s$ , равными единице, и в равной степени с обоими угловыми увеличениями  $W_t$  и  $W_s$ , также равными единице.

Поэтому работу системы двух зеркал можно рассматривать как работу одного вращающегося зеркала в ранее рассмотренном случае, учитывая, однако, изменение увеличений в меридиональной плоскости. Это изменение увеличений при сохранении угла падающего луча выразится в том, что угол отраженного луча изменит знак на обратный, равно как изменится на обратный поворот плоскости отраженного луча по отношению к плоскости главного сечения обоих зеркал. В силу этих соображений знаки углов на рис. 131, б можно изменить так, как показано на рис. 134, пользуясь которым (аналогично рис. 131, б), найдем выражения для

углов  $\Delta\gamma$  и  $\varepsilon + \Delta\varepsilon$ . Опуская совершенно аналогичные предыдущему выводы и преобразования, получаем

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma = \frac{\sin \gamma}{\cos \varepsilon \left( \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{\operatorname{tg} \alpha} - \cos \gamma \right)} \quad (707)$$

и для угла  $\varepsilon + \Delta\varepsilon$

$$\cos(\varepsilon + \Delta\varepsilon) = \cos(\varepsilon - \alpha) - \sin \varepsilon \sin \alpha (1 + \cos \gamma). \quad (708)$$

Аналогично анализу работы одного вращающегося зеркала можно дать геометрическую интерпретацию работы пары вращающихся зеркал. Однако не будем продлевать вторично подробный анализ и ограничимся лишь указанием, что все рассмотренные нами девять случаев будут иметь место, но их последовательность будет обратной; в 1 случае не будем наблюдать вращения изображения (аналогично 9 случаю при рассмотрении работы плоского зеркала); в последнем же 9 случае получим картину вращения изображения с удвоенной скоростью аналогично 1 случаю для плоского зеркала.

#### § 50. Работа компенсирующей призмы или вращающегося зеркала в сходящемся пучке лучей

В самом общем случае работа вращающегося зеркала определяется следующими элементами (рис. 135):

- 1) углом  $\alpha$  наклона плоскости зеркала к оси вращения  $ox$ ;
- 2) расположением точки пересечения плоскости зеркала с осью вращения относительно положения предметной точки или расстоя-

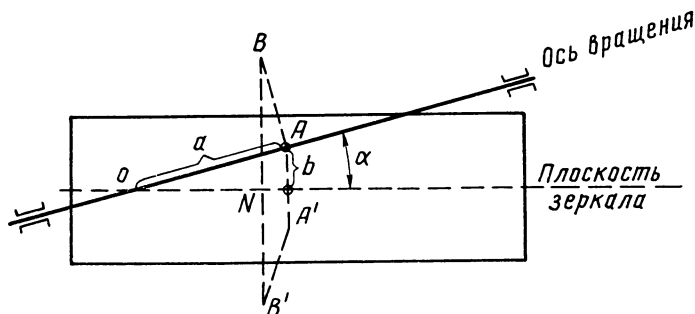


Рис. 135

нием  $b$  от плоскости зеркала точки предмета, лежащей на оси вращения зеркала;

- 3) расстоянием  $a$  рассматриваемой точки предмета от оси вращения зеркала.

Однако общий случай работы вращающегося зеркала в сходящемся ходе лучей практически сводится к частному случаю, когда угол между плоскостью зеркала и осью его вращения мал или равен нулю. Это ограничение возможностей практического применения работы вращающегося зеркала в сходящемся ходе лучей обусловлено тем, что в противном случае (т. е. когда плоскость зеркала не параллельна оси вращения) при работе зеркала возникает изменение угла наклона плоскости изображения к оси системы, что в большинстве случаев приводит к недопустимому ухудшению качества изображения системы, работающей совместно с вращающимся зеркалом.

В силу этих соображений не производится анализа общего случая работы вращающегося зеркала в сходящемся ходе лучей, а разбирается лишь часто встречающийся частный случай, когда плоскость зеркала параллельна оси вращения. На рис. 136 показан вид на плоскость предмета в направлении, перпендикулярном к ней; ось вращения зеркала также предполагается перпендикулярной плоскости предмета; так как приняли, что плоскость зеркала параллельна оси вращения, то на рис. 136 получим проекцию зеркала в виде некоторой прямой  $PQ$ . Полагаем, что ось вращения зеркала проходит через начало координат в точке  $A$ , тогда расстояние от начала координат до прямой  $PQ$  определит расстояние плоскости зеркала от оси вращения.

Нетрудно построить отраженное от зеркала изображение любой точки предмета, опуская из нее перпендикуляр на плоскость зеркала и откладывая на продолжении этого перпендикуляра расстояние от данной точки до плоскости зеркала.

Таким образом можно построить, например, изображение  $B'$  точки предмета  $B$  и изображение  $A'$  начала координат  $A$ . Установим зависимость между углом поворота  $\gamma$  плоскости зеркала и положением изображения  $B'$  точки  $B$ .

Из равных треугольников  $ABC$  и  $A'B'C'$  следует

$$z = a \cos 2\gamma + 2b \cos \gamma; \quad y = a \sin 2\gamma + 2b \sin \gamma. \quad (709)$$

Следовательно, при вращении зеркала около оси, параллельной его плоскости, путь, пробегаемый изображением произвольной точки предмета, определится как геометрическая сумма двух путей, причем первый будет представлять собой окружность, пробегаемую за один оборот зеркала дважды, с радиусом, равным расстоянию  $a$  нашей произвольно выбранной точки от оси вращения; второй слагаемый путь также будет представлять окружность, но пробегаемую за один оборот зеркала один раз; радиус второй окружности определится как удвоенное расстояние от плоскости зеркала до оси вращения. Картина траектории движения изображения  $B'$  произвольной точки предмета  $B$  при вращении зеркала представлена на рис. 137; эта траектория аналогична кривым, упоминаемым в предыдущем параграфе, но отличается от них



тем, что в настоящем случае имеем плоскую кривую, обрисовывающую непосредственно движение точки изображения, в то время как в предыдущем параграфе подобные кривые косвенно иллюстрировали установленные закономерности.

Только что сделанные нами выводы убеждают в возможности вращения изображения не только в параллельном ходе лучей (что было предметом исследования в предыдущем параграфе), но и в ходе лучей сходящихся; нетрудно видеть, что нам пришлось применить для достижения этой цели плоское зеркало, — систему, которую следует отнести ко II группе оборачивания, т. е. к группе,

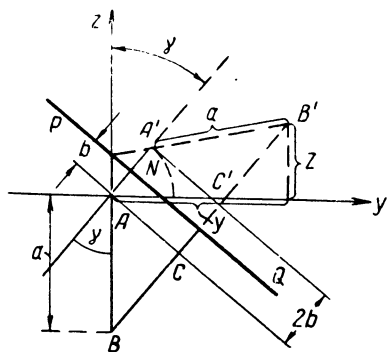


Рис. 136

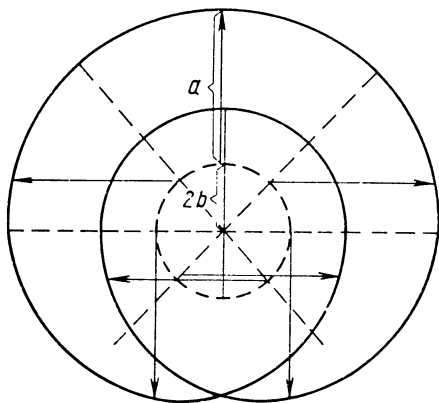


Рис. 137

обладающей по двум взаимно перпендикулярным направлениям увеличения разных знаков. Обращаясь к случаю хода отраженных лучей в обратном направлении, видим, что для решения этой задачи, очевидно, потребовалось бы применить систему, относящуюся к V группе оборачивания, в частности, например, к системе двух зеркал, расположенных под прямым углом. Заметим, что в этом случае за условную плоскость системы надлежит принимать плоскость, проходящую через линию пересечения обоих зеркал или отражательных граней призмы.

Для нахождения условной плоскости зеркала, к которому можно привести любую из систем II или V групп, надлежит найти плоскость как с входящими в систему лучами, так и плоскость отражения этих же входящих лучей, т. е. плоскость, в которой выходящие лучи являются своим собственным продолжением.

## § 51. Работа качающейся призмы

Перейдем к рассмотрению работы качающейся призмы, изменяющей направления оси отраженного ею пучка. Основная задача, решаемая при расчете качающейся призмы, — определить

наивыгоднейшее положение оси качания призмы и получить наименьший возможный габарит при заданном диапазоне углов отклонения и поля зрения системы, совместно с которой работает рассчитываемая призма.

На рис. 138 призма заменена ее разверткой в плоско-параллельную пластинку. Обычно для качающихся призм диапазон углов качания превышает величину угла поля зрения системы, работающей совместно с призмой; поэтому для удобства анализа работы призмы примем ее развертку неподвижной, а ось системы с ее входным зрачком и полем зрения — качающимися. Определим

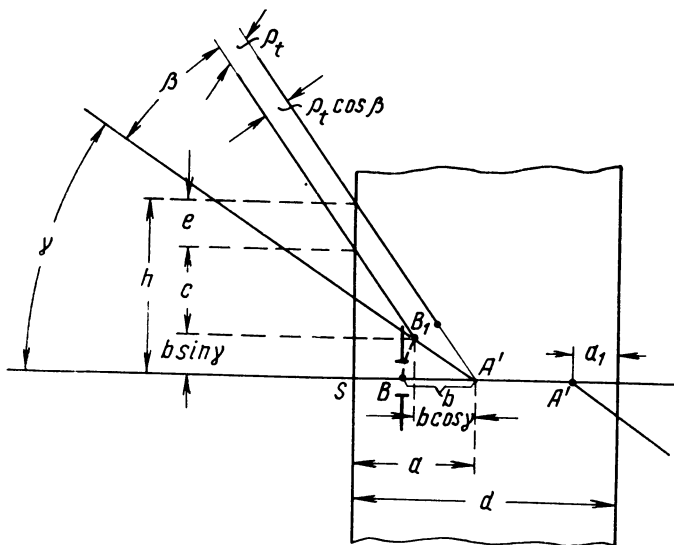


Рис. 138

высоту  $h$  на входной грани призмы, полагая известными расстояние  $a$  оси вращения призмы от входной грани и расстояние  $b$  входного зрачка от оси вращения, угол поворота призмы  $\gamma$  и половину угла поля зрения  $\beta$  системы, работающей с качающейся призмой. Ось вращения предполагается пересекающей ось системы.

Кроме того, будем полагать известным меридиональный полу диаметр  $\rho_t$  сечения наклонного пучка плоскостью, перпендикулярной оси системы.

Нетрудно видеть, что высота  $h$  на первой поверхности равна сумме трех величин

$$h = b \sin \gamma + c + e. \quad (710)$$

Из рис. 138 следует:

$$c = (a - b \cos \gamma) \operatorname{tg} (\gamma + \beta), \quad (711)$$

$$e = \frac{\rho_t \cos \beta}{\cos(\gamma + \beta)} . \quad (712)$$

Таким образом, высота

$$h = b \sin \gamma + (a - b \cos \gamma) \operatorname{tg}(\gamma + \beta) + \frac{\rho_t \cos \beta}{\cos(\gamma + \beta)} . \quad (713)$$

В случае, если ось вращения призмы проходит через центр входного зрачка системы, то тогда  $b = 0$ , а

$$h = a \operatorname{tg}(\gamma + \beta) + \frac{\rho_t \cos \beta}{\cos(\gamma + \beta)} . \quad (714)$$

Случай совмещения зрачка системы существенно упрощает анализ габаритов качающейся призмы, если работу качающейся призмы рассматривать как работу неподвижной призмы с полем зрения, увеличенным на диапазон углов визирования.

Совершенно аналогичную картину наблюдаем и на выходной грани развертки, когда осью вращения  $A$  призмы будет, очевидно, изображение  $A'$  точки  $A$  через развертку нашей призмы.

Поэтому целесообразно для уменьшения габаритов призмы уравнивать расстояния от точек  $A$  и  $A'$  соответственно до входной и выходной граней призмы, так как при этом размеры отверстия на входной и выходной гранях также будут равны. Определим для этого случая величину  $a$  расстояния до оси вращения от входной грани призмы.

Сумма расстояний  $a$  и  $a_1$  от входной грани до оси и от изображения оси до выходной грани должна быть равна величине редуцированной к воздуху толщины развертки, т. е.

$$d' = \frac{d}{n} = a + a_1 = 2a, \quad (715)$$

откуда

$$a = \frac{d}{2n} . \quad (716)$$

Напомним, что формулы (715) и (716) суть формулы приближенные; поэтому пользоваться ими невыгодно в тех случаях, когда величина диапазона углов поворота призмы или поля зрения системы, работающей с призмой, будет велика; в этих случаях можно прибегнуть к определению величины  $a$  как последнего отрезка плоско-параллельной пластинки с толщиной  $\frac{d}{2}$  при предмете, совпадающем с первой поверхностью пластинки.

Таким образом,

$$a = \frac{d}{2n} \sqrt{\frac{1 - \sin^2(\gamma + \beta)}{1 - \frac{\sin^2(\gamma + \beta)}{n^2}}} . \quad (717)$$

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Величина  $2a$ , как правило, всегда меньше толщины плоско-параллельной пластинки  $d$ ; это вытекает как из приближенной формулы (716), так и еще более из точной формулы (717). Поэтому разность

$$b = d - 2a > 0 \quad (718)$$

всегда будет положительна и соизмерима с толщиной пластинки.

В частности, для малых углов  $\gamma$  качания пластинки величина

$$b = d - \frac{d}{n} = \frac{n-1}{n} d, \quad (719)$$

т. е. равна удлинению, создаваемому плоско-параллельной пластинкой. Величина  $b$  может быть названа плечом пластинки.

Качая пластинку вокруг оси, проходящей через точку  $A$ , очевидно, будем поворачивать на те же самые углы и плечо пластинки, благодаря чему точка  $A_1'$ , определяющая своим положением изображение зрачка, расположенного в точке  $A$ , будет описывать дугу окружности с центром, расположенным на оси вращения. Благодаря этому при качании пластинки происходит соответственное перемещение выходного зрачка.

Нетрудно представить себе, что подобное явление будем наблюдать для любой призмы или еще шире, оптической системы, у которой зрачок входа не совпадает со зрачком выхода; в любых случаях, определяя величину и направление такого базиса, легко установить закон, по которому происходит перемещение зрачка выхода при совмещении зрачка входа с осью вращения.

Это явление широко используется при незначительных перемещениях изображения, необходимых, например, для выполнения линейных измерений (оптические микрометры с качающейся плоско-параллельной пластинкой); в некоторых случаях явление перемещения зрачка может быть использовано и для решения некоторых конструктивных задач, например для смещения выходного зрачка с оси оптической системы.

Для иллюстрации изложенного выше рассмотрим в качестве примера работу качающейся прямоугольной призмы, представленной на рис. 139. В исходном положении эта призма дает нам угол отклонения, равный  $90^\circ$ ; положение оси вращения относительно входной или выходной грани может быть определено в первом приближении по формуле (716). Тогда из прямоугольного треугольника, образованного отражением осевого луча на гипотенузой грани призмы и точками, в которых размещаются центр входного зрачка и ось вращения, нетрудно определить величину плеча

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) d. \quad (720)$$

Поворачивая нашу призму в плоскости рисунка на углы  $\pm 45^\circ$ , видим, что возможны два случая, когда отраженные лучи пойдут параллельно входящим лучам (I случай — в том же направлении, II случай — в обратном). Учитывая, что в этих случаях имеем дело с большими углами качания призмы, выгодно для уменьшения габаритов определить положение оси вращения призмы, исходя из величины гипотенузной грани призмы  $l$  в I случае, когда

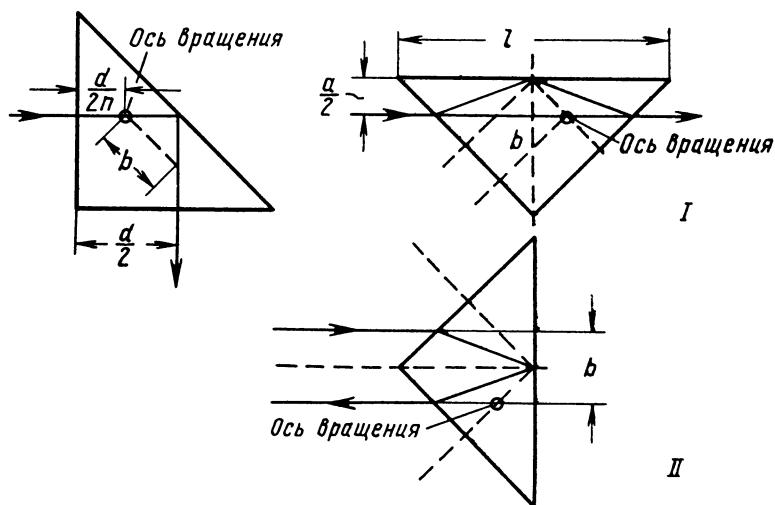


Рис. 139

наша призма работает как призма Дове. Тогда на основании (664) можно получить ширину пучка

$$a = \frac{l}{\operatorname{tg}(i'_i + 45^\circ) + 1} \quad (721)$$

и величину плеча

$$b = a \sqrt{2} = \frac{l \sqrt{2}}{1 + \operatorname{tg}(i'_i + 45^\circ)} \quad (722)$$

## § 52. Оптические шарниры

В различных случаях работы тех или иных оптических приборов иногда встречается необходимость передачи изображения с одного направления на другое, когда угол между этими направлениями является переменной величиной и когда такая передача

изображения не сопряжена с вращением изображения в поле зрения. Оптические устройства, способные решать эту задачу, нередко называют оптическими шарнирами. В ряде случаев оптические шарниры решают задачу изменения угла между двумя оптическими осями, когда этот угол изменяется в одной и той же плоскости; для решения этой задачи предназначаются плоские шарниры, а для изменения угла между осями в пространстве — пространственные.

**Двухзеркальный плоский шарнир.** Конструкция двухзеркального плоского шарнира — одна из наиболее простых конструкций; в случае работы шарнира в параллельном ходе в качестве элемента, осуществляющего изменение угла между двумя направлениями, может быть применен такой элемент, как, например, качающаяся призма, только что рассмотренная в предыдущем параграфе. Однако применение шарнира с таким элементом, несмотря на то, что он способен осуществлять изменение угла отклонения в диапазоне до  $180^\circ$  или даже более, ограничено, так как его можно ставить только лишь в параллельном ходе лучей (ввиду того что в различных положениях качающаяся призма будет разворачиваться в плоско-параллельную пластинку, изменяющую угол своего наклона к оси).

Поэтому для применения двухзеркального шарнира в сходящемся ходе лучей будем вынуждены отказаться от применения качающейся призмы и воспользоваться качающимся зеркалом с наружным алюминированием. Приступая к решению задачи работы шарнира в сходящемся ходе лучей, необходимо обеспечить постоянство положения изображения при постоянном положении предмета во входном колене шарнира при любых углах излома шарнира.

Любой оптический шарнир всегда имеет по меньшей мере два конструктивных элемента: ось, механически связывающую оба колена шарнира, и ось, вокруг которой вращается элемент, оптически сопрягающий оба колена. В рассматриваемом сейчас двухзеркальном оптическом шарнире эти обе оси могут быть совмещены одна с другой при соблюдении условия, что ось шарнира совпадает с плоскостью вращающегося зеркала. Перейдем к непосредственному рассмотрению работы двухзеркального шарнира (рис. 140).

На рис. 140 представлены два положения вращающегося зеркала  $I$  и  $I'$ ; ось, вокруг которой происходит вращение зеркала  $I$ , лежит в плоскости зеркала  $I$  (и  $I'$ ) в точке  $O$ . Точка  $O$ , являясь одновременно и механической осью шарнира, должна сохранять свое положение относительно предмета  $AB$  или  $A_1B_1$  при любых углах излома шарнира, поэтому в обоих случаях расстояния  $a$  и  $b$ , определяющие собой положение предметной точки  $A$  относительно оси, будут оставаться неизменными. При повороте зеркала на угол  $\alpha$  угол отклонения луча изменится на величину  $\epsilon = 2\alpha$ . Следовательно, зеркало в шарнире должно вращаться вдвое мед-



отраженного от зеркала луча, и угол отклонения  $\epsilon$  равен удвоенному углу поворота зеркала  $\alpha$ , а следовательно, оба направления отраженного луча совпадут, то и точки  $K_1'$  и  $K'$  также совпадут одна с другой. Это совпадение и определяет постоянство положения изображения.

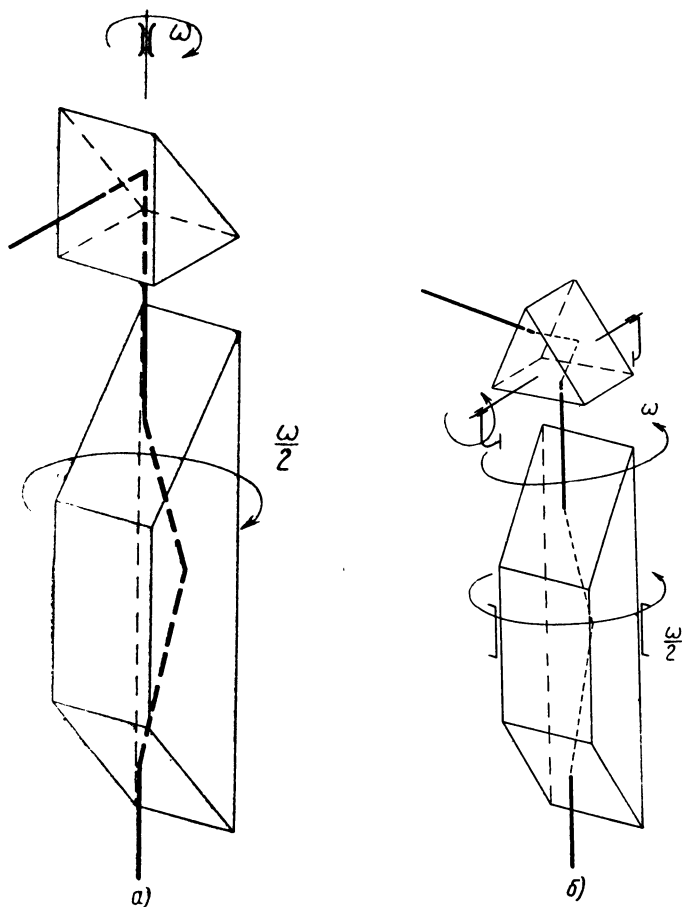


Рис. 141

Второе зеркало II используется для получения нужного направления луча по выходе из шарнира.

Диапазон работы двухзеркального шарнира не очень велик, так как при больших углах излома происходит быстрое увеличение размеров качающегося зеркала, с одной стороны, и, с другой стороны, может происходить пересечение падающих и отраженных пучков; величина рабочего диапазона углов излома достигает 30—40°.



Панорамический плоский шарнир. Панорамический плоский шарнир строится по принципу использования вращения призмы, имеющей угол отклонения луча  $90^\circ$ , вокруг выходящего из призмы луча, как оси вращения (случай V работы вращающегося зеркала, см. § 49). При этом, как это уже было установлено, происходит вращение изображения вокруг оси. В большинстве случаев такое вращение изображения недопустимо; в силу этого приходится вслед за визирной призмой (а принципиально возможно и впереди визирной призмы) размещать какую-либо компенсирующую призму, вращением которой компенсируется вращение изображения, создаваемое первой визирной призмой. Сочетание двух таких призм, например простой прямоугольной призмы, как визирной, и призмы Дове, как компенсирующей, представленное на рис. 141, а, и дает нам конструкцию простого плоского панорамического шарнира. Конечно, применение призмы Дове в панорамическом шарнире ограничивает область его применения областью параллельного хода лучей; с этой целью иногда приходится прибегать к созданию специально параллельного хода лучей в системе для размещения в нем призмы Дове. Однако замена призмы Дове любой другой компенсирующей призмой, развертываемой в плоско-параллельную пластинку, перпендикулярную оси (например, призмой Пехана), позволяет размещать рассматриваемый оптический шарнир в сходящемся ходе лучей.

Четырехзеркальный плоский шарнир. Четырехзеркальный плоский шарнир может быть рассмотрен как частный случай работы

панорамического шарнира, в котором для компенсации вращения изображения применена система, принадлежащая к V группе. В качестве компенсирующего элемента можно выбрать, например, прямоугольную призму с двумя отражениями (рис. 142). Третья прямоугольная призма, дающая четвертое отражение, предполагается принадлежащей к неподвижному колену и, кроме уничтожения зеркальности изображения и придания заданного направления выходящей оси, в работе собственно шарнира не участвует. Призма I, осуществляющая изменение угла визирования, предполагается вращающейся в пространстве с угловой скоростью  $\omega$ ; с этой же скоростью происходит вращение изображения после призмы. Для компенсации вращения изобра-

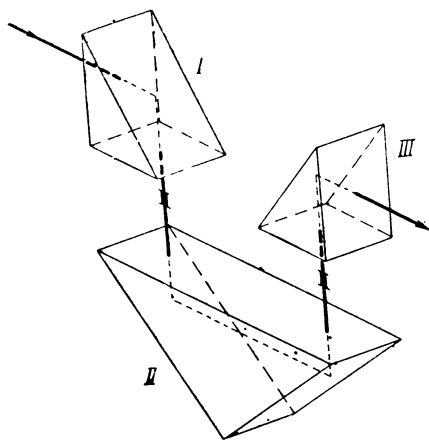


Рис. 142

жения необходимо придать вращение компенсирующему элементу II со скоростью, равной  $\frac{\omega}{2}$ , и в ту же сторону, что и вращение I элемента. Таким образом, угловая скорость вращения I элемента относительно II будет равна разности абсолютных угловых скоростей обоих элементов, т. е.  $\frac{\omega}{2}$ . Руководствуясь этими соображениями в четырехзеркальном шарнире, конструктивно удобно осуществить две оси излома, а шарнир строить не из двух колен, а из трех; причем в первом колене размещают визирную призму, во втором колене — компенсирующий элемент, а в третьем — всю неподвижную часть системы.

Заметим, что в схеме, представленной на рис. 142, четырехзеркальный шарнир осуществлен, как не дающий оборачивания изображения; если же начальное положение компенсатора принять перпендикулярным только что рассмотренному, то тогда четырехзеркальный шарнир обратится в исходном положении в оборачивающую систему Малафеева II рода. Обратим внимание, что и в панорамическом шарнире также можно получить полное оборачивание изображения, если в начальном положении компенсирующую призму повернуть на  $90^\circ$ . В четырехзеркальном шарнире принципиально возможно осуществить диапазон углов визирования до  $360^\circ$ , но при этом свободное вращение в панорамическом шарнире неосуществимо.

**Пространственные оптические шарниры.** Пространственный оптический шарнир всегда можно осуществить, сочетая вместе два плоских шарнира; один из простейших пространственных шарниров можно создать на базе плоского панорамического шарнира, придавая визирной призме угол качания в плоскости ее главного сечения.

Можно заметить, что, используя в качестве второго плоского шарнира качающуюся призму, область применения такого пространственного шарнира должны ограничить параллельным ходом лучей. Переходя к плоскому зеркалу и размещая ось вращения этого зеркала в его плоскости, будем иметь возможность применять пространственный шарнир и в сходящемся ходе лучей. Нетрудно представить себе, что подобный оптический шарнир будет вращаться свободно в горизонтальной плоскости и иметь ограниченные углы визирования в вертикальной плоскости, особенно при работе в сходящемся ходе лучей (см. рис. 141, б).

Пространственный оптический шарнир можно создать и на основе сдвигания плоского панорамического шарнира; при этом вместо применения двух компенсирующих призм ограничиваются только одной, вращение которой осуществляется через дифференциал от обеих визирных призм; причем скорости, передаваемые на призму, должны быть равны половинным скоростям вращения обеих визирных призм, а вращение компенсирующей призмы должно происходить в том направлении, что и вращение визирных

призм, наблюдаемое перед компенсирующей призмой. Такой двойной панорамический шарнир обладает полной свободой визирования во всем пространстве.

Нетрудно видеть, что сдвоенный панорамический шарнир имеет возможность работать и в сходящихся пучках, если компенсирующая призма разворачивается в перпендикулярную к оси плоско-параллельную пластинку (рис. 143).

В качестве пространственного шарнира можно использовать также системы, дающие полное оборачивание изображений, т. е. принадлежащие либо к III, либо к VI группам оборачивания, придавая им качение в двух направлениях. Например, подобный пространственный шарнир как система из двух призм с тремя отражениями представлен на рис. 144. Работа такого шарнира осуществляется вращением одной из этих призм в кардане с осями, расположенными перпендикулярно направлению визирования; изменение направления визирования можно осуществить в обеих плоскостях

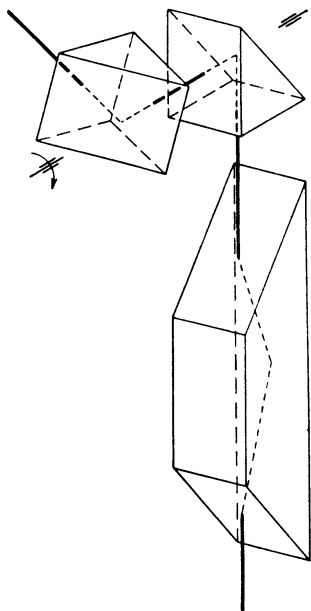


Рис. 143

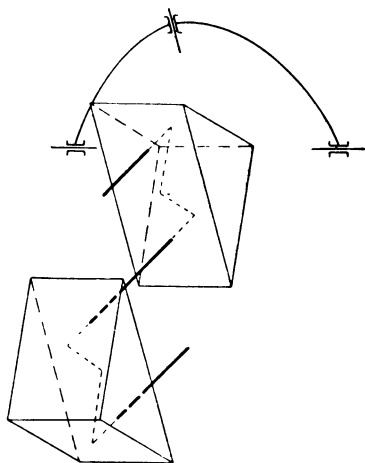


Рис. 144

Одной из призм может быть придано также вращение вокруг вертикальной оси, другой — вокруг горизонтальной.

Диапазон работы такой системы будет ограничен, так как при качении призм возникает наклонность развертки к оси системы.

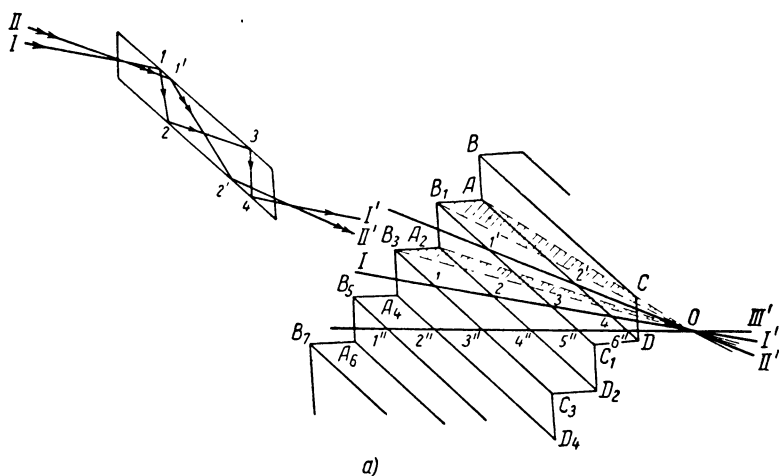
## РАЗЛИЧНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ПРИЗМ

### § 53. Призмы многократного отражения

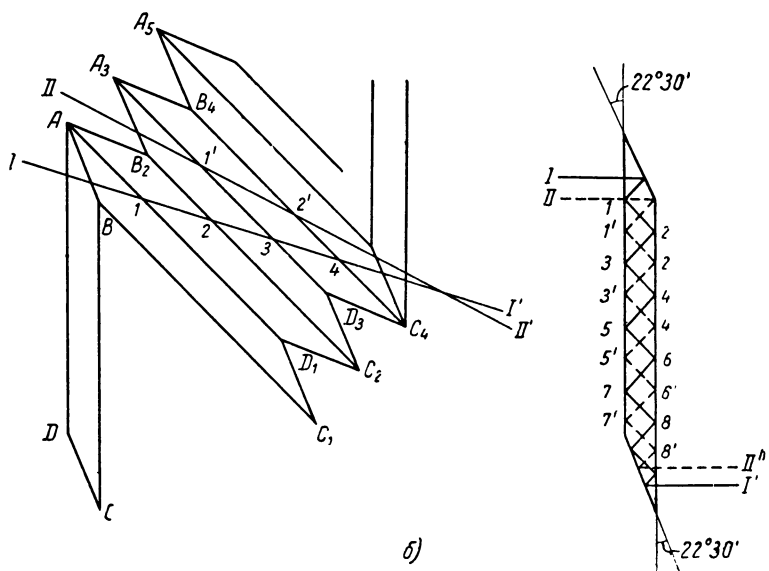
Основная особенность призм многократного отражения заключается в том, что при ходе луча через такие призмы разные лучи могут претерпевать разное число отражений, тогда как во всех ранее рассмотренных конструкциях призм всегда наблюдалось одно и то же число отражений для всех лучей, проходящих через призму и образующих основное изображение. Исходя из этого определения многократной призмы, можно сделать следующий вывод: чтобы для всех лучей, проходящих через призму многократного отражения при различном числе отражений, существовало одно и то же изображение, количество отражений для разных лучей всегда должно отличаться на четное число, так как в противном случае отдельные участки изображения получатся зеркальными. Основным элементом, при помощи которого может быть осуществлено создание призмы многократного отражения, является пара параллельных зеркал или плоско-параллельная пластинка, от граней которой отражаются идущие внутри пластинки лучи. Призмы многократного отражения впервые были предложены Н. Сенновым в 1934 г.; им, в частности, была предложена призма многократного отражения с входными гранями, срезанными под углом  $45^\circ$  (рис. 145, *а*). Особенность развертки призмы Сеннова в том, что ее можно пропустить в обе стороны безгранично; наблюдатель, смотрящий через такую призму, смотрит как бы через ступенчатую плоско-параллельную пластинку. Рассматривая развертку призмы Сеннова, следует обратить внимание на следующее обстоятельство: на развертках, идущих вверх, начинают появляться мертвые зоны (например,  $B_3A_2O_1$ ,  $B_1AO$ ), постепенно увеличивающиеся с ростом угла поля зрения вверх. Кроме призмы Сеннова, существуют и другие конструкции призм многократного отражения; одна из них представлена на рис. 145, *б* и отличается от призмы Сеннова тем, что все лучи, входящие в призму, перед многократными отражениями на плоско-параллельных гранях испытывают добавочное отражение на грани  $AB$  и в равной степени после многократных отражений на параллельных гранях претерпевают еще одно добавочное отражение на грани  $CD$ .

Углы между этими гранями  $AB$ ,  $CD$  и боковыми гранями  $AD$  и  $BC$  составляют  $22^\circ 30'$ ; благодаря наличию этих добавочных отражательных граней рассматриваемая призма занимает вертикальное положение.

Так как призмы многократного отражения развертываются в ступенчатую плоско-параллельную пластинку, то они, естественно, могут применяться только лишь в параллельном ходе лучей.



a)



б)

Рис. 145

## § 54. Устройства для совмещения изображений

В ряде случаев для производства различного рода измерений встречается необходимость совмещения по одной границе двух различных полей зрения; при этом сама граница, по которой совмещаются поля, должна быть либо вообще невидимой, либо настолько тонкой, чтобы она никак не могла влиять на точность производимых измерений. В качестве линии раздела двух совмещаемых полей можно применять либо ребро между двумя поли-

рованными гранями, составляющими между собой угол  $90^\circ$  или более (угол стыка между гранями, меньший  $90^\circ$ , не обеспечивает технологически отсутствия выколок на ребре между гранями), либо на границе серебрения, где также может быть получена хорошо очерченная, тонкая линия раздела. Простейшим из устройств, применяемых для совмещения двух полей зрения, можно считать призму, применяемую в колориметрах для совмещения двух полей зрения, в которых производится сравнение цветности обоих полей; причем в обоих полях зрения отсутствуют какие-либо отдельные детали. В этом случае не предъявляем

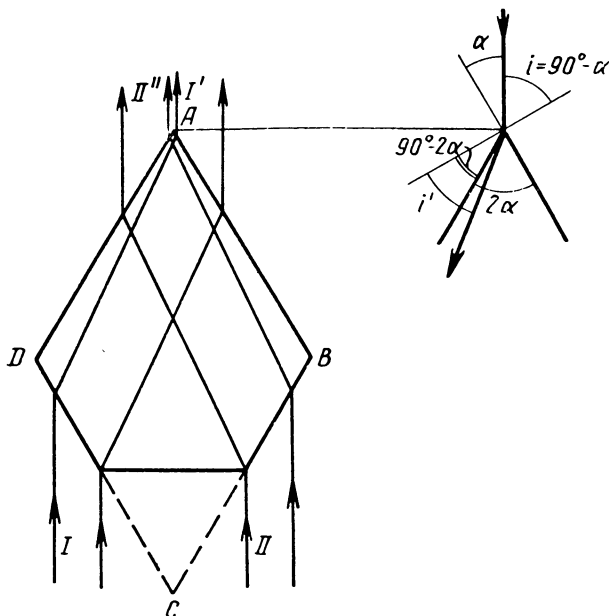


Рис. 146

никаких требований к исправлению аберраций. Это обстоятельство позволяет нам осуществить совмещение полей на стыке двух плоско-параллельных пластинок, что приводит нас к конструкции совмещающей призмы в виде ромба (рис. 146). Определим величину угла ромба в точке А. Для обеспечения тонкого стыка двух полей необходимо, чтобы луч, идущий вертикально, при его обратном ходе после преломления не смог отразиться от другой грани. Из рис. 146 нетрудно установить условие, обеспечивающее это требование. Имеем:

$$i = 90^\circ - \alpha; \quad i' \geq 90^\circ - 2\alpha. \quad (727)$$

На основании закона преломления можно написать

$$\sin i = n \sin i', \quad (728)$$

откуда

$$\sin(90^\circ - \alpha) \geq n \sin(90^\circ - 2\alpha) \quad (729)$$

или

$$\cos \alpha \geq n \cos 2\alpha. \quad (730)$$

В граничном случае (730) переходит в квадратное уравнение

$$2n \cos^2 \alpha - \cos \alpha - n = 0, \quad (731)$$

откуда

$$\cos \alpha = \frac{1}{4n} (1 \pm \sqrt{1 + 8n^2}). \quad (732)$$

Численно, при  $n = 1,5163$  (стекло К-8), получаем граничное значение угла  $\alpha = 27^\circ$ .

Пентапризма со смещенной частью. Эта конструкция применяется в тех случаях, когда необходимо сблизить до соприкосновения два рядом расположенных поля зрения (рис. 147). Совмещение двух изображений, ранее отстоявших одно от другого на расстоянии  $\Delta$ , происходит на линии (ребро сдвинутой части призмы), определяемой на чертеже точкой  $L$ .

Для обеспечения совмещения изображений необходимо соблюсти равенство ходов в сдвинутой и не сдвинутой частях призмы, т. е.

$$MK + KL = NP + PQ + QL. \quad (733)$$

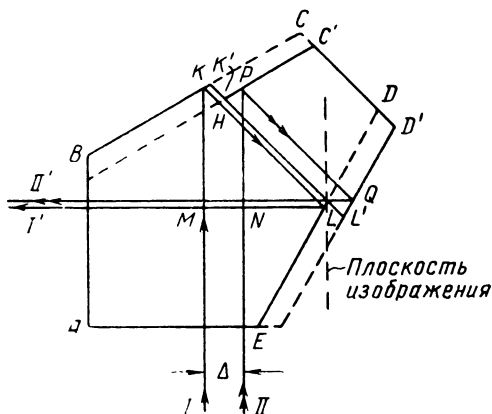


Рис. 147

Определим длину отрезка  $NP$ . Из рис. 147 следует

$$NP = NH + HP = MK - \Delta + HP. \quad (734)$$

Формулу (733) можно переписать в виде

$$MK(1 + \sqrt{2}) = NP(1 + \sqrt{2}) + QL \quad (735)$$

или, на основании (734)

$$MK(1 + \sqrt{2}) = MK(1 + \sqrt{2}) - \Delta(1 + \sqrt{2}) + HP'(1 + \sqrt{2}) + QL, \quad (736)$$

откуда

$$\Delta = HP' + QL(\sqrt{2} - 1). \quad (737)$$

Но из чертежа

$$HP' = QL, \quad (738)$$

поэтому

$$HP' = \Delta \frac{1 + \sqrt{2}}{2}. \quad (739)$$

Вычислим смещение

$$KK' = KH - HK' = \Delta \sqrt{2} - \Delta \frac{1 + \sqrt{2}}{2} = \Delta \frac{1 + \sqrt{2}}{2}. \quad (740)$$

Дальномерные мостики. Основной особенностью условий работы мостиков, применяемых в дальномерах на совмещение,

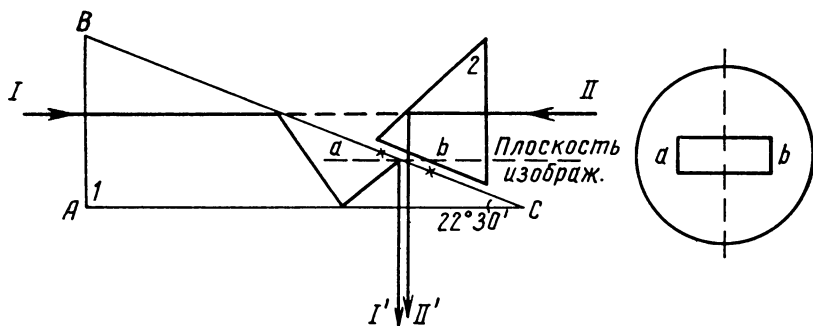


Рис. 148

является необходимость совмещения двух изображений, подводимых к мостику с противоположных направлений. Поэтому каждую ветвь дальномерного мостика можно строить независимо; так, например, в мостике, показанном на рис. 148, в левой ветви мостика применена призма с тремя отражениями, в то время как в правой ветви применена призма с одним отражением. Необходимо отметить, что и в правой и в левой ветвях должно быть либо нечетное, либо четное число отражений; в дальномерах типа инверт, где изображение в одном из совмещаемых полей должно



быть перевернуто в одном (вертикальном) направлении по отношению к изображению в другом поле, вводят добавочное обрачивание в одной из ветвей в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, обычно посредством нанесения крыши (например, на призме II). Совмещение двух полей в подобном мостике будет происходить на границе окошечка  $ab$ , прорезанного на посеребренном слое гипотенузной грани  $BC$  призмы I.

Обратим внимание, что эта граница не лежит в плоскости, перпендикулярной оси, в силу чего плоскость изображения нельзя

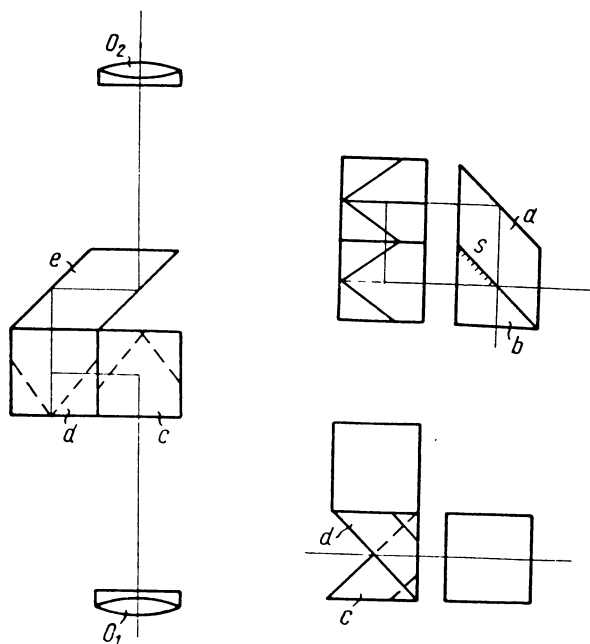


Рис. 149

точно совместить с границей окошечка, на которой происходит совмещение полей.

Другая конструкция дальномерного мостика, работающего на совмещение двух равных половин поля зрения, представлена на рис. 149. Необходимо отметить, что в устройствах, применяемых для совмещения полей в дальномерах, происходит замена поля зрения одной ветви дальномера соответствующей частью поля другой ветви; при этом каких-либо изменений в зрачках системы не происходит.

Устройство разделения полей при разделении зрачков в зрительных трубах. Устройство для разделения полей при разделении зрачков делит оптическую систему на два самостоятельных канала, но выходные зрачки обоих

каналов остаются совмещенными, что необходимо для одновременного визуального наблюдения обоих изображений. Вместе с тем входными зрачками обоих каналов будут верхняя и нижняя половины зрачка системы, которая будет разделяться на эти два канала; отсюда можно сделать вывод, что первоначально зрачки входа обоих каналов будут только соприкасаться друг с другом,

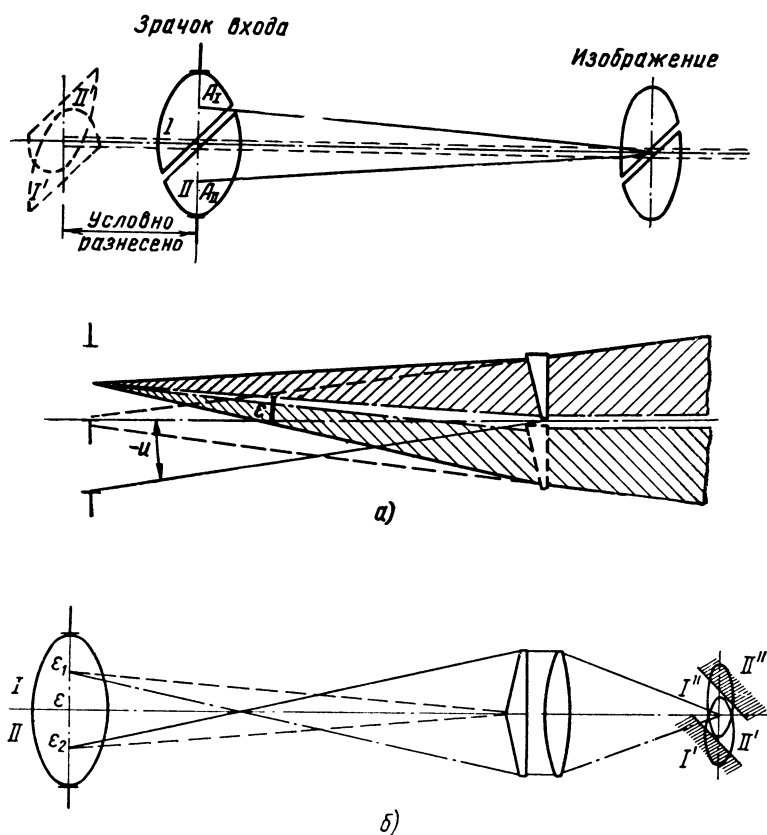


Рис. 150

но не будут перекрываться. Исходя из этих соображений, нетрудно сформулировать задачу, решаемую устройством, разделяющим систему на два самостоятельных канала: это устройство должно обеспечить совмещение зрачков выхода обоих каналов, сохраняя положение изображений в обоих каналах неизменным.

Решение этой задачи легко можно выполнить посредством установки клина в плоскости изображения; обращаясь к рис. 150, а, установим ориентировку клина и величину даваемого

им угла отклонения  $\epsilon$ . Угол  $\epsilon$  равен половине апертурного угла и пучка, образующего изображение, т. е.

$$\epsilon = \frac{u}{2} . \quad (741)$$

Заметим, что ориентировка клина для пучка, проходящего через верхнюю часть зрачка, остается неизменной при пропускании канала как через верхнюю часть полуполя системы, так и через нижнюю.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Если образуем каждый из каналов таким образом, что они будут проходить соответственно через верхнюю половину зрачка и верхнюю часть поля или через нижнюю половину зрачка и нижнюю часть поля, то оба канала могут быть отделены один от другого перегородкой и каждый из каналов будет совершенно изолированным. При этом клинья в верхней и нижней половинах поля будут обращены остриями друг к другу; это требует применения двух клиньев, которые в значительной степени затруднят получение тонкой и хорошо очерченной границы разделения полей.

Поэтому очень часто прибегают к устройствам, когда канал, проходящий через верхнюю половину зрачка, будет затем поступать в нижнюю часть поля и наоборот, канал, проходящий через нижнюю половину зрачка, будет проходить через верхнюю часть поля; оба канала пересекаются в промежутке между зрачком и изображением.

Нетрудно видеть, что в этом случае клинья в плоскости изображения окажутся расположенными своими основаниями один к другому и легко изготавливаются в виде одного куска стекла — бипризмы.

Однако возникшее в этом случае перекрещивание обоих каналов приведет к тому, что лучи верхней половины зрачка попадут в нижнюю половину изображения, а нижней половины — в верхнюю. Эти неправильно идущие лучи образуют дополнительные изображения, которые наложатся на основные, и возникнут так называемые паразитные изображения.

Таким образом, паразитные изображения возникают вследствие того, что каждый из клиньев, расположенных в плоскости изображения, будет смещать изображение не только той половины зрачка, через которую проходят пучки, соответствующие данной части изображения, но и пучки, проходящие через вторую половину зрачка. Поэтому, чтобы избавиться от паразитных изображений, следует перекрыть лишние части изображения зрачка, смещаемого соответственным клином.

В том случае, когда зрачок входа расположен впереди изображения, то изображения этого зрачка, получающиеся после клиньев, будут размещаться в той же плоскости, т. е. будут мнимыми, и нельзя будет устранить их ненужные части.

Однако если после клиньев ( $a$  в равной степени и перед клиньями) будет находиться какая-либо система (например, коллектив), переносящая изображения зрачков в часть пространства, расположенную вправо от клиньев, то в этом случае получим действительное изображение зрачка входа. Помещая в его плоскости щель, ограничивающую полезные совмещенные друг с другом части зрачка и закрывающую паразитные изображения частей зрачка, устраним наличие паразитных изображений в поле зрения (рис. 150, б). На рис. 150, б показан ход лучей через верхнюю часть поля зрения и через обе части зрачка входа (сплошными линиями), а также размещение щели, отсекающей части зрачков  $I'$  и  $II'$ , создающих паразитные изображения в поле зрения.

## § 55. Устройства для изменения глазного базиса

При разработке бинокулярных оптических приборов необходимо учитывать одно очень важное обстоятельство, заключающееся в том, что расстояние между центрами зрачков глаз, или, как говорят, глазной базис, изменяется в пределах от 56 до 74 мм. Поэтому для пользования различными наблюдателями бинокулярных приборов в последних создают устройства, позволяющие изменять расстояние между выходными зрачками окуляров в

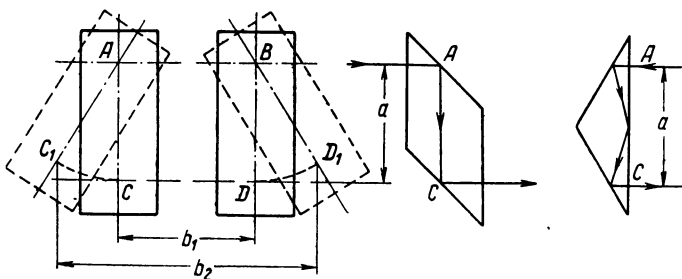


Рис. 151

соответствии с изменением расстояния между глазами наблюдателя. Самый простейший способ изменения расстояния между окулярами — способ изменения расстояния между обеими трубами бинокулярного прибора, осуществляемый обычно поворотом обеих труб относительно оси шарнира (которая должна быть параллельной осям окуляров). Способ этот широко применяется, например, в биноклях и стереотрубах. Однако этот способ не всегда применим; в ряде случаев (например, в дальномерах, стереофотограмметрических приборах) встречается необходимость изменить расстояние между выходными зрачками окуляров без нарушения расположения оптики в объективной части прибора. Изменение окулярного базиса может производиться либо путем

качания призм, дающих параллельное смещение оси при вращении вокруг начальной оси пучка при принадлежности этих призм, либо к V или III группам оборачивания, либо к IV и VI группам (во избежание возникновения вращения изображения в поле зрения при качании призмы). На рис. 151 показано изменение глазного базиса и конструкции двух призм, принадлежащих к I и IV группам по оборачиванию (ромбической призмы и призмы с тремя отражениями). Обе эти конструкции благодаря довольно большой длине хода обычно приходится размещать между объективом и плоскостью изображения (перед фокальной плоскостью окуляра), в силу чего при размещении в плоскости изображения каких-либо сеток, последние будут поворачиваться вместе с поворотом качающейся призмы.

При точных измерениях (как, например, в дальномерах) положение сеток должно оставаться неизменным; поэтому качающиеся призмы приходится размещать уже после изображения, даваемого объективом (перед или между линзами окуляра); естественно, что большая длина хода луча в призме приведет при этом к существенному ограничению величины окулярного поля зрения.

Вторым способом изменения окулярного базиса является поступательное перемещение прямоугольных призм с двумя отражениями (крыши) в направлении, перпендикулярном ребру, образованному отражательными гранями, и перпендикулярном осям. Изменение окулярного базиса в этом случае определится как удвоенное изменение расстояния между ребрами обеих призм (рис. 152)

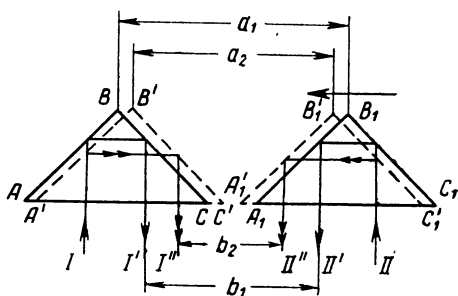


Рис. 152

$$b_1 - b_2 = 2(a_1 - a_2). \quad (742)$$

Заметим, что при достаточном увеличении диаметра зрачков в направлении базиса (до 8 мм) необходимость применения устройств для изменения окулярного базиса отпадает.

## § 56. Причины возникновения паразитных изображений

1. В различных приборах нередко вблизи основного зрачка выхода наблюдаются побочные зрачки, иногда довольно больших размеров. Если зрачок глаза наблюдателя по каким-либо причинам сможет охватить собой такой побочный зрачок, наблюдатель

увидит в поле зрения прибора добавочное, паразитное изображение, налагающееся на основное изображение (рис. 153).

Причиной возникновения паразитных зрачков является наличие вблизи хода лучей на развертке призм отражающих граней, параллельных или близких к параллельности и идущих через развертку пучков лучей.

Выполняя около таких граней дополнительную развертку призм и идя в обратном направлении (от изображения к зрачку входа), получим на этих дополнительных развертках положение побочных зрачков входа, изображение которых через всю последующую часть системы дает положение и величину побочных выходов зрачков.

В качестве примера построения таких дополнительных разверток приведем картину развертки системы призм обыкновенного бинокля (рис. 154). На рис. 154:  $A_1B_1$  — грань на первой призме и  $A_2B_2$  — на второй призме; обе грани располагаются на развертке параллельно оси системы. Если расстояние этих граней от оси

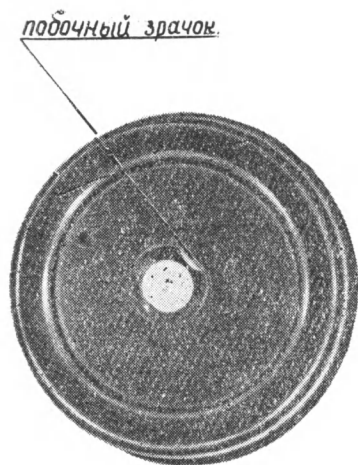


Рис. 153

системы на развертке соответственно равно отрезкам  $a_1$  и  $a_2$ , то расстояния  $b_1$  и  $b_2$  до осей зрачков входа на побочных развертках определятся как удвоенные отрезки  $a_1$  и  $a_2$ . Нетрудно видеть, что ход лучей на побочной развертке ограничивается отверстием зрачка входа, отверстием грани, дающей побочную развертку, и отверстием полевой диафрагмы.

Таким образом, ход побочных лучей может быть ограничен также и после диафрагмы поля зрения.

Пользуясь такой дополнительной разверткой, нетрудно установить положение и величину ширм или срезов на призмах, необходимых для устранения этих побочных зрачков.

Устранение побочных зрачков срезанием фасок на призме с тремя отражениями показано на рис. 155.

2. Вторым источником паразитных изображений являются отражения от преломляющих поверхностей призм или защитных стекол, обычно расположенных впереди системы. Эти изображения как частичные отражения значительно ниже по своей яркости, нежели основное изображение или изображения, возникающие в результате наличия паразитных зрачков; однако, так как паразитные изображения от преломляющих поверхностей заменяют своей яркостью часть яркости, потерянной основным изображением, оставаясь в габаритах световых пучков, образующих основ-

ное изображение, то эти паразитные изображения не могут быть устранены в последующей части системы (как, например, можно было бы устранить побочные зрачки, поставив на месте основного выходного зрачка материальную диафрагму). Отсюда следует,

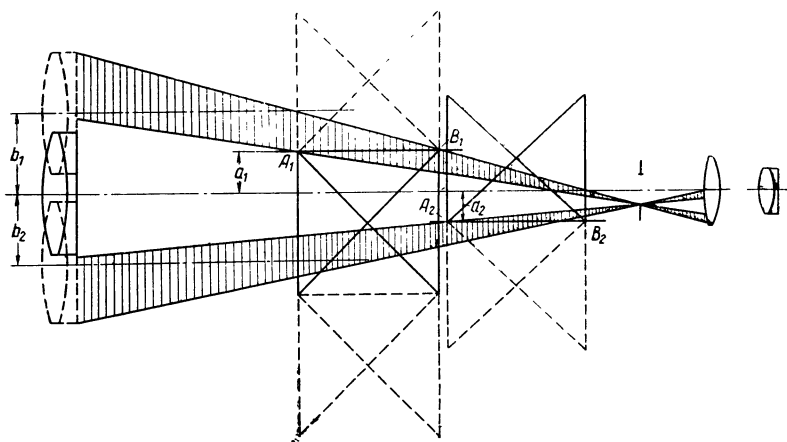


Рис. 154

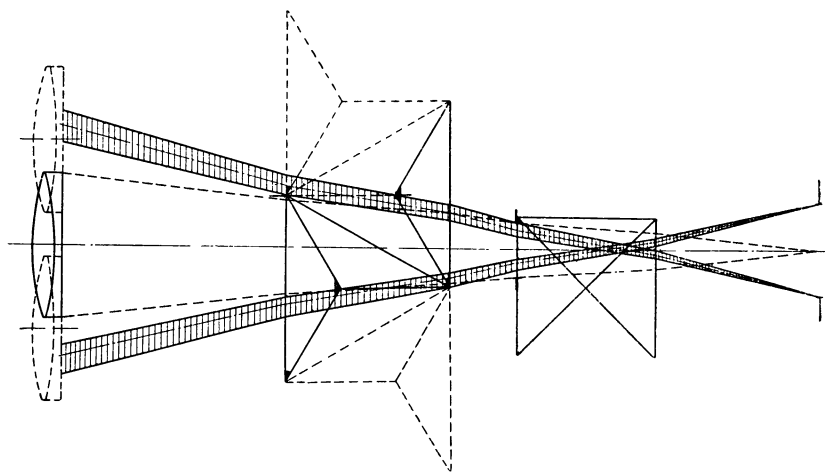


Рис. 155

что необходимо уничтожить возможность возникновения подобных частичных отражений, защищая различными способами некоторые оптические детали, находящиеся в головной части системы. Для проверки системы на отсутствие или наличие частичных отражений можно аналогично предыдущему прибегнуть к допол-

нительным разверткам вокруг исследуемых преломляющих гра-ней при обратном ходе лучей.

Расчет паразитной засветки от стенок трубы. Рассматривая пространство в окрестности выходного зрачка ви-зуальной оптической системы, можно представить себе, что в этом пространстве будет наблюдаться свет, отраженный от стенок при-бора.

Если при этом зрачок глаза будет по своему диаметру больше, нежели выходной зрачок прибора, то такой паразитный свет мо-

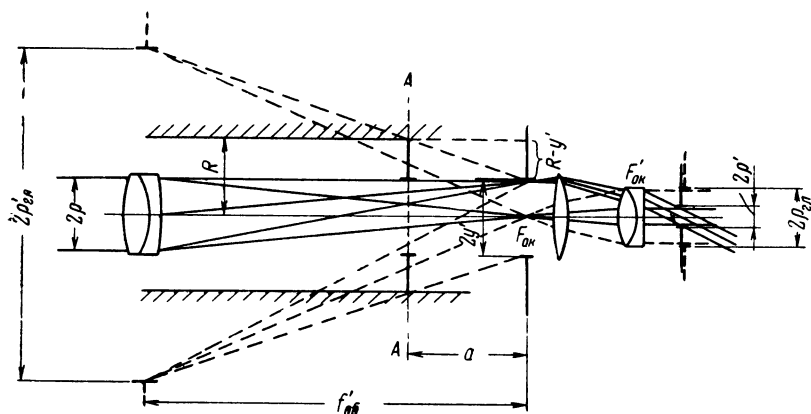


Рис. 156

жет войти в глаз и наложиться на изображение предмета, распо-ложенное на сетчатке; в результате этого будет наблюдаться по-нижение контрастности изображения.

Вместе с тем при построении изображения зрачка глаза в об-ратном ходе лучей нетрудно установить, в какой части стенок трубы будет возникать паразитная засветка. В качестве примера рассмотрим возникновение паразитных засветок от стенок в обыкновенной зрительной трубе (рис. 156), состоящей из объек-тива и окуляра.

На рис. 156 сплошными линиями показан ход лучей, создаю-щих изображение предмета, пунктиром — ход лучей, проходящих через входной зрачок глаза и создающих паразитную засветку.

Нетрудно себе представить, что изображение входного зрачка глаза в обратном ходе лучей будет совпадать по положению с входным зрачком трубы (например, с объективом), так как сам входной зрачок глаза должен быть совмещен с выходным зрач-ком прибора.

Величины фокусных расстояний и радиусы зрачков обозначены на рисунке, как обычно, через  $f'_{об}$ ,  $f'_{ок}$ ,  $f$ ,  $\rho$ ,  $\rho'$ ,  $\rho_{гл}$  и  $\rho'_{гл}$ ; величина



изображения в фокальной плоскости объектива обозначена через  $y'$ ; кроме того, введен радиус  $R$  отверстия трубы и расстояние  $a$ , на котором габаритный луч от края зрачка изображения глаза в обратном ходе встречает стенку прибора.

Из рис. 156 следует:

$$\frac{R - y'}{a} = \frac{\rho_{\text{гл}}'}{f_{\text{об}}'} = \frac{\rho_{\text{гл}} \Gamma}{f_{\text{об}}'} = \frac{\rho_{\text{гл}}}{f_{\text{ок}}}, \quad (743)$$

откуда

$$a = \frac{f_{\text{ок}}'}{\rho_{\text{гл}}} (R - y'). \quad (744)$$

На расстоянии  $a$  целесообразно поставить последнюю диафрагму, устраняющую главную часть засветки от стенок трубы.

Зная коэффициент отражения  $\tau$  от стенок трубы, нетрудно определить коэффициент паразитной засветки  $\eta$ , принимая его равным отношению паразитной освещенности к освещенности основного изображения.

Величина коэффициента паразитной засветки определится как произведение коэффициента отражения от стенок прибора на отношение площади зрачка глаза к площади зрачка выхода прибора.

Таким образом, можно написать

$$\eta = \frac{E}{E_0} = \tau \frac{\rho_{\text{гл}}^2}{\rho'^2}. \quad (745)$$

Численно, если диаметр выходного зрачка прибора будет равен 1 мм, а диаметр зрачка глаза будет равен, например, 5 мм, то при коэффициенте отражения  $\tau$ , равном 1%, (нередко, когда  $\tau > 1\%$ ), получаем следующую величину коэффициента засветки

$$\eta = 0,01 \frac{25}{1} = 0,25 = 25 \%.$$

В качестве еще одного примера рассмотрим возникновение паразитных изображений в визирной головке с куб-призмой, герметизированной плоскими защитными стеклами.

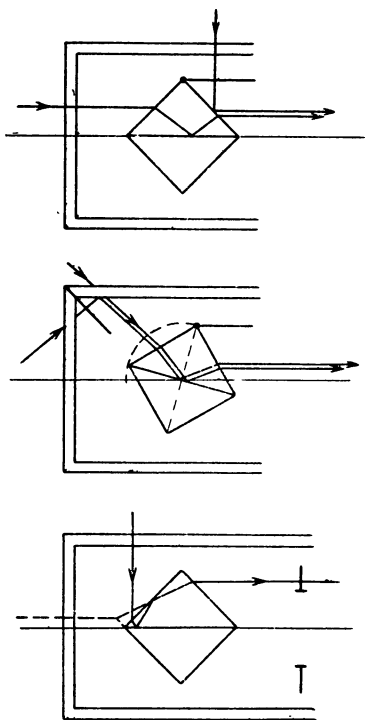


Рис. 157

На рис. 157, а, б, в показаны три вида возможных паразитных изображений.

Одно из паразитных изображений возникает при отражении света от задней стороны визирной призмы, когда визирование направлено вдоль оси прибора (рис. 157, а).

Паразитное изображение такого рода незеркально (для всей системы) и движется вместе с основным изображением.

Его можно устранить, вводя шторку, закрепленную шарнирно на ребре визирной призмы.

Второй вид паразитного изображения возникает при отражении света от плоского защитного стекла; при этом паразитное изображение зеркально движется в противоположную сторону по отношению к основному изображению; оно может быть устранено введением экранчика, установленного в стыке защитных стекол (рис. 157, б).

Третий вид паразитного изображения возникает в самой куб-призме при недостаточных ее габаритах; это изображение зеркально и неподвижно; его можно устранить, увеличивая соответственно размеры куб-призмы или уменьшая размеры входного зрачка.

Эта картина представлена на рис. 157, в.

---

## Глава XVI

### О ДОПУСКАХ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И МЕТОД «ДЕФОРМИРУЮЩИХ» ЭЛЕМЕНТОВ

#### § 57. Общие приемы расчета допусков

При создании той или иной оптической системы сами оптические детали и их взаимное расположение в системе будут в какой то степени отличаться от заданных по расчету величин; существенно, чтобы совокупное воздействие этих отступлений не вызвало бы серьезного изменения свойств создаваемой системы.

Иными словами, необходимо установить допустимость тех или иных отступлений от номинальных величин, при которых происходит допустимое изменение свойств оптической системы.

Эти изменения свойств системы могут быть разделены на изменения габаритных характеристик — изменение расположения и величины изображений и зрачков системы и изменения качественных характеристик — фокусировки и различных аберраций системы\*.

---

\* Здесь рассматриваются допуски на качество изображения для всей системы в целом.

Изложение вопроса о допустимости тех или иных отступлений в оптической системе — об установлении допусков на изготовление и взаимное расположение деталей оптической системы — можно построить на примере введения в то или иное место системы некоторого «деформирующего» элемента; при этом для удобства анализа выгодно прибегнуть к замене элементов, расположенных в различных местах системы, эквивалентными им по своему действию элементами, но расположенными либо в пространстве предметов, либо в пространстве изображений.

Условимся различать деформирующие элементы трех родов:

1. Элементы, создающие отклонение оси системы.
2. Элементы, создающие поступательные смещения.

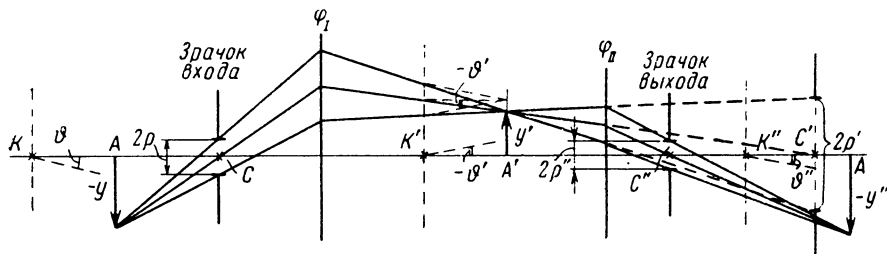


Рис. 158

3. Элементы, вводящие в систему дополнительную оптическую силу.

Представим себе, что имеем дело с какой-либо оптической системой (рис. 158), которая может быть разделена на две составляющие системы I и II.

На рис. 158 в точке  $A$  расположен предмет  $y$ ; в точке  $C$  — зрачок входа радиуса  $\rho$ ; в пространстве между системами расположены соответственно промежуточное изображение  $y'$  в точке  $A'$  и промежуточный зрачок радиуса  $\rho'$  с центром в точке  $C'$ ; изображение  $y''$  после всей системы размещается в точке  $A''$  и выходной зрачок радиуса  $\rho''$  — в точке  $C''$ .

Примем, что деформирующий элемент расположен между I и II системами в некоторой точке  $K'$ , которая в пространстве предмета будет изображена I системой в точке  $K'$  и в пространстве изображений — II системой в точке  $K''$ .

Предположим теперь, что деформирующий элемент вызывает отклонение хода всех лучей на некоторый угол  $\vartheta'$ .

Углы  $\vartheta'$  можно рассматривать как апертурные углы при сопряженных точках  $K'$ ,  $K$  и  $K''$ ; поэтому, пользуясь угловыми увеличениями  $W_I$  и  $W_{II}$  для I и II из составляющих систем, можно найти соответственные углы  $\vartheta$  и  $\vartheta''$  для пространства до и после всей системы. Таким образом, можно написать

$$\vartheta = \frac{\vartheta'}{W_I}; \quad \vartheta'' = W_{II} \vartheta'. \quad (746)$$

Формула (746) показывает, что деформирующий элемент, расположенный в точке  $K'$  с угловым отклонением  $\vartheta'$ , можно заменить эквивалентными ему элементами, расположенными либо в пространстве предметов в точке  $K$  с углом отклонения  $\vartheta$ , либо в пространстве изображений в точке  $K''$  с углом отклонения, равным  $\vartheta''$ .

Случай работы деформирующего элемента, дающего поперечное параллельное смещение всех лучей на некоторую величину  $a$  (рис. 159), можно рассматривать как случай переноса точки, в которой располагается угловой деформирующий элемент, в бесконечность.

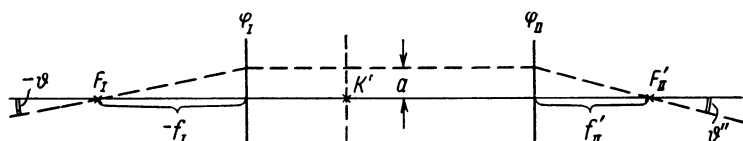


Рис. 159

В этом случае изображение деформирующего элемента в пространстве предметов разместится в переднем фокусе I системы, а изображение элемента после II системы будет расположено в заднем фокусе II системы.

Из рис. 159 следует, что величины углов отклонения соответственно равны

$$\vartheta = \frac{a}{f_I} \quad \text{и} \quad \vartheta'' = \frac{a}{f'_{II}}. \quad (747)$$

Совершенно очевидно, что если угловой деформирующий элемент расположится в каком-либо из фокусов составляющих систем, то эквивалентом такому элементу будет поперечное параллельное смещение лучей в соответственном пространстве.

В результате продольного сближения или удаления обеих составляющих систем друг относительно друга нельзя установить определенное положение такого деформирующего элемента; поэтому и расположение эквивалентных элементов также будет неопределенным.

Следовательно, в частном случае можно ограничиться определением изменения величины и положения изображения и выходного зрачка, используя формулы для продольного и линейного увеличений.

Измененное линейное увеличение

$$V' = V_I V_{II}' = -V_I \frac{f_{II}}{x_{II} + \Delta x_{II}} = \frac{V_I V_{II}}{1 + \frac{\Delta x_{II}}{x_{II}}} = \frac{V}{1 + \frac{\Delta x_{II}}{x_{II}}}, \quad (748)$$

где  $V_I$  — линейное увеличение первой составляющей;  $V_{II}$  — величина измененного увеличения второй составляющей;  $x_{II}$  — расстояние от промежуточного изображения или промежуточного зрачка до переднего фокуса второй составляющей, а  $\Delta x_{II}$  — величина изменения расстояния между составляющими системами.

Выражая в формуле (748) величину  $x_{II}$  через увеличение и фокусное расстояние II системы  $f_{II}$ , получим

$$V' = \frac{V}{1 - V_{II} \frac{\Delta x_{II}}{f_{II}}} \quad (749)$$

и в случае, если II система находится в воздухе,

$$V' = \frac{V}{1 + V_{II} \varphi_{II} \Delta x}. \quad (750)$$

Вычислив по этой формуле измененные линейные увеличения  $V_a'$  и  $V_c'$  для предмета и изображения, легко определить и взаимное расположение изображения и выходного зрачка после всей системы, пользуясь формулой для продольного увеличения (21)

$$\begin{aligned} \xi_1' &= Q' \xi = -\frac{f'}{f} V_a' V_c' \xi = -\frac{f'}{f} \frac{V_a V_c \xi}{(1 + V_{IIa} \varphi_{II} \Delta x)(1 + V_{IIc} \varphi_{II} \Delta x)} = \\ &= \frac{Q \xi}{(1 + V_{IIa} \varphi_{II} \Delta x)(1 + V_{IIc} \varphi_{II} \Delta x)} = \frac{\xi'}{(1 + V_{IIa} \varphi_{II} \Delta x)(1 + V_{IIc} \varphi_{II} \Delta x)} \end{aligned}$$

и, пренебрегая членами, содержащими  $\Delta x$  в степени, выше первой,

$$\xi_1' \approx [1 - (V_{IIa} + V_{IIc}) \varphi_{II} \Delta x] \xi'. \quad (751)$$

Перейдем к рассмотрению случая силового деформирующего элемента (рис. 160).

На рис. 160 представлена сложная система, составленная из двух систем  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , расположенных на расстоянии  $d$  одна от другой.

В точке  $A$  расположен предмет  $y$ ; в точке  $A'$  после I системы образуется промежуточное изображение  $y'$ , а после II системы в точке  $A''$  — изображение  $y''$ . Расстояние между I системой и

предметом обозначим через  $s_1$ ; расстояние от I системы до промежуточного изображения — через  $s_1'$ ; для II системы соответственные расстояния обозначим аналогично через  $s_2$  и  $s_2'$ .

Поместим в пространстве между составляющими системами в некоторую точку  $K$  деформирующий элемент, обладающий оптической силой, равной  $\varphi$ .

Расстояние между этим элементом и II системой обозначим через  $d_k$ ; деформирующий элемент создает после себя новое промежуточное изображение  $\bar{y}'$ , расположенное в некоторой точке  $\bar{A}'$ . Расстояния от деформирующего элемента до точек  $A'$  и  $\bar{A}'$  обозначим через  $s_k$  и  $s_k'$ .

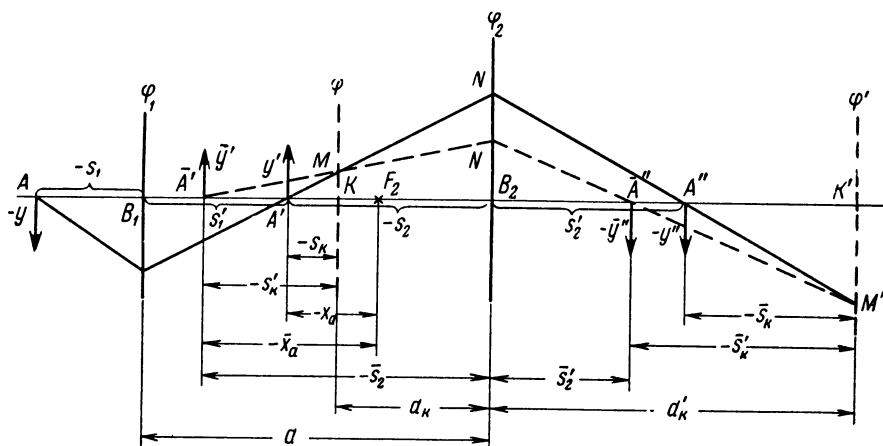


Рис. 160

II система перенесет изображение точки  $\bar{A}'$  в некоторую точку  $\bar{A}''$ , расположенную после всей системы на расстоянии  $\bar{s}_2'$ ; одновременно II система создает и изображение деформирующего элемента в некоторой точке  $K'$  на расстоянии  $a_k'$  от второго элемента.

Покажем, что, поместив в точке  $K'$  другой деформирующий элемент с некоторой определенной оптической силой  $\varphi'$ , можно действием этого нового элемента заменить действие элемента, ранее расположенного в точке  $K$ . Для этого необходимо, чтобы элемент  $\varphi'$  мог бы перенести изображение точки  $A''$  в ту же точку  $\bar{A}''$ , в которую переносит изображение точки  $A$  элемент  $\varphi$ .

Таким образом, для элемента  $\varphi'$  отрезки до точек  $A''$  и  $\bar{A}''$  должны играть роль сопряженных отрезков  $\bar{s}_k$  и  $\bar{s}_k'$ .

Кроме того, так как по условию элемент  $\varphi'$  размещали в месте расположения изображения элемента  $\varphi$  с помощью II системы, то-

точки  $\bar{N}$ ,  $\bar{A}'$ ,  $M$  должны оказаться расположенными на одной прямой, так как точка  $M'$  должна находиться на пересечении двух любых лучей, исходящих из одной и той же точки  $M$  элемента  $\varphi$ , как до, так и после его установки в системе.

Перейдем теперь непосредственно к выводам.

Полагая для простоты, что обе системы и оба элемента расположены в воздухе, можно написать:

$$\varphi = \frac{1}{s_k'} - \frac{1}{s_k}; \quad \varphi' = \frac{1}{s_k'} - \frac{1}{s_k}. \quad (752)$$

Кроме того, отрезки  $\bar{s}_k$  и  $s_k$ , а также  $s_k$  и  $s'$ , как отрезки между парами сопряженных точек, можно связать через формулу продольного увеличения (21)

$$\bar{s}_k = Q_{ak} s_k = V_a V_k s_k; \quad \bar{s}_k' = \bar{Q}_{ak} s' = \bar{V}_a V_k s_k'. \quad (753)$$

Пользуясь формулами (753), преобразуем вторую из формул (752)

$$\varphi' = \frac{1}{V_k} \left[ \frac{1}{\bar{V}_a s_k'} - \frac{1}{V_a s_k} \right]. \quad (754)$$

Обратимся к чертежу. Обозначая отрезки от переднего фокуса II системы до точек  $K$ ,  $A'$  и  $\bar{A}'$  через  $x_k$ ,  $x_a$  и  $\bar{x}_a$ , можем написать

$$x_k = x_a - s_k = \bar{x}_a - s_k'. \quad (755)$$

Разделив формулу (755) на величину  $f_2$  переднего фокусного расстояния II системы, получим

$$-\frac{1}{V_k} = -\frac{1}{V_a} - \frac{s_k}{f_2} = -\frac{1}{\bar{V}_a} - \frac{s_k'}{f_2} \quad (756)$$

или

$$\frac{1}{V_k} = s_k \left( \frac{1}{V_a s_k} + \frac{1}{f_2} \right) = s_k' \left( \frac{1}{\bar{V}_a s_k'} + \frac{1}{f_2} \right), \quad (757)$$

откуда

$$\frac{1}{V_k s_k} = \frac{1}{V_a s_k} + \frac{1}{f_2}; \quad \frac{1}{V_k s_k'} = \frac{1}{\bar{V}_a s_k'} + \frac{1}{f_2}. \quad (758)$$

Составим разность между обеими формулами (758)

$$\frac{1}{\bar{V}_a s_k'} - \frac{1}{V_a s_k} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{1}{s_k'} - \frac{1}{s_k} \right) = \frac{\varphi}{V_k} \quad (759)$$

и на основании (754) окончательно найдем

$$\varphi' = \frac{\varphi}{V_k^2} . \quad (760)$$

Формула (760) не содержит величин  $s_k$  и  $s'_k$ ,  $V_a$  и  $\bar{V}_a$ , которые определяют положение промежуточного изображения относительно деформирующего элемента; это дает нам основание утверждать, что действие линзы с силой, равной  $\varphi'$ , и установленной в точке  $K'$ , равнозначно действию линзы с силой  $\varphi$ , установленной в точке  $K$  для любых положений промежуточного изображения.

### § 58. Деформирующие элементы, дающие поперечное параллельное смещение

К такого рода деформирующим элементам в первую очередь можно отнести поступательное смещение отражательных призм и зеркал; поэтому и рассмотрение этих элементов уместно начать с рассмотрения простейших прямоугольных призм с одним отражением.

Рассмотрим два случая смещения прямоугольной призмы, представленные на рис. 161, *a* и *б* — смещение вдоль оси предшествующей системы и вдоль оси последующей системы.

На обоих рисунках:  $A$  — некоторая точка на оси предшествующей системы, расположенная на расстоянии  $s$  от первой поверхности призмы;  $B$ ,  $C$ ,  $E$  — исходные положения отражательной призмы;  $S$  — вершина первой поверхности последующей системы;  $D$  — точка пересечения оси последующей системы с выходной гранью призмы;  $d$  — расстояние от призмы до последующей системы;  $B'$ ,  $C'$ ,  $E'$  и т. д. — соответственные точки после развертки отражения;  $B$ ,  $C$ ,  $B'$ ,  $C'$  и т. д. — положения соответственных точек после смещения призмы.

Величинами  $\Delta x$  и  $\Delta y$  обозначены смещения деформирующего элемента и последующей части системы вдоль соответственных координатных осей.

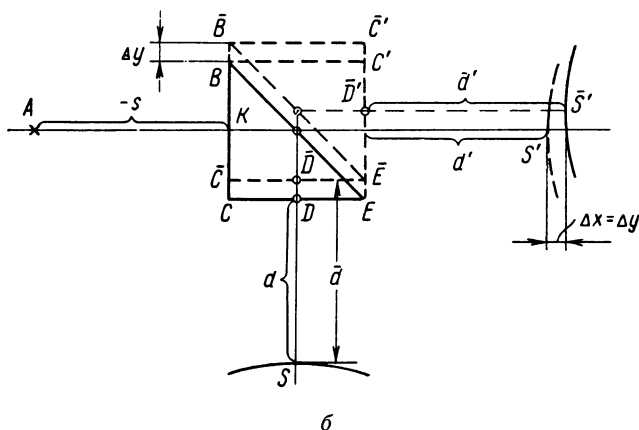
Пользуясь рисунками, легко установить, что в первом случае смещения призмы вдоль оси  $x$ , во-первых, изменится отрезок  $s$  на величину  $\Delta x$ , т. е.

$$\bar{s} = s + \Delta x;$$

во-вторых, сохранится равенство расстояний

$$d = \bar{d} \quad \text{и} \quad \bar{d}' = d' = d,$$



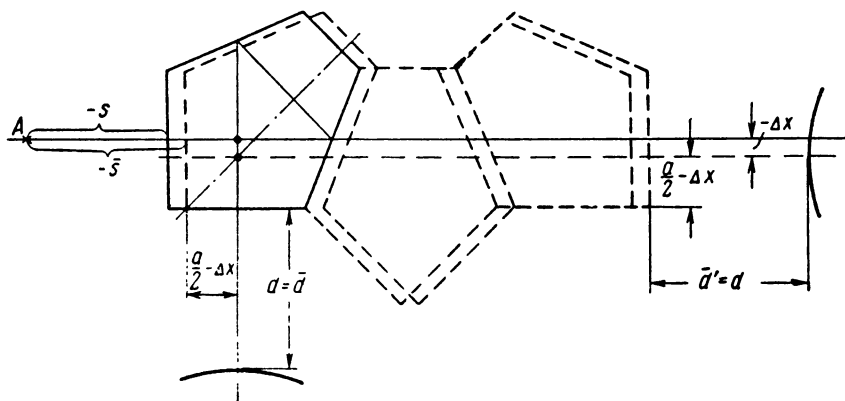
[illegible]

Во втором случае, когда произойдет смещение призмы вдоль оси последующей системы перпендикулярно оси  $x$ , расстояние  $s$  сохранится неизменным, изменится расстояние  $d$  от призмы до последующей части системы, т. е.

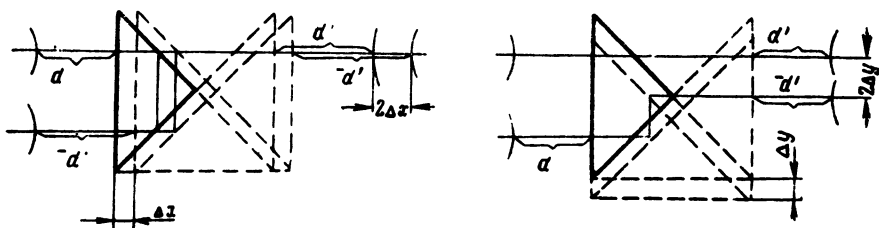
и изменятся расстояния  $СК$  и  $\overline{СК}$  на величину  $\Delta u$ .

В результате этих изменений на развертке произойдет поступательное смещение последующей части, тождественное таковому в только что рассмотренном случае.

Это совпадение легко объясняется тем, что в обоих случаях произошло перемещение отрагательной грани в направлении ее нормали при постоянной длине развертки призмы.



a



б

Рис. 162

На основании сделанного обобщения можно сказать, что отрагательные призмы следует рассматривать как совокупность двух элементов — системы зеркал и плоско-параллельной пластинки, толщина которой равна длине развертки призмы.

Справедливость такого допущения легко доказывается тем, что поступательное перемещение плоско-параллельной пластинки не изменяет свойств оптической системы.

Можно воспользоваться также очень простым графическим приемом — продолжить ось последующей части системы до пере-

сечения ее со смещенной отражающей гранью и от этой точки построить смещенную ось на развертке системы.

На рис. 162, *а* и *б* аналогичным образом рассмотрено поступательное смещение пентапризмы и прямоугольной призмы с двумя отражениями; нетрудно установить, что смещение пентапризмы напоминает смещение прямоугольной призмы с одним отражением, но отличается тем, что смещение оси на развертке имеет обратный знак; для прямоугольной же призмы с двумя отражениями поперечное смещение призмы создает удвоенное поперечное смещение оси на развертке; смещение же этой призмы вдоль оси создает удвоенное изменение между предыдущей и последующей системами.

### § 59. Деформирующие элементы, дающие изменение направления оси последующей системы

В качестве простейших элементов такого рода можно привести простой преломляющий клин или физический перекосящий осей последующей и предыдущей систем; однако действие таких элементов настолько просто, что едва ли нуждается в исследовании.

Более сложно правильно установить призму или зеркало в оптической системе; первоначально приступим к рассмотрению поворота простой прямоугольной призмы с одним отражением.

В соответствии с описанным в предыдущем параграфе приемом разделения отражательной призмы на систему зеркал и плоско-параллельную пластинку, рассмотрим работу зеркала, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной плоскости главного сечения призмы (плоскости чертежа).

На рис. 163 представлен поворот зеркала вокруг некоторой точки  $O$ , отстоящей на расстоянии  $b$  от оси предыдущей системы и на расстоянии  $c$  от плоскости зеркала.

В точке  $N$  ось предыдущей системы пересекает плоскость зеркала в его начальном положении  $I$  под углом  $i$  с нормалью к зеркалу; после поворота на угол  $\alpha$  плоскость зеркала займет положение  $II$ .

После развертки отражения в исходном положении вершина  $S$  первой поверхности последующей системы будет отображена в точке  $S'$  на оси предыдущей системы на расстоянии  $l_0$  от оси вращения.

После поворота зеркала на малый угол  $\alpha$  вершина  $S$  после развертки отражения будет отображена в точке  $\overline{S'}$ ; при этом отображенная ось составит с осью предыдущей системы угол  $2\alpha$ .

Расстояние между проекциями точек  $O$  и  $\overline{S'}$  обозначим через  $\overline{l}$ . Центр вращения  $O$  после развертки зеркала в начальном поло-

жении отобразится в точке  $O'$  на расстоянии  $c' = c$  от плоскости зеркала; после поворота зеркала на угол  $\alpha$  точка  $O'$  переходит в положение  $\bar{O}'$ , удаляясь от оси последующей системы на расстояние  $b'$ .

Величина дуги  $O'\bar{O}'$  будет равна  $2c\alpha$ , так как эта дуга составляет угол  $i$  с перпендикуляром, опущенным на ось последующей

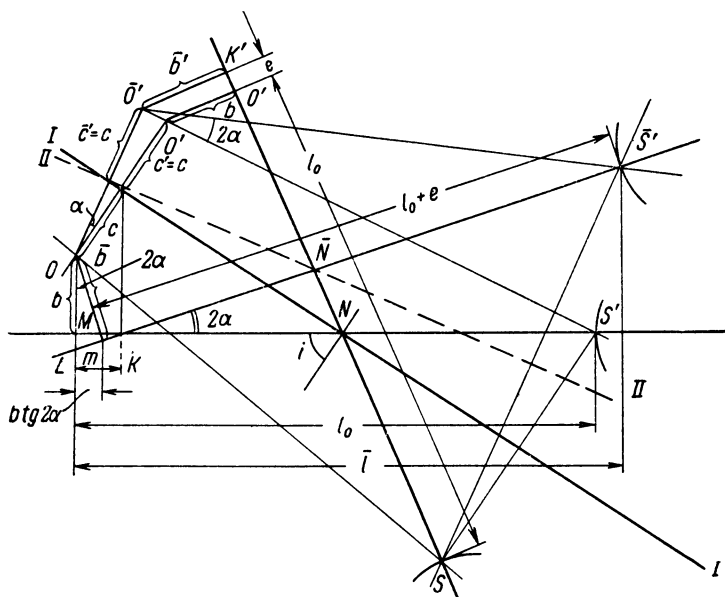


Рис. 163

системы; нетрудно определить величину проекции на ось II системы  $D'K' = e$ ;

$$e = 2c\alpha \sin i. \quad (761)$$

Выразим  $\bar{b}'$  также через дугу  $2c\alpha$ ; для этого напомним

$$\bar{b}' - b = 2c\alpha \cos i. \quad (762)$$

Согласно рис. 163, нетрудно найти расстояние

$$\bar{l} = \bar{b}' \sin 2\alpha + (l_0 + e) \cos 2\alpha, \quad (763)$$

откуда, пользуясь малостью угла  $\alpha$ , легко определяем разность отрезков

$$\Delta l = \bar{l} - l_0 = 2b\alpha + 2c\alpha \sin i = 2(b + c \sin i)\alpha. \quad (764)$$

Формула (764) дает нам изменение расстояния между предыдущей и последующей системами после поворота зеркала на угол  $\alpha$ .

Необходимо отметить, что точка пересечения осей последующей и предыдущей систем будет расположена на расстоянии  $m$  от основания перпендикуляра, опущенного из центра вращения  $O$  на ось предшествующей системы, которое, согласно рис. 162, может быть определено из треугольника, т. е.

$$m = \frac{ML}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \frac{OL - b}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \frac{\bar{b}}{\cos 2\alpha \operatorname{tg} 2\alpha} - \frac{b}{\operatorname{tg} 2\alpha}. \quad (765)$$

Учитывая (762), найдем

$$m = \frac{b + 2c\alpha \cos i - b \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha} = \frac{2b \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\alpha c \cos i}{\sin \alpha \cos \alpha}; \quad (766)$$

при малых углах  $\alpha$

$$m = c \cos i. \quad (767)$$

Формула (767) определяет нам точку  $K$  излома оси как проекцию основания перпендикуляра, опущенного из центра  $O$  вращения зеркала на плоскость зеркала.

## § 60. Вращение пары зеркал

Вращение пары зеркал можно рассматривать как последовательный поворот обоих зеркал вокруг одного и того же центра.

Однако, рассматривая развертку обоих отражений, будем после развертки первого отражения осуществлять поворот развертки второго отражения вокруг отображения центра вращения после первой развертки; при этом вращение вокруг отображенного центра будет происходить в обратном направлении, но на тот же самый угол. Эта картина представлена на рис. 164.

Действуя подобным образом, можно последовательно применять формулы, полученные в предыдущем параграфе. Нетрудно видеть, что при этом угол отклонения оси после двух отражений будет равен нулю; что же касается точек излома оси, то они определяются, согласно предыдущему, как проекции оснований перпендикуляров из обоих центров вращения на плоскости обоих зеркал.

Величину смещения оси в поперечном направлении можно определить по формуле

$$\Delta y = 2(c_1 \cos i_1 + c_2 \cos i_2)\alpha; \quad (768)$$

продольное же смещение будет равно

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = 2[b_1 - b_2 + c_1 \sin i_1 - c_2 \sin i_2] \alpha, \quad (769)$$

где

$$b_2 = b_1 + 2c_1 \sin i_1. \quad (770)$$

Окончательно формула (769) примет вид

$$\Delta l = -2[c_1 \sin i_1 + c_2 \sin i_2] \alpha. \quad (771)$$

Ввиду того, что в (768) и (771) не вошли координаты центров  $b_1$  и  $b_2$ , значение как поперечного, так и продольного смещения

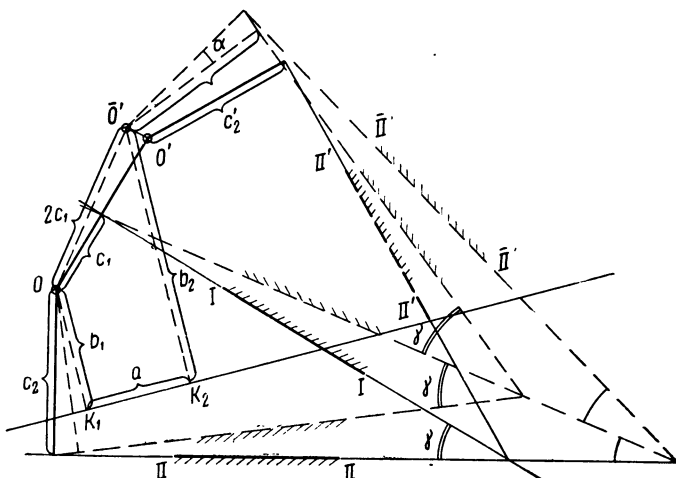


Рис. 164

при повороте пары зеркал будет зависеть лишь от отстояния центра вращения от первого и второго зеркала, в частном случае, когда центр вращения совпадает с пересечением обоих зеркал, оба смещения оказываются равными нулю.

Нетрудно себе представить, что рассмотренный прием легко может быть распространен на три и большее число отражений.

### § 61. Вращение системы зеркал вокруг оси, лежащей в плоскости главного сечения

Предположим, что система зеркал рис. 165, *а* и *б*, вращающаяся вокруг оси  $OO'$ , лежащей в плоскости чертежа, имеет входную и выходную грани, расположенные в точках  $A$  и  $B$  перпендикулярно оси до и после отклонения ее системой.

Расстояния входной и выходной граней вдоль входящей и выходящей осей от оси вращения  $OO_1$  примем равными  $R$  и  $R'$ . Углы наклона входной и выходной осей относительно оси вращения обозначим через  $\kappa$  и  $\kappa'$ . Если повернуть систему зеркал на малый угол  $\gamma$ , нормали к входной и выходной граням опишут конические поверхности и образуют малые углы отклонения  $j_s$  и  $j'_s$  к своему исходному положению.

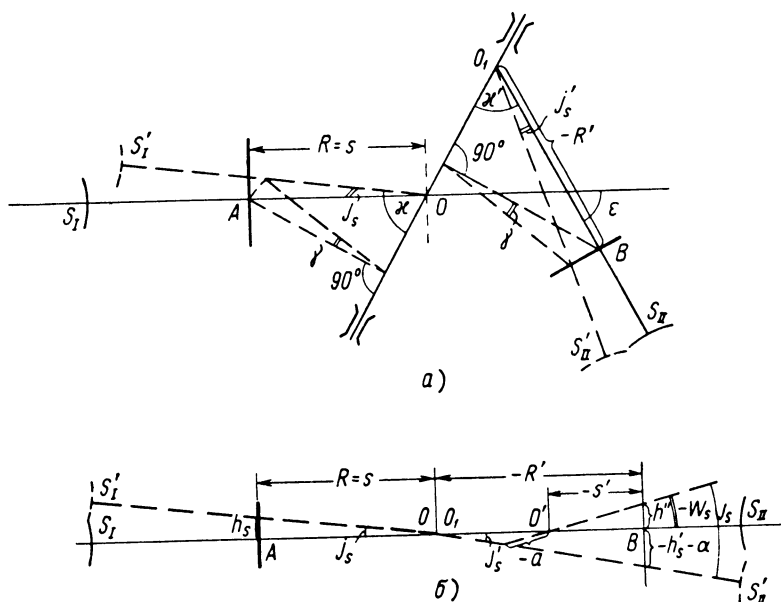


Рис. 165

Согласно чертежа, можно записать:

$$j_s = \gamma \sin \kappa, \quad j'_s = \gamma \sin \kappa'. \quad (772)$$

Углы  $j_s$  и  $j'_s$  будут лежать в сагиттальной плоскости (принимая плоскость чертежа как меридиональную).

В общем случае система зеркал в сагиттальной плоскости может иметь угловое увеличение  $W_s = \pm 1$  ( $W_s = -1$  возможно при наличии крыши); поэтому ось предыдущей системы будет отклонена после поворота призмы на угол, равный  $W_s j_s$  от своего первоначального положения.

Таким образом, угол  $\alpha$  расхождения между осью последующей системы и осью предыдущей системы после системы зеркал будет равен

$$\alpha = j'_s - W_s j_s \quad (773)$$

или после подстановки значений углов  $j_s'$  и  $j_s$  из формулы (772)

$$\alpha = (\sin \kappa' - W_s \sin \kappa) \gamma. \quad (774)$$

Определим положение точки  $K$  излома оси. Из рис. 165 следует, что расстояние

$$BK = \frac{h_s' - h''}{\alpha} = \frac{R' j_s' - s' W_s j_s}{\alpha} \quad (775)$$

или, пользуясь формулами (772) и (774),

$$BK = \frac{R' \sin \kappa' - s' W_s \sin \kappa}{\sin \kappa' - W_s \sin \kappa}. \quad (776)$$

Зная величину отрезка  $BK$ , нетрудно определить расстояние  $a$  между точками  $K$  и  $O'$ ; после некоторых преобразований

$$a = BK - s' = \frac{R' - s'}{1 - W_s \frac{\sin \kappa}{\sin \kappa'}}. \quad (777)$$

В частном случае равенства углов  $\kappa$  и  $\kappa'$  и  $W_s = +1$  величина  $a$  обращается в бесконечность, что соответствует случаю, когда  $\alpha = 0$ .

В другом частном случае, когда  $R' = s'$ , величина  $a$  будет равна нулю при любых значениях углов  $\kappa$  и  $\kappa'$  и величины  $W_s$ .

## § 62. Силовой деформирующий элемент

Основными причинами возникновения силовых деформирующих элементов можно считать: 1) изменение показателя преломления в тех или иных линзах и 2) изменение толщины линз; изменения радиусов кривизны большей частью не происходит, так как при наличии контроля с помощью пробных стекол оно может считаться исключенным.

Правда, можно было бы говорить об отступлениях фактического радиуса пробного стекла от номинала, но такие случаи встречаются не часто и их всегда можно учесть еще при абберационном расчете системы.

В силу этих соображений остановимся на рассмотрении упомянутых ранее двух случаев.

1. Изменение показателя преломления. Для силы тонкой линзы имеем

$$\varphi_0 = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (778)$$



Дифференцируя (778) по показателю преломления, получаем

$$d\varphi = \frac{dn}{n-1} \varphi_0 = \frac{\varphi_0}{\mu} . \quad (779)$$

Формула (779), как это нетрудно видеть, весьма напоминает собой выражение для хроматизма тонкой линзы.

Для ахроматизированного объектива, склеенного из двух линз, существует следующее выражение для силы  $\varphi_k$  кроновой линзы

$$\varphi_k = \frac{\nu_k}{\nu_k - \nu_\phi} \varphi, \quad (780)$$

причем

$$\varphi = \varphi_k + \varphi_\phi, \quad (781)$$

где  $\nu_k$  и  $\nu_\phi$  — числа Аббе соответственно для кроновой и флинтовой линз.

В частном случае, когда  $\nu_k = 64,1$  (стекло К-8) и  $\nu_\phi = 36,9$  (стекло Ф-1), получаем

$$\varphi_k = \frac{64,1}{64,1 - 36,9} \varphi = 2,36 \varphi.$$

И если кроновая линза будет изготовлена из стекла IV категории по показателю  $-\Delta n = \pm 20 \cdot 10^{-4}$ , то тогда для К-8

$$\mu = \frac{0,5163}{0,002} = 258,1,$$

а изменение силы кроновой линзы

$$\Delta\varphi_k = \frac{\varphi_k}{\mu} = \frac{2,36}{258,1} \varphi = 0,0091 \varphi = 0,91 \% \varphi;$$

иными словами, приращение силы кроновой линзы составит около 1 % силы всего ахроматического компонента.

2. Изменение толщины линз будет вызывать возникновение деформирующего элемента в виде линзы с равными радиусами и толщиной, равной изменению толщины основной линзы. Сила такого деформирующего элемента будет

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta d (n-1)^2}{nr^2} . \quad (782)$$

Численно, для частного случая, когда  $\Delta d = 0,3 \text{ мм}$ ,  $n = 1,5$  и  $r = 100 \text{ м}$

$$\Delta\varphi = \frac{0,3}{1,5} \cdot \left(\frac{0,5}{100}\right)^2 = \frac{0,2}{40000} = \frac{1}{100\,000},$$

а фокусное расстояние

$$f' = \frac{1}{\Delta\varphi} = 100\,000 \text{ мм} = 100 \text{ м};$$

однако, для  $r = 10 \text{ мм}$  величина  $\Delta\varphi$  составит  $\frac{1}{1000}$ , т. е. 1 диоптрию.

---

Глава XVII

**НАБОР СКЛЕЕННЫХ ОБЪЕКТИВОВ**

**§ 63. Общие соображения**

Современные телескопические системы в своем подавляющем большинстве (за немногими исключениями, характеризующимися главным образом наличием повышенных оптических характеристик) строятся из двоякого рода оптических элементов — из окуляров и отдельно стоящих склеенных линз, для которых предмет (или изображение) располагается в бесконечности или в передней (задней) фокальной плоскости.

Такие склеенные из двух стекол линзы могут быть отождествлены со склеенными объективами, работающими при предмете, удаленном в бесконечность.

В настоящее время окуляры более или менее систематизированы и сведены в наборы окуляров различных типов; эти наборы приводятся на стр. 392—396.

Возвращаясь к объективам, должны отметить, что их систематизации до сих пор не было; имелись лишь весьма объемистые каталоги объективов, когда-либо выпускавшихся на тех или иных заводах.

Пользование такими каталогами было весьма затруднительно и нередко при разработке телескопических систем приходилось прибегать к расчетам склеенных объективов заново.

Задачи, решаемые в результате применения склеенных объективов в телескопических системах с более или менее обычными оптическими характеристиками, не слишком разнообразны и могут быть сведены в основном к следующему:

1. Должна быть осуществлена определенная коррекция сферической аберрации на заданной зоне.

2. В соответствии с исправлением сферической аберрации должна быть осуществлена ахроматизация объектива.

3. При определенном выносе зрачка должна быть осуществлена та или иная коррекция астигматизма.

Все эти задачи могут быть выполнены в пределах более или менее обычных оптических характеристик объектива путем создания сравнительно небольшого набора типовых объективов.

Совершенно очевидно, что подобный набор должен основываться на свойствах линзы, склеенной из двух различных стекол.

Эти свойства склеенной линзы отличаются от свойств простой одиночной линзы особенностями работы склеенной поверхности — разделяющей две среды с малой (сравнительно) разностью показателей преломления.

Рассматривая изменения влияния формы (прогиба) простой положительной линзы на ее аберрации, замечаем, что сферическая аберрация при переходе от формы мениска, обращенного вогнутостью к параллельному ходу, к форме, обращенной к параллельному ходу выпуклостью, переходит через минимум, оставаясь отрицательной по знаку.

Введение нормальной склейки в такую линзу, когда показатель преломления среды, расположенной с вогнутой стороны склеенной поверхности (или, точнее, когда показатель преломления положительной линзы), будет меньше, нежели с выпуклой стороны поверхности склейки, несколько поднимает кривую сферической аберрации; при достаточно большом подъеме эта кривая будет пересекать ось абсцисс, что будет соответствовать формам склеенной линзы, свободным от сферической аберрации. Ахроматизация склеенной линзы может быть осуществлена следующим образом.

Хроматическая аберрация отдельной линзы в воздухе или изменение оптической силы линзы в связи с изменением показателя преломления при переходе от одной длины волны света к другой могут быть определены посредством дифференцирования выражения для оптической силы тонкой линзы

$$\varphi = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (783)$$

Логарифмически дифференцируя (783), находим

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{dn}{n - 1} = \frac{1}{\nu}, \quad (784)$$

где  $\nu$  — число Аббе, или коэффициент дисперсии.

Из (784) следует

$$d\varphi = \frac{\varphi}{\nu}. \quad (785)$$

Для силы системы из двух тонких соприкасающихся линз имеем

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (786)$$

Дифференцируя это выражение, получаем

$$d\varphi = d\varphi_1 + d\varphi_2, \quad (787)$$

и, пользуясь (785), находим

$$d\varphi = \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2}. \quad (788)$$

Величины  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $v_1$  и  $v_2$  являются постоянными и не зависят от величин радиусов рассматриваемых линз; поэтому приходим к выводу, что изменение формы линз при сохранении их сил не должно вызывать изменения хроматической аберрации и, наоборот, изменение сил линз (например, увеличение силы одной линзы за счет соответственного изменения силы другой линзы) будет приводить к изменению хроматической аберрации всей системы.

Совершенно очевидно, что, приведя силу одной из линз (например, флинтовой) до значения, равного нулю, приведем нашу систему из двух линз к случаю одной простой линзы, у которой, как уже видели, сферическая аберрация при любой ее форме всегда остается отрицательной, а кривая сферической аберрации опустится и перейдет в область отрицательных значений.

Таким образом, приходим к выводу, что изменение ахроматизации склеенной линзы при неизменности сорта стекла также приводит к изменению положения кривой сферической аберрации.

Выше говорилось об изменении сферической аберрации в зависимости от прогиба рассматриваемой линзы; однако выбора параметра, определяющего собой прогиб линзы, произведено не было.

Не останавливаясь на изложении мотивов такого выбора, ограничимся указанием на целесообразность принятия за такой параметр некоторой величины  $Q$ , связанной с величинами  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , определяющими ход нулевого луча, формулами

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0 \\ \alpha_2 &= \left(1 - \frac{1}{n_2}\right)Q + \varphi_1 \\ \alpha_3 &= \left(1 - \frac{1}{n_3}\right)Q + \varphi_1 \\ \alpha_4 &= 1 \end{aligned} \right\}. \quad (789)$$

Величина  $\varphi_1$  — сила первой линзы при силе всей системы, равной единице. Правильность формул (789) может быть проверена несложными преобразованиями формул (71) и (74).

Действительно, положив  $h=1$ , получим

$$\varphi_1 = (n_2 - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n_2 - 1) \left[ \frac{n_3 \alpha_2}{n_2 - 1} - \frac{n_3 \alpha_3 - n_2 \alpha_2}{n_3 - n_2} \right], \quad (790)$$

а на основании (789) и (71)

$$\frac{1}{r_1} = Q + \frac{n_2 \varphi_1}{n_2 - 1}; \quad \frac{1}{r_2} = Q + \varphi_1. \quad (791)$$

Сопоставляя (790) с (789) или (791), приходим к тождеству

$$\varphi_1 = (n_2 - 1)Q + n_2 \varphi_1 - (n_2 - 1)Q - (n_2 - 1)\varphi_1 = \varphi_2, \quad (792)$$

которое подтверждает правильность приведенных нами формул (789).

Формулы (789) показывают, что при изменении параметра  $Q$  сила первой линзы сохранится неизменной, или, иными словами, хроматическая aberrация склеенной линзы при изменении только одной величины  $Q$  будет сохраняться неизменной. Это обстоятельство и определило собой целесообразность выбора в качестве параметра, определяющего собой форму (прогиб) склеенной линзы, указанной выше величины  $Q$ .

В результате всего сказанного приходим к разделению влияния параметров, так как параметр  $Q$  будет определять хроматическую aberrацию склеенной линзы и подъем или опускание всей кривой сферической aberrации, как функции от параметра  $Q$ .

С изменением параметра  $Q$  изменяется сферическая aberrация при неизменности хроматической aberrации.

Изменение сферической aberrации, как функции двух параметров  $\varphi_1$  и  $Q$ , представлено на рис. 166 (1 — кривая сферической aberrации; 2 — ее новое положение при увеличении  $\varphi_1$ ).

Как уже говорилось, изменение сферической aberrации у склеенной линзы напоминает изменение сферической aberrации у простой линзы; поэтому, когда сферическая aberrация у склеенной линзы имеет положительные значения, всегда получаем две формы склеенной линзы, соответствующие точкам, в которых сферическая aberrация обращается в нуль при переходе в область отрицательных значений.

Эти две формы отличаются тем, что имеют кому противоположного знака.

В частном случае, когда оба корня для исправления сферической aberrации оказываются совпадающими или близкими, будем иметь кому, равную нулю или близкую к нулю. Из практики расчета оптических систем (на что обращалось внимание в § 14, гл. V) известно, что при одновременном уничтожении сферической aberrации и комы у тонкой линзы исправление астигматизма становится невозможным; наоборот, при наличии комы у тонкой линзы с исправленной сферической aberrацией всегда возможно исправление астигматизма при соответственном подборе положения входного зрачка.

Вместе с тем кома, оставленная у тонкого компонента неисправленной, может быть скомпенсирована в сложной оптической системе комой другого тонкого компонента (например, в симмет-

ричной системе); поэтому предпочтительнее обеспечить при определенном положении входного зрачка исправление астигматизма у тонкого компонента с исправленной сферической aberrацией.

Знак комы, оставленной у тонкого компонента неисправленной, определяет положение входного зрачка впереди или позади линзы.

Величина выноса зрачка (удаление зрачка) будет обратно пропорциональна величине оставленной комы.

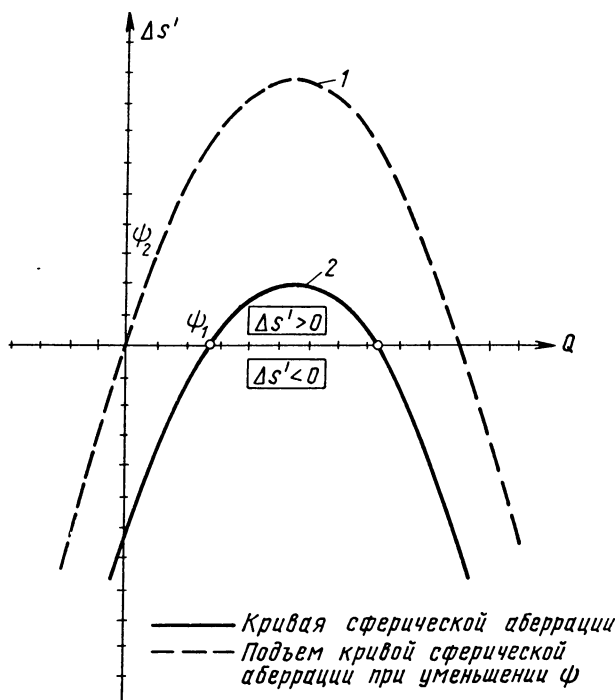


Рис. 166

В подавляющем большинстве случаев для практического применения представляют интерес склеенные линзы с исправленной сферической aberrацией, хроматизмом и астигматизмом, уничтоженным при вынесенном положении входного зрачка; другие возможные случаи исправления aberrаций тонкого компонента будут иметь либо академический интерес, либо узкий практический интерес в каких-либо особых частных случаях.

Эти соображения приводят к выводу, что возможно удовлетворить требованиям большинства практических задач путем создания сравнительно небольшого набора склеенных объективов, в которых в известных нешироких пределах имеется изменение сферической aberrации, хроматизма и астигматизма при различных выносах входного зрачка.

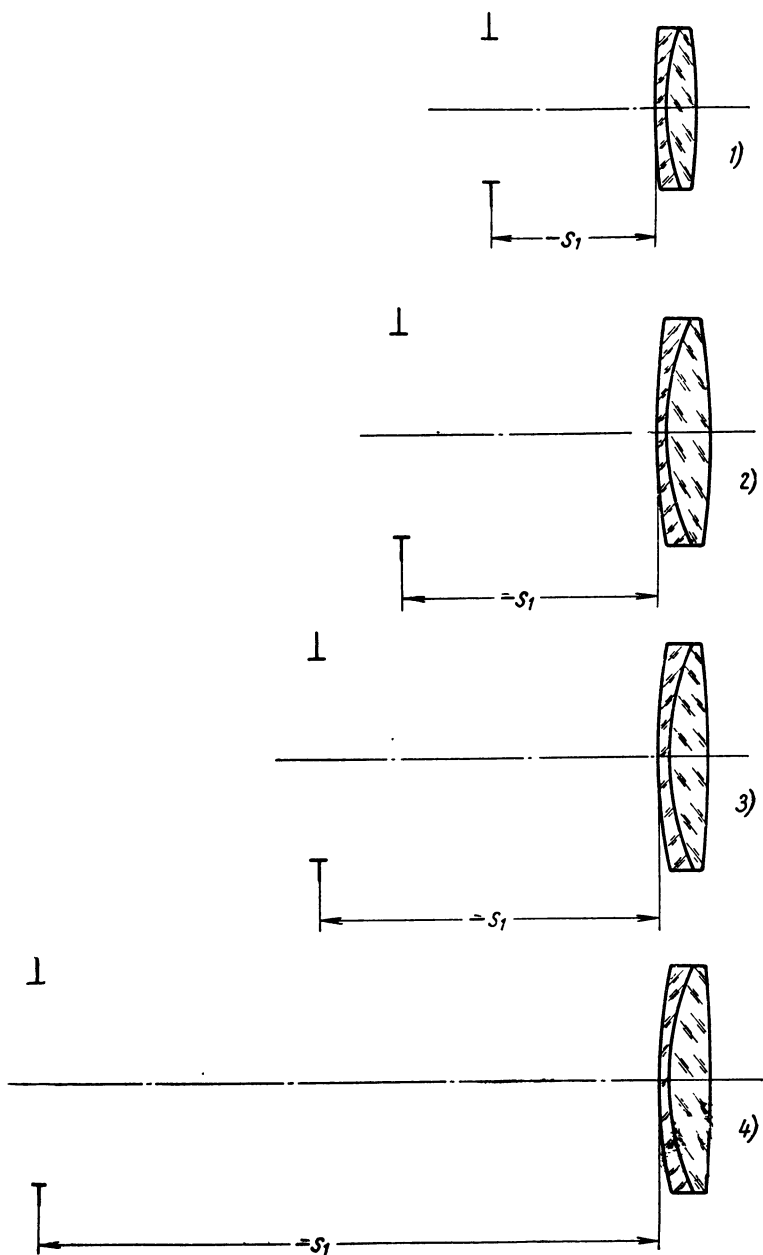


Рис. 167



Разработанный набор двухлинзовых склеенных объективов построен в полном соответствии с ранее высказанными соображениями и состоит из четырех пар стекол (рис. 167); во всех случаях предполагается размещение флинтовой отрицательной линзы со стороны предмета, лежащего в бесконечности (так называемый случай «флинт вперед»); зрачок входа предполагается всегда вынесенным вперед.

В наборе приводятся объективы, рассчитанные для трех фокусных расстояний:  $f' = 200, 150$  и  $100$  мм; четыре пары стекол определяют собой возможность исправления астигматизма при соответственном выносе зрачка и ахроматизации объектива.

Набор построен следующим образом: на стр. 272—311 таблицы приведены данные различных объективов при  $f' = 200$  мм, стр. 312—351 содержат данные объективов при  $f' = 150$  мм и стр. 352—391 — данные для объективов с  $f' = 100$  мм.

При  $f' = 200$  мм принято полевые углы  $\beta$  равны 2; 3 и 4°,  $h = 20; 17; 14; 11$  и  $8$  мм; при  $f' = 150$  мм — углы  $\beta = 2; 3^{\circ}30'$  и  $5^{\circ}$ ,  $h = 16; 13; 5; 11; 8,5$  и  $6$  мм, а для  $f' = 100$  мм —  $\beta = 2; 4$  и  $6^{\circ}$ ,  $h = 12; 10; 8; 6$  и  $4$  мм.

Для каждой пары стекол задавалось пять значений коэффициента  $c$  ( $-0,0015; -0,0010; -0,0005; 0,0000$  и  $+0,0005$ ), определявшие собой величину хроматизма положения для точки на оси объектива в долях его фокусного расстояния.

Таким образом, каждый набор определяется фокусным расстоянием, парой стекол и коэффициентом  $c$ .

Все эти величины даны в верхней строке каждой страницы; кроме того, вверху записаны толщины линз.

На каждой странице приводятся шесть значений параметра  $Q$ , дающего шесть вариантов объектива, имеющих разную сферическую aberrацию; радиусы поверхностей этих вариантов записаны сразу после величин  $Q$ .

После значений радиусов записаны величины сферической aberrации для трех длин волн, соответствующих линиям спектра  $C, D$  и  $F$ .

Ниже в таблицах для каждого из вариантов приводятся в одной и той же строке, соответствующей определенному удалению зрачка, значения астигматизма и дисторсии для трех полевых углов.

В последней графе таблиц приводится значение комы при наибольшем полевом угле и среднем положении зрачка входа; для других углов величина комы может быть проинтерполирована линейно; влияние же на кому положения зрачка в рассматриваемых диапазонах практически еще неощутимо.

$$f' = 200, 0; \quad \nu_2 = 39, 1; \quad \nu_3 = 58, 9; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s'₀	z	n₂	n₃	Δ s'				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
6, 14	198, 38	229, 24 48, 39 -114, 55	C	1, 5155	-0, 084	-0, 239	-0, 335	-0, 413	-0, 313
			D	1, 5181	-0, 162	-0, 292	-0, 384	-0, 411	-0, 296
			F	1, 5243	0, 084	0, 002	-0, 056	0, 016	0, 228
			β = 3°						
6, 18	198, 21	219, 19 47, 91 -117, 16	Δ y'	xₜ	xₛ	Δ y'	xₜ	xₛ	Δ y'
			-0, 002	-0, 087	-0, 167	-0, 005	-0, 150	-0, 295	-0, 012
			-0, 002	0, 013	-0, 133	-0, 005	0, 029	-0, 236	-0, 013
			-0, 002	0, 113	-0, 100	-0, 005	0, 208	-0, 177	-0, 012
6, 22	198, 04	209, 99 47, 44 -119, 90	-0, 002	0, 212	-0, 088	-0, 005	0, 386	-0, 118	-0, 012
			-0, 001	0, 311	-0, 035	-0, 005	0, 564	-0, 060	-0, 011
			C	1, 5155	-0, 034	-0, 101	-0, 157	-0, 128	0, 068
			D	1, 5181	-0, 108	-0, 163	-0, 208	-0, 125	0, 094
-30, 0	-0, 045	-0, 076	F	1, 5243	0, 130	0, 099	0, 145	0, 281	0, 642
			-0, 099	-0, 171	-0, 005	-0, 172	-0, 302	-0, 013	
			-0, 002	0, 001	-0, 137	-0, 005	0, 007	-0, 243	-0, 013
			-0, 002	0, 101	-0, 104	-0, 005	0, 186	-0, 184	-0, 013
-38, 0	0, 044	-0, 047	-0, 002	0, 200	-0, 071	-0, 005	0, 365	-0, 125	-0, 012
			-0, 002	0, 300	-0, 039	-0, 005	0, 544	-0, 067	-0, 012
			-0, 001	1, 5155	0, 022	-0, 004	0, 015	0, 137	0, 453
			D	1, 5181	-0, 035	-0, 066	-0, 021	0, 133	0, 490
-42, 0	0, 088	-0, 032	F	1, 5243	0, 183	0, 215	0, 317	0, 592	1, 019
			-0, 002	-0, 175	-0, 005	-0, 193	-0, 310	-0, 013	
			-0, 002	-0, 142	-0, 005	-0, 014	-0, 251	-0, 013	
			-0, 006	-0, 006	-0, 006	-0, 006	-0, 006	-0, 006	

-38,0	0,038	-0,048	-0,002	0,089	-0,108	-0,005	0,165	-0,192	-0,013
-42,0	0,082	-0,034	-0,002	0,189	-0,075	-0,005	0,344	-0,132	-0,012
-46,0	0,126	-0,019	-0,001	0,288	-0,042	-0,005	0,524	-0,073	-0,012
6,26	197,88	201,52	C 1,6213	1,5155	0,079	0,096	0,189	0,397	0,826
		46,98	D 1,6259	1,5181	0,002	0,040	0,151	0,391	0,862
		-122,77	F 1,6373	1,5243	0,242	0,325	0,497	0,829	1,410
-30,0	-0,056	-0,080	-0,002	-0,123	-0,179	-0,005	-0,215	-0,317	-0,013
-34,0	-0,011	-0,055	-0,002	-0,024	-0,146	-0,005	-0,032	-0,258	-0,013
-38,0	0,033	-0,050	-0,002	0,076	-0,113	-0,005	0,143	-0,199	-0,013
-42,0	0,077	-0,036	-0,002	0,176	-0,080	-0,005	0,323	-0,140	-0,013
-46,0	0,121	-0,021	-0,002	0,277	-0,046	-0,005	0,504	-0,080	-0,012
6,30	197,71	193,72	C 1,6213	1,5155	0,156	0,228	0,384	0,688	1,232
		46,54	D 1,6259	1,5181	0,057	0,142	0,322	0,652	1,235
		-125,78	F 1,6373	1,5243	0,334	0,461	0,700	1,122	1,832
-30,0	-0,061	-0,082	-0,002	-0,136	-0,183	-0,005	-0,237	-0,325	-0,013
-34,0	-0,017	-0,067	-0,002	-0,036	-0,150	-0,006	-0,059	-0,266	-0,013
-38,0	0,027	-0,052	-0,002	0,064	-0,117	-0,005	0,120	-0,207	-0,013
-42,0	0,071	-0,038	-0,002	0,164	-0,084	-0,005	0,301	-0,147	-0,013
-46,0	0,116	-0,023	-0,002	0,265	-0,050	-0,005	0,482	-0,088	-0,012
6,34	197,54	186,49	C 1,6213	1,5155	0,178	0,294	0,518	0,905	1,561
		46,09	D 1,6259	1,5181	0,106	0,239	0,483	0,901	1,599
		-128,96	F 1,6373	1,5243	0,354	0,530	0,841	1,348	2,176
-30,0	-0,067	-0,083	-0,002	-0,148	-0,187	-0,005	-0,260	-0,332	-0,013
-34,0	-0,023	-0,069	-0,002	-0,049	-0,154	-0,006	-0,082	-0,273	-0,013
-38,0	0,021	-0,054	-0,002	0,051	-0,121	-0,006	0,097	-0,214	-0,013
-42,0	0,066	-0,039	-0,002	0,151	-0,088	-0,005	0,278	-0,155	-0,013
-46,0	0,110	-0,025	-0,002	0,252	-0,055	-0,005	0,460	-0,095	-0,012

$f' = 200,0$ ;  $v_2 = 39,1$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 3,0$ ;  $d_2 = 9,0$ ;  $c = 0,0000$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -38$ .

Q	s'	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
6,04	198,11	216,63 48,87 -119,22	C	1,5155	-0,047	-0,166	-0,273	-0,325	-0,239
			D	1,5181	-0,148	-0,250	-0,339	-0,366	-0,244
			F	1,5243	0,015	-0,027	-0,077	-0,052	0,172
β = 2°									
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-30,0	-0,058	-0,080	-0,002	-0,130	-0,181	-0,005	-0,228	-0,320	-0,013
-34,0	-0,016	-0,066	-0,002	-0,035	-0,149	-0,006	-0,056	-0,264	-0,013
-38,0	0,026	-0,052	-0,002	0,060	-0,117	-0,006	0,114	-0,207	-0,013
-42,0	0,068	-0,038	-0,002	0,155	-0,086	-0,005	0,284	-0,151	-0,013
-46,0	0,109	-0,025	-0,002	0,250	-0,055	-0,005	0,454	-0,096	-0,012
β = 3°									
6,08	197,94	202,63 48,39 -122,06	C	1,5155	0,007	-0,061	-0,098	-0,065	0,124
			D	1,5181	-0,093	-0,148	-0,167	-0,108	0,113
			F	1,5243	0,069	0,056	0,090	0,225	0,541
-30,0	-0,064	-0,082	-0,002	-0,142	-0,185	-0,005	-0,250	-0,328	-0,013
-34,0	-0,022	-0,068	-0,002	-0,047	-0,153	-0,006	-0,079	-0,271	-0,013
-38,0	0,020	-0,054	-0,002	0,048	-0,122	-0,006	0,092	-0,215	-0,013
-42,0	0,062	-0,040	-0,002	0,143	-0,090	-0,005	0,262	-0,159	-0,013
-46,0	0,104	-0,026	-0,002	0,238	-0,059	-0,005	0,433	-0,103	-0,012
β = 4°									
6,12	197,77	199,35 47,91 -125,04	C	1,5155	0,057	0,040	0,068	0,190	0,479
			D	1,5181	-0,042	-0,046	0,000	0,149	0,477
			F	1,5243	0,112	0,156	0,262	0,488	0,925
-30,0	-0,070	-0,084	-0,002	-0,155	-0,189	-0,006	-0,272	-0,335	-0,013
-34,0	-0,028	-0,070	-0,002	-0,060	-0,157	-0,006	-0,101	-0,279	-0,013
β = 5°									
-30,0	-0,070	-0,084	-0,002	-0,155	-0,189	-0,006	-0,272	-0,335	-0,013
-34,0	-0,028	-0,070	-0,002	-0,060	-0,157	-0,006	-0,101	-0,279	-0,013

-38,0	0,014	-0,056	-0,002	0,035	-0,126	-0,006	0,069	-0,222	-0,013	$h=\pm 11$ 0,196
-42,0	0,056	-0,042	-0,002	0,130	-0,094	-0,006	0,240	-0,166	-0,013	
-46,0	0,098	-0,028	-0,002	0,226	-0,063	-0,005	0,412	-0,110	-0,013	
6,16	197,60	191,71 47,44 -128,17	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,110 0,009 0,176	0,134 0,052 0,255	0,225 0,160 0,426	0,433 0,396 0,721	0,838 0,832 1,293	
-30,0	-0,075	-0,086	-0,002	-0,168	-0,193	-0,006	-0,294	-0,343	-0,013	$h=\pm 17$ 0,513
-34,0	-0,033	-0,072	-0,002	-0,073	-0,162	-0,006	-0,124	-0,286	-0,013	
-38,0	0,008	-0,058	-0,002	0,022	-0,130	-0,006	0,046	-0,230	-0,014	
-42,0	0,051	-0,044	-0,002	0,118	-0,099	-0,006	0,217	-0,174	-0,013	$h=\pm 11$ 0,196
-46,0	0,093	-0,030	-0,002	0,213	-0,067	-0,005	0,389	-0,117	-0,013	
6,20	197,43	184,63 46,98 -131,47	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,157 0,057 0,229	0,229 0,146 0,352	0,384 0,319 0,592	0,675 0,638 0,988	1,181 1,181 1,644	
-30,0	-0,081	-0,088	-0,002	-0,181	-0,198	-0,006	-0,317	-0,350	-0,013	$h=\pm 17$ 0,515
-34,0	-0,039	-0,074	-0,002	-0,086	-0,166	-0,006	-0,148	-0,294	-0,014	
-38,0	0,003	-0,060	-0,002	0,009	-0,135	-0,006	0,022	-0,238	-0,014	
-42,0	0,045	-0,046	-0,002	0,104	-0,103	-0,006	0,194	-0,182	-0,014	$h=\pm 11$ 0,197
-46,0	0,087	-0,032	-0,002	0,200	-0,072	-0,006	0,366	-0,125	-0,013	
6,24	197,26	178,06 46,53 -134,96	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,200 0,107 0,264	0,314 0,242 0,446	0,535 0,478 0,742	0,901 0,871 1,230	1,513 1,523 1,786	
-30,0	-0,087	-0,090	-0,002	-0,194	-0,202	-0,006	-0,340	-0,358	-0,013	$h=\pm 17$ 0,516
-34,0	-0,045	-0,076	-0,002	-0,099	-0,171	-0,006	-0,172	-0,302	-0,014	
-38,0	0,003	-0,062	-0,002	-0,005	-0,139	-0,006	-0,002	-0,246	-0,014	
-42,0	0,039	-0,048	-0,002	0,091	-0,108	-0,006	0,170	-0,190	-0,014	$h=\pm 11$ 0,197
-46,0	0,081	-0,034	-0,002	0,187	-0,076	-0,006	0,342	-0,133	-0,013	

$f' = 200, 0$ ;  $\gamma_2 = 39, 1$ ;  $\gamma_3 = 58, 9$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -38$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
5, 94	197, 84	205, 33	C	1, 5155	-0, 004	-0, 107	-0, 204	-0, 250	-0, 178
		49, 37	D	1, 5181	-0, 134	-0, 225	-0, 304	-0, 327	-0, 223
		-124, 30	F	1, 5243	-0, 046	-0, 103	-0, 133	-0, 129	0, 110
β = 2°									
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-30, 0	-0, 078	-0, 087	-0, 002	-0, 173	-0, 194	-0, 006	-0, 304	-0, 345	-0, 013
-34, 0	-0, 037	-0, 073	-0, 002	-0, 082	-0, 164	-0, 006	-0, 142	-0, 291	-0, 014
-38, 0	-0, 003	-0, 060	-0, 002	0, 008	-0, 124	-0, 006	0, 021	-0, 238	-0, 014
-42, 0	0, 042	-0, 047	-0, 002	0, 098	-0, 104	-0, 006	0, 183	-0, 184	-0, 013
-46, 0	0, 082	-0, 034	-0, 002	0, 188	-0, 075	-0, 006	0, 344	-0, 131	-0, 013
5, 98	197, 67	197, 53	C	1, 5155	0, 044	-0, 015	-0, 045	-0, 010	0, 165
		48, 87	D	1, 5181	-0, 085	-0, 120	-0, 142	-0, 080	0, 125
		-127, 40	F	1, 5243	-0, 015	-0, 003	0, 004	0, 163	0, 470
-30, 0	-0, 083	-0, 088	-0, 002	-0, 186	-0, 199	-0, 006	-0, 327	-0, 353	-0, 013
-34, 0	-0, 043	-0, 075	-0, 002	-0, 095	-0, 169	-0, 006	-0, 165	-0, 299	-0, 014
-38, 0	-0, 003	-0, 062	-0, 002	-0, 005	-0, 139	-0, 006	-0, 002	-0, 245	-0, 014
-42, 0	0, 037	-0, 049	-0, 002	0, 086	-0, 109	-0, 006	0, 160	-0, 192	-0, 014
-46, 0	0, 076	-0, 035	-0, 002	0, 176	-0, 079	-0, 006	0, 322	-0, 139	-0, 013
6, 02	197, 50	189, 75	C	1, 5155	0, 095	0, 081	0, 109	0, 226	0, 505
		48, 38	D	1, 5181	-0, 035	-0, 033	0, 015	0, 156	0, 466
		-130, 65	F	1, 5243	0, 053	0, 092	0, 193	0, 410	0, 815
-30, 0	-0, 089	-0, 090	-0, 002	-0, 199	-0, 203	-0, 006	-0, 350	-0, 360	-0, 013
-34, 0	-0, 049	-0, 077	-0, 002	-0, 108	-0, 173	-0, 006	-0, 188	-0, 307	-0, 014
h = ±17 0, 483									
h = ±11 0, 186									
h = ±17 0, 470									
h = ±11 0, 186									

-38,0	-0,009	-0,064	-0,002	-0,018	-0,143	-0,006	-0,026	-0,253	-0,014	$h=\pm 11$ 0,186
-42,0	0,031	-0,051	-0,002	0,072	-0,113	-0,006	0,136	-0,200	-0,014	
-46,0	0,071	-0,037	-0,002	0,163	-0,083	-0,006	0,299	-0,146	-0,014	
6,06	197,33	182,81	C	1,5155	0,148	0,172	0,265	0,466	0,838	
		47,91	D	1,5181	0,014	0,059	0,168	0,389	0,800	
		-134,09	F	1,5243	0,110	0,186	0,344	0,642	1,152	
-30,0	-0,095	-0,092	-0,002	-0,212	-0,208	-0,006	-0,373	-0,568	-0,014	$h=\pm 17$ 0,443
-34,0	-0,055	-0,072	-0,002	-0,122	-0,178	-0,006	-0,212	-0,315	-0,014	
-38,0	-0,015	-0,066	-0,002	-0,032	-0,148	-0,006	-0,050	-0,262	-0,014	
-42,0	0,025	-0,053	-0,002	0,059	-0,118	-0,006	0,112	-0,208	-0,014	$h=\pm 11$ 0,187
-46,0	0,065	-0,039	-0,002	0,149	-0,088	-0,006	0,275	-0,154	-0,014	
6,10	197,16	176,36	C	1,5155	0,189	0,263	0,410	0,684	1,158	
		47,44	D	1,5181	0,063	0,149	0,319	0,613	1,126	
		-137,72	F	1,5243	0,153	0,286	0,501	0,874	1,483	
-30,0	-0,101	-0,094	-0,002	-0,225	-0,212	-0,006	-0,396	-0,376	-0,014	$h=\pm 17$ 0,429
-34,0	-0,061	-0,081	-0,002	-0,136	-0,182	-0,006	-0,236	-0,323	-0,014	
-38,0	-0,021	-0,068	-0,002	-0,046	-0,152	-0,006	-0,075	-0,270	-0,014	
-42,0	0,018	-0,055	-0,002	0,045	-0,122	-0,006	0,087	-0,216	-0,014	$h=\pm 11$ 0,185
-46,0	0,058	-0,041	-0,002	0,136	-0,092	-0,006	0,250	-0,163	-0,014	
6,14	196,99	170,35	C	1,5155	0,234	0,349	0,554	0,903	1,478	
		46,98	D	1,5181	0,110	0,238	0,463	0,833	1,446	
		-141,56	F	1,5243	0,194	0,366	0,626	1,102	1,811	
-30,0	-0,107	-0,096	-0,002	-0,238	-0,216	-0,006	-0,420	-0,384	-0,013	$h=\pm 17$ 0,416
-34,0	-0,067	-0,083	-0,002	-0,149	-0,187	-0,006	-0,261	-0,331	-0,014	
-38,0	-0,028	-0,070	-0,002	-0,060	-0,157	-0,006	-0,100	-0,278	-0,014	
-42,0	0,012	-0,057	-0,002	0,030	-0,127	-0,006	0,062	-0,225	-0,014	$h=\pm 11$ 0,185
-46,0	0,052	-0,044	-0,002	0,121	-0,097	-0,006	0,225	-0,171	-0,014	

$f' = 200, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 58, 9$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = -0, 0010$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -38$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = 20
					β = 4°						
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20		
5, 84	197, 56	195, 15 49, 87 -129, 85	C	1, 5155	0, 035	-0, 063	-0, 123	-0, 189	-0, 117	h = ±17 0, 456	
			D	1, 5181	-0, 120	-0, 202	-0, 272	-0, 292	-0, 201		
			F	1, 5243	-0, 106	-0, 155	-0, 180	-0, 137	0, 043		
β = 3°											
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	h = ±10 0, 176	
5, 88	197, 39	187, 82 49, 37 -133, 24	C	1, 5155	0, 080	0, 034	0, 006	0, 042	0, 203	h = ±17 0, 456	
			D	1, 5181	-0, 073	-0, 110	-0, 121	-0, 065	0, 123		
			F	1, 5243	-0, 062	-0, 070	-0, 028	0, 085	0, 037		
-30, 0 -34, 0 -38, 0 -42, 0 -46, 0	-0, 102 -0, 064 -0, 026 0, 011 0, 049	-0, 095 -0, 082 -0, 069 -0, 057 -0, 044	-0, 002	-0, 229	-0, 213	-0, 006	-0, 404	-0, 378	-0, 014	h = ±17 0, 456	
			-0, 002	-0, 143	-0, 184	-0, 006	-0, 250	-0, 327	-0, 014		
			-0, 002	-0, 057	-0, 156	-0, 006	-0, 096	-0, 276	-0, 014		
-30, 0 -34, 0 -38, 0 -42, 0 -46, 0	0, 011 0, 049	-0, 057 -0, 044	-0, 002	0, 028	-0, 127	-0, 006	0, 057	-0, 225	-0, 014	h = ±11 0, 176	
			-0, 002	0, 114	-0, 099	-0, 006	0, 211	-0, 174	-0, 014		
			-0, 002			-0, 006					
5, 92	197, 22	181, 02 48, 87 -136, 82	C	1, 5155	0, 124	0, 120	0, 150	0, 261	0, 517	h = ±17 0, 456	
			D	1, 5181	-0, 024	-0, 021	0, 024	0, 157	0, 445		
			F	1, 5243	-0, 009	0, 023	0, 117	0, 389	0, 696		
-30, 0 -34, 0	-0, 108 -0, 071	-0, 097 -0, 084	-0, 002	-0, 242	-0, 217	-0, 006	-0, 428	-0, 385	-0, 014	h = ±17 0, 456	
			-0, 002	-0, 157	-0, 189	-0, 006	-0, 275	-0, 335	-0, 014		
			-0, 002			-0, 006					



-38,0	-0,033	-0,072	-0,002	-0,071	-0,160	-0,006	-0,121	-0,284	-0,014	$h=\pm 11$ 0,176
-42,0	0,005	-0,059	-0,002	0,014	-0,132	-0,006	0,032	-0,233	-0,015	
-46,0	0,043	-0,046	-0,002	0,100	-0,104	-0,006	0,186	-0,183	-0,014	
5,96	197,05	174,70	C	1,5155	0,172	0,204	0,299	0,478	0,828	
		48,38	D	1,5181	0,018	0,062	0,171	0,378	0,757	
		-140,60	F	1,5243	0,030	0,119	0,164	0,543	1,005	
-30,0	-0,114	-0,099	-0,002	-0,256	-0,222	-0,006	-0,451	-0,393	-0,014	$h=\pm 17$ 0,455
-34,0	-0,077	-0,086	-0,002	-0,171	-0,194	-0,006	-0,299	-0,343	-0,014	
-38,0	-0,039	-0,074	-0,002	-0,086	-0,165	-0,006	-0,146	-0,293	-0,015	
-42,0	-0,001	-0,061	-0,002	0,000	-0,137	-0,006	0,007	-0,242	-0,015	$h=\pm 11$ 0,175
-46,0	0,036	-0,048	-0,002	0,086	-0,109	-0,006	0,161	-0,191	-0,015	
6,00	196,88	168,80	C	1,5155	0,215	0,290	0,427	0,690	1,132	
		47,90	D	1,5181	0,062	0,147	0,308	0,591	1,063	
		-144,61	F	1,5243	0,077	0,018	0,414	0,758	1,322	
-30,0	-0,120	-0,101	-0,002	-0,269	-0,226	-0,006	-0,475	-0,402	-0,014	$h=\pm 17$ 0,454
-34,0	-0,083	-0,088	-0,002	-0,185	-0,198	-0,006	-0,324	-0,351	-0,015	
-38,0	-0,045	-0,076	-0,002	-0,100	-0,170	-0,006	-0,172	-0,301	-0,015	
-42,0	-0,008	-0,063	-0,002	-0,015	-0,142	-0,006	-0,019	-0,251	-0,015	$h=\pm 11$ 0,175
-46,0	0,020	-0,051	-0,002	0,071	-0,114	-0,006	0,135	-0,200	-0,015	
6,04	196,72	163,29	C	1,5155	0,278	0,368	0,565	0,896	1,445	
		47,44	D	1,5181	0,106	0,230	0,444	0,797	1,362	
		-148,86	F	1,5243	0,146	0,282	0,548	0,969	1,626	
-30,0	-0,126	-0,103	-0,002	-0,283	-0,231	-0,006	-0,500	-0,410	-0,014	$h=\pm 17$ 0,454
-34,0	-0,089	-0,090	-0,002	-0,199	-0,203	-0,006	-0,350	-0,360	-0,014	
-38,0	-0,052	-0,078	-0,002	-0,115	-0,175	-0,006	-0,198	-0,310	-0,015	
-42,0	-0,014	-0,066	-0,002	-0,030	-0,147	-0,006	-0,046	-0,260	-0,015	$h=\pm 11$ 0,175
-46,0	0,023	-0,053	-0,002	0,056	-0,118	-0,006	0,108	-0,209	-0,015	

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'									
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20					
5, 74	197, 29	185, 94	C	1, 5155	0, 073	-0, 013	-0, 100	-0, 125	-0, 075					
		50, 39	D	1, 5181	-0, 110	-0, 187	-0, 247	-0, 268	-0, 187					
		-135, 93	F	1, 5243	-0, 176	-0, 223	-0, 240	-0, 196	-0, 045					
β = 2°					β = 3°					β = 4°				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		
-30, 0	-0, 116	-0, 099	-0, 002	-0, 259	-0, 222	-0, 006	-0, 457	-0, 394	-0, 014					
-34, 0	-0, 079	-0, 087	-0, 002	-0, 177	-0, 195	-0, 006	-0, 311	-0, 346	-0, 014					
-38, 0	-0, 043	-0, 075	-0, 002	-0, 096	-0, 168	-0, 006	-0, 165	-0, 298	-0, 015					
-42, 0	-0, 008	-0, 063	-0, 002	-0, 014	-0, 141	-0, 006	-0, 020	-0, 250	-0, 015					
-46, 0	0, 028	-0, 051	-0, 002	0, 066	-0, 114	-0, 006	0, 126	-0, 202	-0, 015					
5, 78	197, 12	179, 27	C	1, 5155	0, 119	0, 064	0, 045	0, 082	0, 230					
		49, 87	D	1, 5181	-0, 064	-0, 101	-0, 108	-0, 054	0, 119					
		-139, 66	F	1, 5243	-0, 123	-0, 134	-0, 098	0, 016	0, 270					
-30, 0	-0, 122	-0, 101	-0, 002	-0, 272	-0, 227	-0, 006	-0, 481	-0, 402	-0, 014					
		-0, 089	-0, 002	-0, 191	-0, 200	-0, 006	-0, 336	-0, 354	-0, 015					
		-0, 077	-0, 002	-0, 110	-0, 173	-0, 006	-0, 190	-0, 306	-0, 015					
		-0, 065	-0, 002	-0, 029	-0, 146	-0, 006	-0, 045	-0, 258	-0, 015					
-46, 0	0, 022	-0, 053	-0, 002	0, 052	-0, 119	-0, 006	0, 100	-0, 210	-0, 015					
5, 82	196, 95	173, 07	C	1, 5155	0, 158	0, 146	0, 182	0, 291	0, 520					
		49, 36	D	1, 5181	-0, 024	-0, 015	0, 031	0, 157	0, 419					
		-143, 61	F	1, 5243	-0, 089	-0, 049	0, 042	0, 231	0, 571					
-30, 0	-0, 128	-0, 103	-0, 002	-0, 286	-0, 231	-0, 006	-0, 505	-0, 410	-0, 014					
		-0, 091	-0, 002	-0, 205	-0, 204	-0, 006	-0, 361	-0, 363	-0, 015					

-38,0	-0,056	-0,079	-0,002	-0,124	-0,178	-0,006	-0,216	-0,315	-0,015
-42,0	-0,020	-0,067	-0,002	-0,044	-0,151	-0,006	-0,071	-0,267	-0,015
-46,0	0,015	-0,055	-0,002	0,037	-0,124	-0,006	0,074	-0,219	-0,015
5,86	196,78	167,28 48,87 -147,80	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,201 0,018 -0,036	0,235 0,066 0,036	0,320 0,161 0,181	0,490 0,354 0,439	0,816 0,708 0,869
-30,0	-0,134	-0,105	-0,002	-0,300	-0,236	-0,006	-0,529	-0,418	-0,014
-34,0	-0,098	-0,093	-0,002	-0,219	-0,209	-0,006	-0,386	-0,371	-0,015
-38,0	-0,063	-0,081	-0,002	-0,139	-0,183	-0,006	-0,242	-0,324	-0,015
-42,0	-0,027	-0,070	-0,002	-0,059	-0,156	-0,006	-0,098	-0,276	-0,016
-46,0	0,008	-0,058	-0,002	0,022	-0,129	-0,006	0,047	-0,228	-0,016
5,90	196,61	161,86 48,38 -152,24	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,247 0,064 0,000	0,311 0,143 0,114	0,448 0,292 0,313	0,681 0,552 0,637	1,096 0,991 1,157
-30,0	-0,140	-0,107	-0,002	-0,313	-0,240	-0,006	-0,554	-0,427	-0,014
-34,0	-0,105	-0,095	-0,002	-0,234	-0,214	-0,006	-0,412	-0,380	-0,015
-38,0	-0,069	-0,084	-0,002	-0,154	-0,188	-0,006	-0,269	-0,332	-0,016
-42,0	-0,034	-0,072	-0,002	-0,074	-0,161	-0,007	-0,125	-0,285	-0,016
-46,0	0,001	-0,060	-0,002	0,006	-0,134	-0,007	0,020	-0,237	-0,016
5,94	196,44	156,79 47,90 -156,98	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,286 0,099 0,042	0,392 0,218 0,192	0,571 0,420 0,441	0,873 0,745 0,831	1,366 1,262 1,343
-30,0	-0,146	-0,109	-0,002	-0,327	-0,245	-0,006	-0,579	-0,435	-0,014
-34,0	-0,111	-0,098	-0,002	-0,249	-0,219	-0,006	-0,438	-0,388	-0,015
-38,0	-0,076	-0,086	-0,002	-0,170	-0,193	-0,007	-0,296	-0,342	-0,016
-42,0	-0,041	-0,074	-0,002	-0,090	-0,166	-0,007	-0,153	-0,294	-0,016
-46,0	-0,006	-0,062	-0,002	-0,009	-0,140	-0,007	-0,009	-0,247	-0,016

$$f' = 200, 0; \quad \nu_2 = 39, 1; \quad \nu_3 = 64, 1; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = 9, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20	
5, 46	196, 36	158, 55 51, 65 -160, 47	C	1, 6373	-0, 004	-0, 052	-0, 085	-0, 081	-0, 012	
			D	1, 5163	-0, 062	-0, 100	-0, 121	-0, 105	0, 004	
			F	1, 5139	0, 127	0, 141	0, 163	0, 232	0, 406	
β = 2°					β = 3°					
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	
-50, 0	-0, 025	-0, 068	-0, 002	-0, 053	-0, 153	-0, 007	-0, 087	-0, 271	-0, 018	
-54, 0	0, 005	-0, 058	-0, 002	0, 014	-0, 131	-0, 007	0, 034	-0, 231	-0, 018	
-58, 0	0, 034	-0, 049	-0, 002	0, 081	-0, 109	-0, 007	0, 154	-0, 191	-0, 018	
-62, 0	0, 063	-0, 039	-0, 002	0, 148	-0, 087	-0, 007	0, 276	-0, 152	-0, 017	
-66, 0	0, 093	-0, 029	-0, 002	0, 214	-0, 065	-0, 007	0, 396	-0, 113	-0, 017	
5, 50	196, 19	153, 68	C	1, 6213	0, 031	0, 013	0, 020	0, 079	0, 223	
		51, 11	D	1, 6259	-0, 026	-0, 032	-0, 009	0, 065	0, 235	
		-165, 75	F	1, 5139	0, 184	0, 208	0, 258	0, 408	0, 666	
-50, 0 -54, 0 -58, 0 -62, 0 -66, 0	-0, 033 -0, 003 0, 026 0, 056 0, 086	-0, 071 -0, 061 -0, 052 -0, 042 -0, 032	-0, 002 -0, 002 -0, 002 -0, 002 -0, 002	-0, 070 -0, 004 0, 063 0, 130 0, 198	-0, 159	-0, 008	-0, 118	-0, 281	-0, 018	
					-0, 137	-0, 008	0, 003	-0, 241	-0, 018	
					-0, 115	-0, 008	0, 124	-0, 202	-0, 018	
					-0, 093	-0, 008	0, 245	-0, 162	-0, 018	
					-0, 070	-0, 007	0, 366	-0, 123	-0, 017	
5, 54	196, 02	149, 10	C	1, 6213	0, 069	0, 086	0, 140	0, 243	0, 457	
		50, 58	D	1, 6259	0, 008	0, 033	0, 100	0, 231	0, 470	
		-171, 40	F	1, 5139	0, 218	0, 274	0, 372	0, 568	0, 890	
-50, 0 -54, 0	-0, 038 -0, 011	-0, 074 -0, 064	-0, 002 -0, 002	-0, 088 -0, 022	-0, 165	-0, 008	-0, 149	-0, 292	-0, 018	
					-0, 143	-0, 008	-0, 030	-0, 253	-0, 018	

-58,0	0,018	-0,054	-0,002	0,045	-0,121	-0,008	0,092	-0,212	-0,018
-62,0	0,048	-0,044	-0,002	0,111	-0,100	-0,008	0,213	-0,173	-0,018
-66,0	0,077	-0,034	-0,002	0,180	-0,076	-0,008	0,335	-0,133	-0,018
5,58	195,85	144,78 50,06 -177,46	C 1,6213 D 1,6259 F 1,5139	1,6373 1,5163 1,5220	0,094 0,042 0,247	0,140 0,096 0,340	0,224 0,202 0,490	0,394 0,415 0,725	0,671 0,695 1,111
-50,0	-0,049	-0,077	-0,002	-0,106	-0,171	-0,008	-0,182	-0,302	-0,019
-54,0	-0,019	-0,066	-0,002	-0,040	-0,149	-0,008	-0,062	-0,263	-0,019
-58,0	0,010	-0,057	-0,002	0,027	-0,127	-0,008	0,058	-0,223	-0,019
-62,0	0,039	-0,047	-0,002	0,094	-0,105	-0,008	0,180	-0,184	-0,019
-66,0	0,068	-0,038	-0,002	0,161	-0,083	-0,008	0,302	-0,144	-0,018
5,62	195,68	140,71 49,54 -183,97	C 1,6213 D 1,6259 F 1,5139	1,6373 1,5163 1,5220	0,132 0,070 0,285	0,506 0,155 0,410	0,337 0,301 0,588	0,548 0,536 0,882	0,885 0,913 1,334
-50,0	-0,057	-0,079	-0,002	-0,125	-0,177	-0,008	-0,215	-0,313	-0,019
-54,0	-0,028	-0,069	-0,002	-0,059	-0,155	-0,008	-0,096	-0,274	-0,019
-58,0	0,001	-0,060	-0,002	0,007	-0,133	-0,008	0,024	-0,235	-0,019
-62,0	0,031	-0,050	-0,002	0,074	-0,111	-0,008	0,146	-0,195	-0,019
-66,0	0,060	-0,040	-0,002	0,141	-0,090	-0,008	0,268	-0,155	-0,019
5,66	195,51	136,86 49,04 -191,00	C 1,6213 D 1,6259 F 1,5139	1,6373 1,5163 1,5220	0,159 0,104 0,316	0,269 0,215 0,460	0,428 0,398 0,689	0,701 0,682 1,023	1,089 1,118 1,537
-50,0	-0,066	-0,083	-0,003	-0,144	-0,184	-0,008	-0,249	-0,325	-0,019
-54,0	-0,037	-0,073	-0,002	-0,079	-0,163	-0,008	-0,131	-0,286	-0,019
-58,0	-0,007	-0,063	-0,002	-0,013	-0,141	-0,008	-0,011	-0,246	-0,020
-62,0	0,022	-0,053	-0,002	0,054	-0,118	-0,008	0,110	-0,207	-0,020
-66,0	0,051	-0,043	-0,002	0,122	-0,096	-0,008	0,233	-0,167	-0,019

$f' = 200, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = 0, 0000$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -58$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					β = 4°					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20	
5, 36	196, 18	154, 84 52, 32 -166, 77	C	1, 5139	0, 011	-0, 042	-0, 096	-0, 120	-0, 087	
			D	1, 5163	-0, 072	-0, 122	-0, 164	-0, 116		
			F	1, 5220	0, 062	0, 040	0, 035	0, 207		
β = 2°										
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	
5, 40	196, 01	150, 18 51, 76 -172, 49	C	1, 5139	0, 050	0, 020	0, 005	0, 035	0, 137	
			D	1, 5163	-0, 041	-0, 055	-0, 008	0, 116		
			F	1, 5220	0, 097	0, 108	0, 147	0, 242	0, 435	
-50, 0 -54, 0 -58, 0 -62, 0 -66, 0	-0, 048 -0, 021 0, 008 0, 035 0, 062	-0, 076 -0, 067 -0, 057 -0, 048 -0, 039	-0, 002	-0, 105	-0, 170	-0, 004	-0, 180	-0, 301	-0, 018	h = ±17 0, 338
			-0, 002	-0, 042	-0, 149	-0, 004	-0, 066	-0, 263	-0, 019	
			-0, 002	0, 021	-0, 128	-0, 04	0, 046	-0, 227	-0, 019	
			-0, 002	0, 084	-0, 108	-0, 004	0, 160	-0, 190	-0, 018	h = ±11 0, 130
	0, 062	-0, 039	-0, 002	0, 146	-0, 087	-0, 004	0, 273	-0, 153	-0, 018	
5, 44	195, 84	145, 80 51, 22 -178, 63	C	1, 5139	0, 069	0, 076	0, 099	0, 183	0, 348	
			D	1, 5163	-0, 005	0, 004	0, 045	0, 140	0, 336	
			F	1, 5220	0, 130	0, 155	0, 231	0, 370	0, 655	
-50, 0 -54, 0	-0, 064 -0, 036	-0, 081 -0, 072	-0, 002	-0, 141	-0, 182	-0, 004	-0, 244	-0, 322	-0, 019	h = ±17 0, 338
			-0, 002	-0, 079	-0, 161	-0, 004	-0, 132	-0, 285	-0, 019	

-58,0	0,001	-0,063	-0,002	-0,006	-0,141	-0,004	-0,019	-0,248	-0,020	$h=\pm 11$ 0,130
-62,0	0,018	-0,054	-0,002	0,046	-0,120	-0,004	0,094	-0,211	-0,020	
-66,0	0,046	-0,045	-0,002	0,109	-0,099	-0,004	0,208	-0,174	-0,019	
5,48	195,67	141,67 50,68 -185,24	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,111 0,021 0,158	0,138 0,064 0,232	0,204 0,144 0,346	0,327 0,292 0,547	0,559 0,546 0,902	
-50,0	-0,073	-0,085	-0,003	-0,160	-0,188	-0,004	-0,278	-0,333	-0,019	$h=\pm 17$ 0,339
-54,0	-0,045	-0,075	-0,002	-0,098	-0,168	-0,004	-0,166	-0,296	-0,020	
-58,0	-0,018	-0,066	-0,002	-0,036	-0,147	-0,004	-0,059	-0,260	-0,020	
-62,0	0,010	-0,057	-0,002	0,026	-0,127	-0,004	0,059	-0,223	-0,020	$h=\pm 11$ 0,129
-66,0	0,037	-0,048	-0,002	0,088	-0,107	-0,004	0,173	-0,186	-0,020	
5,52	195,50	137,77 50,16 -192,36	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,140 0,062 0,186	0,197 0,122 0,290	0,300 0,237 0,454	0,473 0,432 0,725	0,765 0,751 1,073	
-50,0	-0,081	-0,087	-0,002	-0,179	-0,195	-0,004	-0,312	-0,345	-0,020	$h=\pm 17$ 0,339
-54,0	-0,054	-0,078	-0,002	-0,118	-0,174	-0,004	-0,201	-0,308	-0,020	
-58,0	-0,027	-0,069	-0,002	-0,056	-0,154	-0,004	-0,089	-0,272	-0,020	
-62,0	0,000	-0,060	-0,003	0,006	-0,133	-0,004	0,023	-0,235	-0,020	$h=\pm 11$ 0,129
-66,0	0,027	-0,051	-0,002	0,069	-0,113	-0,004	0,137	-0,198	-0,020	
5,56	195,33	134,08 49,64 -200,07	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,167 0,086 0,236	0,248 0,177 0,340	0,390 0,328 0,528	0,606 0,569 0,827	0,959 0,944 1,288	
-50,0	-0,090	-0,090	-0,002	-0,199	-0,201	-0,004	-0,347	-0,356	-0,020	$h=\pm 17$ 0,339
-54,0	-0,063	-0,081	-0,003	-0,138	-0,181	-0,004	-0,237	-0,320	-0,020	
-58,0	-0,036	-0,072	-0,003	-0,077	-0,161	-0,004	-0,126	-0,284	-0,021	
-62,0	-0,009	-0,063	-0,003	-0,015	-0,140	-0,004	-0,014	-0,247	-0,021	$h=\pm 11$ 0,129
-66,0	0,018	-0,054	-0,003	0,048	-0,120	-0,004	0,098	-0,211	-0,021	

$f' = 200, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -58$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = 20
					β = 3°						
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20		
5, 26	196, 00	151, 29	C	1, 6213	1, 5139	0, 024	-0, 044	-0, 114	-0, 161	-0, 166	
		53, 01	D	1, 6259	1, 5163	-0, 080	-0, 144	-0, 197	-0, 235	-0, 214	
		-173, 60	F	1, 6373	1, 5220	-0, 025	-0, 057	-0, 082	-0, 068	0, 012	
β = 2°											
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	β = 4°	
-50, 0	-0, 070	-0, 083	-0, 002	-0, 156	-0, 186	-0, 008	-0, 271	-0, 330	-0, 019	h = ±17	0, 314
-54, 0	-0, 044	-0, 074	-0, 002	-0, 097	-0, 167	-0, 008	-0, 165	-0, 295	-0, 020	h = ±11	0, 121
-58, 0	-0, 018	-0, 066	-0, 002	-0, 038	-0, 148	-0, 008	-0, 059	-0, 260	-0, 020		
-62, 0	0, 007	-0, 057	-0, 002	0, 020	-0, 128	-0, 008	0, 046	-0, 226	-0, 020		
-66, 0	0, 033	-0, 049	-0, 002	0, 078	-0, 109	-0, 008	0, 152	-0, 191	-0, 020		
5, 30	195, 83	146, 84	C	1, 6213	1, 5139	0, 054	0, 017	0, 008	0, 056		
		52, 44	D	1, 6259	1, 5163	-0, 048	-0, 081	-0, 098	-0, 085	0, 000	
		-179, 82	F	1, 6373	1, 5220	0, 005	0, 002	0, 026	0, 080	0, 216	
-50, 0	-0, 078	-0, 086	-0, 002	-0, 174	-0, 193	-0, 008	-0, 304	-0, 341	-0, 020	h = ±17	0, 328
-54, 0	-0, 053	-0, 077	-0, 002	-0, 116	-0, 173	-0, 008	-0, 199	-0, 306	-0, 020	h = ±11	0, 121
-58, 0	-0, 027	-0, 069	-0, 002	-0, 058	-0, 154	-0, 008	-0, 093	-0, 272	-0, 020		
-62, 0	-0, 002	-0, 060	-0, 002	0, 001	-0, 135	-0, 008	0, 012	-0, 237	-0, 020		
-66, 0	0, 024	-0, 052	-0, 002	0, 059	-0, 116	-0, 008	0, 117	-0, 203	-0, 020		
5, 34	195, 66	142, 65	C	1, 6213	1, 5139	0, 086	0, 075	0, 088	0, 136	0, 248	
		51, 88	D	1, 6259	1, 5163	-0, 020	-0, 026	-0, 004	0, 061	0, 199	
		-186, 52	F	1, 6373	1, 5220	0, 047	0, 066	0, 111	0, 227	0, 434	
-50, 0	-0, 087	-0, 089	-0, 002	-0, 193	-0, 199	-0, 008	-0, 338	-0, 352	-0, 020	h = ±17	0, 342
-54, 0	-0, 062	-0, 080	-0, 002	-0, 135	-0, 180	-0, 008	-0, 233	-0, 318	-0, 020		



-58,0	-0,036	-0,072	-0,002	-0,077	-0,160	-0,009	-0,128	-0,284	-0,020	$h=\pm 11$ 0,120
-62,0	-0,010	-0,063	-0,002	-0,019	-0,141	-0,009	-0,024	-0,249	-0,021	
-66,0	0,015	-0,055	-0,002	0,039	-0,122	-0,009	0,082	-0,215	-0,021	
5,38	195,49	138,70 51,33 -193,74	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,123 0,011 0,067	0,131 0,030 0,118	0,176 0,089 0,211	0,272 0,194 0,370	0,453 0,400 0,634	
-50,0	-0,096	-0,092	-0,002	-0,213	-0,206	-0,008	-0,372	-0,364	-0,020	$h=\pm 17$ 0,356
-54,0	-0,070	-0,083	-0,002	-0,155	-0,186	-0,009	-0,269	-0,330	-0,021	
-58,0	-0,045	-0,075	-0,003	-0,098	-0,167	-0,009	-0,165	-0,296	-0,021	
-62,0	-0,020	-0,066	-0,003	-0,040	-0,148	-0,009	-0,060	-0,261	-0,021	$h=\pm 11$ 0,120
-66,0	0,006	-0,058	-0,003	0,018	-0,129	-0,009	0,045	-0,227	-0,021	
5,42	195,32	134,95 50,79 -201,57	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,149 0,032 0,092	0,185 0,085 0,171	0,259 0,171 0,298	0,400 0,325 0,505	0,630 0,584 0,825	
-50,0	-0,105	-0,094	-0,002	-0,233	-0,212	-0,009	-0,408	-0,376	-0,020	$h=\pm 17$ 0,370
-54,0	-0,080	-0,086	-0,003	-0,176	-0,193	-0,009	-0,305	-0,342	-0,021	
-58,0	-0,054	-0,078	-0,003	-0,119	-0,174	-0,009	-0,202	-0,308	-0,021	
-62,0	-0,029	-0,069	-0,003	-0,061	-0,155	-0,009	-0,098	-0,274	-0,022	$h=\pm 11$ 0,119
-66,0	-0,004	-0,061	-0,003	-0,004	-0,136	-0,009	0,007	-0,240	-0,022	
5,46	195,13	131,41 50,26 -210,06	C D F 1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,176 0,062 0,121	0,235 0,135 0,223	0,348 0,256 0,383	0,525 0,456 0,633	0,818 0,767 1,006	
-50,0	-0,114	-0,098	-0,003	-0,253	-0,219	-0,009	-0,444	-0,388	-0,021	$h=\pm 17$ 0,385
-54,0	-0,089	-0,089	-0,003	-0,197	-0,200	-0,009	-0,342	-0,354	-0,021	
-58,0	-0,064	-0,081	-0,003	-0,140	-0,182	-0,009	-0,240	-0,321	-0,022	
-62,0	-0,039	-0,073	-0,003	-0,083	-0,163	-0,009	-0,137	-0,287	-0,022	$h=\pm 11$ 0,119
-66,0	-0,014	-0,064	-0,003	-0,026	-0,144	-0,009	-0,033	-0,253	-0,022	

$f' = 200, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = -0, 0010$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -58$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'											
					β = 3°											
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20							
5, 16	195, 82	147, 90 53, 72 -181, 03	C	1, 5139	0, 038	-0, 039	-0, 122	-0, 194	-0, 230	h = ±17 0, 290						
			D	1, 5163	-0, 093	-0, 162	-0, 235	-0, 295	-0, 312							
			F	1, 5220	-0, 107	-0, 145	-0, 185	-0, 210	-0, 167							
β = 4°																
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	h = ±11 0, 112						
5, 20	195, 65	143, 65 53, 13 -187, 82	C	1, 5139	0, 076	0, 027	-0, 020	-0, 047	-0, 028	h = ±11 0, 112						
			D	1, 5163	-0, 063	-0, 108	-0, 145	-0, 157	-0, 115							
			F	1, 5220	-0, 075	-0, 101	-0, 105	-0, 072	0, 022							
-50, 0 -54, 0 -58, 0 -62, 0 -66, 0	-0, 101 -0, 077 -0, 053 -0, 030 -0, 006	-0, 093 -0, 085 -0, 077 -0, 063 -0, 062	-0, 002	-0, 225	-0, 209	-0, 008	-0, 395	-0, 370	-0, 020	h = ±17 0, 289						
			-0, 003	-0, 171	-0, 191	-0, 009	-0, 298	-0, 338	-0, 021							
			-0, 003	-0, 117	-0, 173	-0, 009	-0, 200	-0, 306	-0, 021							
			-0, 003	-0, 063	-0, 155	-0, 009	-0, 102	-0, 274	-0, 021							
			-0, 003	-0, 009	-0, 138	-0, 009	-0, 005	-0, 242	-0, 021	h = ±11 0, 111						
5, 24	195, 48	139, 64 52, 55 -195, 15	C	1, 5139	0, 101	0, 078	0, 064	0, 084	0, 160	h = ±17 0, 287						
			D	1, 5163	-0, 035	-0, 051	-0, 053	-0, 025	0, 078							
			F	1, 5220	-0, 043	-0, 049	-0, 014	0, 067	0, 222							
-50, 0 -54, 0	-0, 110 -0, 086	-0, 096 -0, 088	-0, 002	-0, 245	-0, 216	-0, 009	-0, 430	-0, 382	-0, 021	h = ±17 0, 287						
			-0, 003	-0, 191	-0, 198	-0, 009	-0, 333	-0, 350	-0, 021							

-58,0	-0,063	-0,030	-0,003	-0,138	-0,180	-0,009	-0,237	-0,318	-0,022	$h=\pm 11$ 0,110
-62,0	-0,039	-0,072	-0,003	-0,084	-0,162	-0,009	-0,140	-0,287	-0,022	
-66,0	-0,016	-0,065	-0,003	-0,030	-0,145	-0,009	-0,042	-0,255	-0,022	
5,28	195,31	135,84	C	1,5139	0,132	0,128	0,149	0,209	0,339	
		51,99	D	1,5163	-0,010	0,001	0,038	0,102	0,259	
		-203,09	F	1,5220	-0,023	-0,001	0,070	0,194	0,409	
-50,0	-0,119	-0,099	-0,003	-0,265	-0,224	-0,009	-0,466	-0,394	-0,021	$h=\pm 17$ 0,286
-54,0	-0,096	-0,092	-0,003	-0,212	-0,205	-0,009	-0,370	-0,363	-0,022	
-58,0	-0,072	-0,084	-0,003	-0,159	-0,187	-0,009	-0,274	-0,331	-0,022	
-62,0	-0,049	-0,076	-0,003	-0,106	-0,170	-0,009	-0,178	-0,300	-0,022	$h=\pm 11$ 0,109
-66,0	-0,025	-0,068	-0,003	-0,052	-0,152	-0,009	-0,081	-0,268	-0,022	
5,32	195,14	132,25	C	1,5139	0,153	0,173	0,224	0,324	0,511	
		51,44	D	1,5163	0,020	0,047	0,109	0,226	0,431	
		-211,72	F	1,5220	0,011	0,057	0,161	0,318	0,581	
-50,0	-0,128	-0,102	-0,003	-0,286	-0,229	-0,009	-0,502	-0,406	-0,021	$h=\pm 17$ 0,285
-54,0	-0,105	-0,094	-0,003	-0,233	-0,212	-0,009	-0,409	-0,376	-0,023	
-58,0	-0,083	-0,088	-0,003	-0,181	-0,194	-0,009	-0,313	-0,344	-0,022	
-62,0	-0,059	-0,079	-0,003	-0,128	-0,177	-0,010	-0,218	-0,313	-0,023	$h=\pm 11$ 0,108
-66,0	-0,035	-0,071	-0,003	-0,076	-0,160	-0,010	-0,122	-0,281	-0,023	
5,36	194,97	128,84	C	1,5139	0,183	0,223	0,305	0,449	-0,683	
		50,90	D	1,5163	0,042	0,095	0,188	0,345	-0,597	
		-221,13	F	1,5220	0,020	0,103	0,233	0,437	-0,750	
-50,0	-0,138	-0,105	-0,003	-0,307	-0,236	-0,009	-0,540	-0,419	-0,022	$h=\pm 17$ 0,283
-54,0	-0,115	-0,098	-0,003	-0,255	-0,219	-0,009	-0,447	-0,388	-0,022	
-58,0	-0,092	-0,090	-0,003	-0,203	-0,202	-0,010	-0,353	-0,357	-0,023	
-62,0	-0,069	-0,082	-0,003	-0,151	-0,185	-0,010	-0,259	-0,326	-0,023	$h=\pm 11$ 0,108
-66,0	-0,046	-0,075	-0,003	-0,099	-0,167	-0,010	-0,295	-0,163	-0,021	

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20	
5, 06	195, 64	144, 66	C	1, 5139	0, 069	-0, 022	-0, 120	-0, 220	-0, 284	
		54, 44	D	1, 5163	-0, 102	-0, 186	-0, 273	-0, 358	-0, 411	
		-189, 13	F	1, 5220	-0, 195	-0, 255	-0, 317	-0, 360	-0, 362	
β = 2°										
β = 3°										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	β = 4°
-50, 0	-0, 115	-0, 098	-0, 002	-0, 256	-0, 219	-0, 009	-0, 450	-0, 388	-0, 021	
-54, 0	-0, 092	-0, 090	-0, 003	-0, 205	-0, 202	-0, 009	-0, 359	-0, 358	-0, 021	
-58, 0	-0, 070	-0, 083	-0, 003	-0, 155	-0, 185	-0, 009	-0, 268	-0, 328	-0, 022	
-62, 0	-0, 048	-0, 075	-0, 003	-0, 105	-0, 169	-0, 009	-0, 178	-0, 298	-0, 022	
-66, 0	-0, 026	-0, 068	-0, 003	-0, 055	-0, 152	-0, 009	-0, 088	-0, 269	-0, 022	
5, 10	195, 47	140, 59	C	1, 5139	0, 094	0, 029	-0, 038	-0, 093	-0, 102	
		53, 84	D	1, 5163	-0, 067	-0, 131	-0, 189	-0, 225	-0, 224	
		-196, 57	F	1, 5220	-0, 166	-0, 198	-0, 229	-0, 230	-0, 175	
-50, 0	-0, 124	-0, 100	-0, 003	-0, 276	-0, 226	-0, 009	-0, 485	-0, 400	-0, 021	
		-0, 093	-0, 003	-0, 226	-0, 209	-0, 009	-0, 395	-0, 370	-0, 022	
		-0, 086	-0, 003	-0, 176	-0, 192	-0, 009	-0, 305	-0, 340	-0, 022	
		-0, 078	-0, 003	-0, 126	-0, 176	-0, 010	-0, 216	-0, 311	-0, 023	
		-0, 071	-0, 003	-0, 076	-0, 160	-0, 010	-0, 126	-0, 282	-0, 023	
5, 14	195, 31	136, 74	C	1, 5139	0, 115	0, 071	0, 037	0, 024	0, 064	
		53, 25	D	1, 5163	-0, 054	-0, 089	-0, 116	-0, 099	-0, 054	
		-204, 63	F	1, 5220	-0, 148	-0, 157	-0, 150	-0, 104	0, 000	
-50, 0	-0, 140	-0, 111	-0, 002	-0, 304	-0, 240	-0, 009	-0, 529	-0, 420	-0, 021	
		-0, 119	-0, 002	-0, 255	-0, 224	-0, 009	-0, 440	-0, 390	-0, 022	

-58,0	-0,097	-0,097	-0,097	-0,003	-0,205	-0,207	-0,009	-0,351	-0,361	-0,022
-62,0	-0,075	-0,090	-0,090	-0,003	-0,156	-0,191	-0,009	-0,262	-0,332	-0,023
-66,0	-0,054	-0,082	-0,082	-0,003	-0,107	-0,175	-0,010	-0,173	-0,302	-0,023
5,18	195,13	133,10 52,67 -213,40	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,142 -0,024 -0,118	0,126 -0,034 -0,103	0,126 -0,023 -0,065	0,150 0,014 0,016	0,234 0,120 0,173
-50,0	-0,142	-0,106	-0,003	-0,003	-0,317	-0,239	-0,009	-0,558	-0,424	-0,022
-54,0	-0,120	-0,099	-0,003	-0,003	-0,268	-0,223	-0,009	-0,471	-0,395	-0,022
-58,0	-0,099	-0,092	-0,003	-0,003	-0,220	-0,207	-0,010	-0,383	-0,366	-0,023
-62,0	-0,077	-0,085	-0,003	-0,003	-0,172	-0,192	-0,010	-0,295	-0,337	-0,024
-66,0	-0,057	-0,079	-0,003	-0,003	-0,122	-0,175	-0,010	-0,207	-0,309	-0,024
5,22	194,96	129,65 52,10 -222,97	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,168 0,002 -0,094	0,172 0,011 -0,055	0,200 0,040 0,012	0,265 0,126 0,134	0,401 0,282 0,340
-50,0	-0,151	-0,110	-0,003	-0,003	-0,338	-0,246	-0,009	-0,596	-0,436	-0,022
-54,0	-0,130	-0,103	-0,003	-0,003	-0,290	-0,230	-0,010	-0,510	-0,408	-0,023
-58,0	-0,109	-0,096	-0,003	-0,003	-0,242	-0,214	-0,010	-0,423	-0,380	-0,024
-62,0	-0,088	-0,088	-0,003	-0,003	-0,194	-0,198	-0,010	-0,336	-0,351	-0,024
-66,0	-0,067	-0,082	-0,003	-0,003	-0,146	-0,183	-0,010	-0,249	-0,322	-0,024
5,26	194,79	126,37 51,55 -233,46	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,190 0,022 -0,069	0,212 0,052 -0,013	0,270 0,121 0,084	0,374 0,237 0,240	0,551 0,445 0,495
-50,0	-0,161	-0,113	-0,003	-0,003	-0,360	-0,253	-0,009	-0,634	-0,449	-0,022
-54,0	-0,140	-0,106	-0,003	-0,003	-0,313	-0,238	-0,010	-0,550	-0,421	-0,023
-58,0	-0,120	-0,100	-0,003	-0,003	-0,266	-0,222	-0,010	-0,464	-0,393	-0,024
-62,0	-0,098	-0,092	-0,003	-0,003	-0,218	-0,206	-0,010	-0,379	-0,365	-0,024
-66,0	-0,078	-0,085	-0,003	-0,003	-0,171	-0,192	-0,010	-0,292	-0,337	-0,025

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
4, 97	195, 56	139, 60	C 1, 6421	1, 5155	0, 005	-0, 063	-0, 128	-0, 179	-0, 193
		55, 40	D 1, 6475	1, 5181	-0, 072	-0, 125	-0, 171	-0, 209	-0, 203
		-189, 18	F 1, 6612	1, 5243	0, 137	0, 113	0, 097	0, 105	0, 180
β = 2°					β = 3°				
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-70, 0	0, 012	-0, 056	-0, 003	0, 032	-0, 125	-0, 009	0, 069	-0, 220	-0, 016
-76, 0	0, 046	-0, 015	-0, 003	0, 110	-0, 100	-0, 009	0, 212	-0, 173	-0, 016
-82, 0	0, 081	-0, 033	-0, 003	0, 189	-0, 074	-0, 009	0, 356	-0, 127	-0, 016
-88, 0	0, 115	-0, 022	-0, 002	0, 268	-0, 048	-0, 008	0, 500	-0, 080	-0, 015
-94, 0	0, 140	-0, 019	-0, 002	0, 346	-0, 022	-0, 008	0, 645	-0, 034	-0, 014
5, 03	195, 30	133, 99	C 1, 6421	1, 5155	0, 056	0, 010	0, 000	0, 016	0, 084
		54, 47	D 1, 6475	1, 5181	-0, 031	-0, 045	-0, 047	-0, 015	0, 074
		-200, 57	F 1, 6612	1, 5243	0, 182	0, 190	0, 226	0, 308	0, 466
-70, 0	-0, 003	-0, 061	-0, 003	-0, 001	-0, 136	-0, 009	0, 010	-0, 240	-0, 017
-76, 0	0, 032	-0, 050	-0, 003	0, 078	-0, 110	-0, 009	0, 154	-0, 193	-0, 017
-82, 0	0, 066	-0, 038	-0, 003	0, 157	-0, 084	-0, 009	0, 298	-0, 147	-0, 016
-88, 0	0, 100	-0, 027	-0, 003	0, 236	-0, 058	-0, 009	0, 444	-0, 099	-0, 016
-94, 0	0, 135	-0, 016	-0, 002	0, 307	-0, 041	-0, 009	0, 591	-0, 052	-0, 015
5, 09	195, 06	128, 81	C 1, 6421	1, 5155	0, 065	0, 077	0, 112	0, 193	0, 332
		53, 56	D 1, 6475	1, 5181	-0, 003	0, 019	0, 064	0, 156	0, 342
		-213, 46	F 1, 6612	1, 5243	0, 208	0, 258	0, 338	0, 490	0, 718
-70, 0	-0, 028	-0, 076	-0, 003	-0, 045	-0, 157	-0, 010	-0, 060	-0, 269	-0, 017
-76, 0	0, 007	-0, 064	-0, 003	0, 033	-0, 131	-0, 010	0, 083	-0, 223	-0, 017

-82,0	0,040	-0,054	-0,003	0,112	-0,105	-0,009	0,228	-0,176	-0,017
-88,0	0,076	-0,041	-0,003	0,192	-0,079	-0,009	0,374	-0,129	-0,017
-94,0	0,101	-0,039	-0,002	0,263	-0,062	-0,009	0,513	-0,090	-0,016
5,15	194,79	124,02 52,69 -228,16	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,115 0,043 0,256	0,152 0,096 0,330	0,229 0,196 0,464	0,365 0,336 0,669	0,582 0,574 0,988
-70,0	-0,034	-0,072	-0,003	-0,073	-0,160	-0,010	-0,116	-0,282	-0,018
-76,0	-0,001	-0,060	-0,003	0,005	-0,134	-0,010	0,025	-0,236	-0,018
-82,0	0,031	-0,049	-0,003	0,084	-0,108	-0,010	0,170	-0,189	-0,018
-88,0	0,068	-0,038	-0,003	0,153	-0,093	-0,010	0,317	-0,141	-0,017
-94,0	0,103	-0,026	-0,003	0,243	-0,057	-0,010	0,455	-0,104	-0,017
5,21	194,51	119,57 51,84 -245,09	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,132 0,078 0,283	0,204 0,169 0,397	0,318 0,288 0,573	0,499 0,494 0,826	0,785 0,813 1,209
-70,0	-0,052	-0,077	-0,003	-0,111	-0,173	-0,011	-0,184	-0,304	-0,019
-76,0	-0,018	-0,066	-0,003	-0,034	-0,147	-0,011	-0,044	-0,259	-0,019
-82,0	0,016	-0,055	-0,003	0,043	-0,123	-0,011	0,099	-0,212	-0,019
-88,0	0,050	-0,044	-0,003	0,123	-0,096	-0,011	0,245	-0,166	-0,019
-94,0	0,085	-0,032	-0,003	0,203	-0,070	-0,010	0,394	-0,118	-0,018
5,27	194,28	115,43 51,02 -264,78	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,167 0,107 0,302	0,263 0,214 0,446	0,421 0,381 0,658	0,653 0,636 0,981	0,996 1,006 1,407
-70,0	-0,070	-0,083	-0,003	-0,152	-0,186	-0,011	-0,256	-0,328	-0,020
-76,0	-0,037	-0,072	-0,003	-0,076	-0,161	-0,011	-0,118	-0,283	-0,020
-82,0	-0,015	-0,073	-0,003	0,001	-0,136	-0,011	0,023	-0,238	-0,020
-88,0	0,030	-0,050	-0,003	0,079	-0,111	-0,011	0,167	-0,191	-0,020
-94,0	0,065	-0,039	-0,003	0,159	-0,085	-0,011	0,315	-0,144	-0,020

$f' = 200,0$ ;  $v_s = 33,9$ ;  $v_g = 58,9$ ;  $d_1 = 3,0$ ;  $d_2 = 9,0$ ;  $c = 0,0000$ ; КОМА ДЛЯ  $\beta = 4^\circ$  И  $s = -82$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'					
					β = 3°					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 30	
4,90	195,38	136,62	C	1,5155	0,004	-0,050	-0,119	-0,179	-0,217	
		55,86	D	1,5181	-0,078	-0,137	-0,193	-0,243	-0,256	
		-197,93	F	1,5243	0,052	0,024	-0,005	0,008	0,044	
β = 2°										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	
-70,0	-0,016	-0,065	-0,003	-0,032	-0,146	-0,010	-0,045	-0,257	-0,023	h=±17 0,269
		-0,055	-0,003	0,041	-0,122	-0,010	0,088	-0,214	-0,023	
		-0,044	-0,003	0,114	-0,098	-0,010	0,221	-0,170	-0,023	
		-0,034	-0,003	0,187	-0,074	-0,009	0,355	-0,127	-0,022	
-82,0	0,079	-0,023	-0,003	0,260	-0,050	-0,009	0,488	-0,084	-0,021	h=±11 0,103
-94,0	0,110									
4,96	195,12	131,24	C	1,5155	0,056	0,023	-0,001	0,002	0,047	h=±17 0,269
		54,91	D	1,5181	-0,037	-0,059	-0,074	-0,058	0,008	
		-210,64	F	1,5243	0,100	0,100	0,125	0,178	0,305	
-70,0	-0,032	-0,070	-0,003	-0,066	-0,157	-0,010	-0,107	-0,278	-0,024	h=±17 0,269
		-0,060	-0,003	0,006	-0,133	-0,010	0,025	-0,235	-0,024	
		-0,050	-0,003	0,080	-0,109	-0,010	0,160	-0,191	-0,024	
		-0,039	-0,003	0,144	-0,095	-0,010	0,294	-0,148	-0,023	
-88,0	0,064	-0,028	-0,003	0,217	-0,071	-0,009	0,429	-0,104	-0,023	h=±11 0,103
-94,0	0,096									
5,02	194,87	126,27	C	1,5155	0,106	0,092	0,104	0,170	0,284	h=±17 0,269
		53,99	D	1,5181	-0,004	0,008	0,037	0,111	0,249	
		-224,73	F	1,5243	0,145	0,170	0,238	0,358	0,551	
-70,0	-0,048	-0,076	-0,003	-0,103	-0,170	-0,010	-0,171	-0,299	-0,025	h=±17 0,269
		-0,065	-0,003	-0,031	-0,146	-0,011	-0,040	-0,256	-0,025	
-76,0	-0,016									



-82,0	0,015	-0,055	-0,003	0,042	-0,122	-0,011	0,093	-0,213	-0,025	$h=\pm 11$ 0,102
-88,0	0,047	-0,044	-0,003	0,115	-0,098	-0,011	0,228	-0,170	-0,025	
-94,0	0,079	-0,034	-0,003	0,189	-0,074	-0,010	0,364	-0,126	-0,024	
5,08	194,61	121,66 53,11 -241,12	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,126 0,030 0,163	0,153 0,070 0,233	0,215 0,142 0,338	0,325 0,265 0,513	0,506 0,469 0,783	
-70,0	-0,065	-0,082	-0,003	-0,141	-0,182	-0,011	-0,240	-0,322	-0,026	$h=\pm 17$ 0,270
-76,0	-0,034	-0,071	-0,003	-0,070	-0,159	-0,011	-0,110	-0,280	-0,026	
-82,0	-0,002	-0,061	-0,003	0,002	-0,135	-0,011	0,022	-0,236	-0,026	
-88,0	0,029	-0,050	-0,003	0,075	-0,111	-0,011	0,146	-0,204	-0,026	$h=\pm 11$ 0,102
-94,0	0,061	-0,040	-0,003	0,138	-0,098	-0,011	0,292	-0,150	-0,026	
5,14	194,36	117,38 52,25 -260,14	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,155 0,059 0,191	0,214 0,126 0,286	0,305 0,235 0,434	0,466 0,405 0,660	0,705 0,687 0,985	
-70,0	-0,083	-0,088	-0,003	-0,182	-0,196	-0,011	-0,311	-0,345	-0,027	$h=\pm 17$ 0,270
-76,0	-0,054	-0,078	-0,003	-0,112	-0,173	-0,010	-0,184	-0,305	-0,027	
-82,0	-0,022	-0,067	-0,004	-0,041	-0,150	-0,012	-0,053	-0,262	-0,028	
-88,0	0,010	-0,057	-0,004	0,031	-0,126	-0,012	0,079	-0,219	-0,028	$h=\pm 11$ 0,101
-94,0	0,041	-0,046	-0,003	0,093	-0,114	-0,011	0,203	-0,187	-0,027	
5,20	194,10	113,38 51,41 -282,48	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,181 0,086 0,225	0,266 0,181 0,342	0,390 0,318 0,527	0,597 0,537 0,797	0,894 0,855 1,177	
-70,0	-0,102	-0,094	-0,003	-0,224	-0,210	-0,012	-0,386	-0,370	-0,028	$h=\pm 17$ 0,271
-76,0	-0,072	-0,084	-0,004	-0,156	-0,187	-0,012	-0,261	-0,330	-0,028	
-82,0	-0,042	-0,074	-0,004	-0,098	-0,176	-0,011	-0,134	-0,288	-0,029	
-88,0	-0,011	-0,064	-0,004	-0,016	-0,141	-0,012	-0,003	-0,246	-0,029	$h=\pm 11$ 0,101
-94,0	0,020	-0,054	-0,004	0,056	-0,118	-0,012	0,130	-0,204	-0,029	

$f' = 200,0$ ;  $v_2 = 33,9$ ;  $v_8 = 58,9$ ;  $d_1 = 3,0$ ;  $d_2 = 9,0$ ;  $c = -0,0005$ ;  $\alpha$  для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -82$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = 20
					β = 4°						
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20		
4,85	195,11	132,00 56,00 -211,96	C	1,5155	0,056	-0,006	-0,074	-0,120	-0,146		
			D	1,5181	-0,070	-0,121	-0,177	-0,210	-0,224		
			F	1,5243	-0,007	-0,042	-0,060	-0,058	-0,012		
β = 3°											
4,92	194,81	126,17 54,89 -229,06	C	1,5155	0,094	0,070	0,054	0,062	0,124		
			D	1,5181	-0,028	-0,044	-0,048	-0,026	0,043		
			F	1,5243	0,028	0,038	0,079	0,135	0,256		
-70,0 -76,0 -82,0 -88,0 -94,0	-0,070 -0,040 -0,011 0,018 0,047	-0,084 -0,073 -0,063 -0,054 -0,044	-0,003	-0,151	-0,185	-0,011	-0,257	-0,326	-0,026	h = ±17	
			-0,003	-0,084	-0,163	-0,011	-0,136	-0,287	-0,026	0,231	
			-0,003	-0,017	-0,141	-0,011	-0,015	-0,248	-0,026		
			-0,003	0,050	-0,119	-0,011	0,099	-0,218	-0,026	h = ±11	
-94,0	0,047	-0,044	-0,003	0,116	-0,097	-0,011	0,232	-0,168	-0,026	0,088	
4,99	194,52	120,83 53,89 -249,22	C	1,5155	0,127	0,136	0,169	0,233	0,355		
			D	1,5181	0,010	0,028	0,061	0,156	0,288		
			F	1,5243	0,054	0,103	0,187	0,309	0,515		
-70,0 -76,0	-0,089 -0,061	-0,089 -0,080	-0,003	-0,197	-0,200	-0,011	-0,339	-0,354	-0,027	h = ±17	
			-0,003	-0,131	-0,179	-0,012	-0,220	-0,315	-0,027	0,233	

-82,0	-0,032	-0,070	-0,003	-0,066	-0,157	-0,012	-0,101	-0,277	-0,028	$h=\pm 11$ 0,082
-88,0	-0,014	-0,062	-0,003	0,001	-0,126	-0,012	0,022	-0,237	-0,028	
-94,0	0,025	-0,052	-0,004	0,067	-0,114	-0,012	0,134	-0,208	-0,027	
5,06	194,22	115,93	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,160 0,039 0,114	0,201 0,088 0,170	0,272 0,179 0,284	0,384 0,298 0,463	0,583 0,514 0,736	
-70,0	-0,111	-0,097	-0,003	-0,245	-0,216	-0,012	-0,425	-0,382	-0,028	$h=\pm 17$ 0,214
-76,0	-0,083	-0,087	-0,004	-0,182	-0,196	-0,012	-0,309	-0,344	-0,029	
-82,0	-0,055	-0,078	-0,004	-0,118	-0,174	-0,012	-0,192	-0,306	-0,029	
-88,0	-0,027	-0,069	-0,004	-0,053	-0,153	-0,013	-0,084	-0,280	-0,030	$h=\pm 11$ 0,079
-94,0	-0,010	-0,071	-0,004	0,013	-0,132	-0,013	0,050	-0,229	-0,030	
5,13	193,92	111,41	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,191 0,069 0,124	0,253 0,142 0,238	0,357 0,257 0,393	0,527 0,426 0,610	0,776 0,708 0,943	
-70,0	-0,134	-0,104	-0,004	-0,296	-0,233	-0,012	-0,515	-0,412	-0,029	$h=\pm 17$ 0,210
-76,0	-0,107	-0,095	-0,004	-0,235	-0,213	-0,013	-0,404	-0,376	-0,029	
-82,0	-0,080	-0,086	-0,004	-0,173	-0,193	-0,013	-0,290	-0,339	-0,031	
-88,0	-0,053	-0,077	-0,004	-0,110	-0,172	-0,013	-0,173	-0,302	-0,032	$h=\pm 11$ 0,077
-94,0	-0,025	-0,068	-0,004	-0,046	-0,151	-0,013	-0,054	-0,264	-0,032	
5,20	193,62	107,23	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,201 0,093 0,137	0,288 0,187 0,258	0,426 0,340 0,444	0,628 0,560 0,715	0,943 0,883 1,122	
-70,0	-0,158	-0,113	-0,004	-0,350	-0,251	-0,013	-0,610	-0,444	-0,031	$h=\pm 17$ 0,206
-76,0	-0,132	-0,104	-0,004	-0,292	-0,232	-0,013	-0,504	-0,409	-0,032	
-82,0	-0,107	-0,095	-0,004	-0,232	-0,212	-0,014	-0,394	-0,374	-0,033	
-88,0	-0,080	-0,086	-0,004	-0,171	-0,193	-0,014	-0,282	-0,338	-0,033	$h=\pm 11$ 0,075
-94,0	-0,053	-0,078	-0,004	-0,109	-0,172	-0,015	-0,166	-0,301	-0,034	

$f' = 200,0$ ;  $\gamma_2 = 33,9$ ;  $\gamma_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 3,0$ ;  $d_2 = 9,0$ ;  $c = -0,0010$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -82$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						
					β = 3°						
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20		
4,80	194,85	127,68 56,15 -228,19	C	1,5155	0,088	0,030	-0,024	-0,086	-0,115		
			D	1,5181	-0,065	-0,111	-0,167	-0,205	-0,214		
			F	1,5243	-0,070	-0,109	-0,130	-0,129	-0,099		
4,87	194,55	122,22 55,03 -248,18	C	1,5155	0,119	0,096	0,073	0,079	0,130		
			D	1,5181	-0,029	-0,046	-0,052	-0,036	0,023		
			F	1,5243	-0,051	-0,042	-0,008	0,038	0,150		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10	C	1,5155	0,144	0,153	0,180	0,228	0,326		
			D	1,5181	-0,011	0,002	0,035	0,117	0,232		
			F	1,5243	-0,018	0,013	0,078	0,190	0,374		
4,94	194,26	117,20 53,96 -272,10</									

-82,0	-0,086	-0,096	-0,004	-0,173	-0,200	-0,012	-0,284	-0,344	-0,030	$h=\pm 11$ 0,082
-88,0	-0,060	-0,087	-0,004	-0,114	-0,181	-0,013	-0,175	-0,308	-0,030	
-94,0	-0,035	-0,079	-0,004	-0,055	-0,161	-0,013	-0,065	-0,273	-0,031	
5,01	193,95	112,58	C	1,6421	1,5155	0,179	0,214	0,282	0,366	0,526 0,434 0,580
		52,93	D	1,6475	1,5181	0,020	0,067	0,133	0,250	
		-301,22	F	1,6612	1,5243	0,010	0,073	0,174	0,335	
-70,0	-0,150	-0,110	-0,004	-0,330	-0,244	-0,013	-0,577	-0,432	-0,030	$h=\pm 17$ 0,214
-76,0	-0,124	-0,101	-0,004	-0,274	-0,226	-0,013	-0,475	-0,398	-0,031	
-82,0	-0,112	-0,105	-0,004	-0,218	-0,207	-0,014	-0,371	-0,365	-0,032	
-88,0	-0,075	-0,084	-0,004	-0,173	-0,201	-0,014	-0,266	-0,331	-0,033	$h=\pm 11$ 0,079
-94,0	-0,050	-0,076	-0,004	-0,103	-0,170	-0,014	-0,159	-0,297	-0,033	
5,08	193,66	108,32	C	1,6421	1,5155	0,198	0,270	0,343	0,479	0,690 0,601 0,749
		51,93	D	1,6475	1,5181	0,068	0,132	0,213	0,380	
		-337,45	F	1,6612	1,5243	0,039	0,123	0,258	0,456	
-70,0	-0,174	-0,118	-0,004	-0,384	-0,262	-0,013	-0,672	-0,463	-0,031	$h=\pm 17$ 0,210
-76,0	-0,149	-0,109	-0,004	-0,332	-0,246	-0,014	-0,575	-0,432	-0,032	
-82,0	-0,126	-0,101	-0,004	-0,278	-0,228	-0,015	-0,476	-0,400	-0,034	
-88,0	-0,102	-0,094	-0,004	-0,236	-0,222	-0,014	-0,375	-0,367	-0,034	$h=\pm 11$ 0,077
-94,0	-0,092	-0,099	-0,004	-0,180	-0,204	-0,015	-0,271	-0,334	-0,035	
5,15	193,36	104,36	C	1,6421	1,5155	0,230	0,287	0,410	0,586	0,860 0,761 0,896
		50,98	D	1,6475	1,5181	0,089	0,152	0,280	0,464	
		-383,73	F	1,6612	1,5243	0,050	0,160	0,320	0,556	
-70,0	-0,198	-0,125	-0,004	-0,440	-0,281	-0,014	-0,772	-0,496	-0,032	$h=\pm 17$ 0,206
-76,0	-0,176	-0,118	-0,004	-0,390	-0,264	-0,014	-0,681	-0,467	-0,034	
-82,0	-0,154	-0,111	-0,004	-0,340	-0,248	-0,015	-0,587	-0,437	-0,035	
-88,0	-0,132	-0,103	-0,005	-0,288	-0,231	-0,016	-0,491	-0,406	-0,036	$h=\pm 11$ 0,075
-94,0	-0,109	-0,096	-0,005	-0,235	-0,213	-0,016	-0,392	-0,374	-0,038	

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
4,73	194,67	125,18	C	1,5155	0,104	0,040	-0,036	-0,103	-0,151
		56,62	D	1,5181	-0,074	-0,132	-0,196	-0,254	-0,286
		-241,14	F	1,5243	-0,164	-0,201	-0,237	-0,261	-0,245
β = 2°									
β = 3°									
4,80	194,37	119,92	C	1,5155	0,141	0,098	0,066	0,052	0,066
		55,49	D	1,5181	-0,041	-0,068	-0,079	-0,087	-0,065
		-263,63	F	1,5243	-0,132	-0,138	-0,130	-0,104	-0,021
		-70,0		-0,248	-0,217	-0,012	-0,433	-0,383	-0,028
		-76,0		-0,193	-0,198	-0,012	-0,333	-0,351	-0,028
4,87	194,07	-82,0		-0,137	-0,180	-0,012	-0,231	-0,317	-0,029
		-88,0		-0,092	-0,172	-0,012	-0,130	-0,285	-0,030
		-94,0		-0,038	-0,154	-0,012	-0,029	-0,252	-0,030
		-70,0		-0,297	-0,232	-0,012	-0,518	-0,411	-0,029
		-76,0		-0,243	-0,215	-0,013	-0,421	-0,380	-0,030
4,87	194,07	-82,0		-0,189	-0,197	-0,013	-0,322	-0,347	-0,030
		-88,0		-0,146	-0,190	-0,013	-0,223	-0,316	-0,031
		-94,0		-0,081	-0,162	-0,013	-0,124	-0,284	-0,032
		-70,0		1,5155	0,172	0,149	0,160	0,184	0,251
		-76,0		1,5181	-0,014	-0,001	0,010	0,037	0,131
4,87	194,07	-290,84	F	1,5243	-0,108	-0,085	-0,039	0,049	0,182
		-70,0		-0,347	-0,249	-0,013	-0,608	-0,441	-0,030
		-76,0		-0,296	-0,232	-0,013	-0,515	-0,412	-0,031

-82,0	-0,111	-0,096	-0,004	-0,244	-0,215	-0,014	-0,419	-0,380	-0,032
-88,0	-0,088	-0,089	-0,004	-0,192	-0,198	-0,014	-0,323	-0,349	-0,033
-94,0	-0,066	-0,081	-0,004	-0,139	-0,181	-0,014	-0,238	-0,329	-0,033
4,94	193,77	110,64 53,35 -324,43	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,189 0,009 -0,068	0,206 0,034 -0,037	0,236 0,079 0,039	0,305 0,160 0,158	0,429 0,301 0,346
-70,0	-0,180	-0,119	-0,004	-0,400	-0,267	-0,013	-0,702	-0,473	-0,031
-76,0	-0,158	-0,112	-0,004	-0,352	-0,251	-0,014	-0,613	-0,443	-0,033
-82,0	-0,137	-0,105	-0,004	-0,302	-0,235	-0,014	-0,522	-0,414	-0,034
-88,0	-0,115	-0,098	-0,004	-0,252	-0,218	-0,015	-0,431	-0,385	-0,035
-94,0	-0,094	-0,091	-0,004	-0,202	-0,202	-0,015	-0,337	-0,355	-0,036
5,01	193,48	106,51 52,34 -366,94	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,212 0,032 -0,054	0,249 0,074 -0,003	0,302 0,147 0,101	0,403 0,261 0,267	0,577 0,446 0,508
-70,0	-0,205	-0,127	-0,004	-0,456	-0,286	-0,014	-0,801	-0,505	-0,033
-76,0	-0,185	-0,121	-0,004	-0,410	-0,270	-0,014	-0,717	-0,478	-0,034
-82,0	-0,164	-0,114	-0,004	-0,378	-0,269	-0,015	-0,632	-0,451	-0,036
-88,0	-0,144	-0,107	-0,005	-0,317	-0,240	-0,016	-0,545	-0,423	-0,037
-94,0	-0,124	-0,101	-0,005	-0,269	-0,224	-0,016	-0,456	-0,394	-0,038
5,08	193,18	102,68 51,36 -422,46	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,248 0,063 -0,046	0,276 0,113 0,036	0,360 0,196 0,158	0,489 0,342 0,345	0,694 0,573 0,628
-70,0	-0,230	-0,136	-0,004	-0,515	-0,305	-0,014	-0,905	-0,540	-0,034
-76,0	-0,212	-0,130	-0,004	-0,472	-0,291	-0,015	-0,827	-0,515	-0,036
-82,0	-0,194	-0,124	-0,005	-0,430	-0,277	-0,016	-0,748	-0,489	-0,037
-88,0	-0,175	-0,118	-0,005	-0,386	-0,263	-0,016	-0,667	-0,463	-0,039
-94,0	-0,156	-0,111	-0,005	-0,341	-0,248	-0,017	-0,584	-0,436	-0,040

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20	
4,75	193,73	110,82 55,08 -330,31	C	1,5139	0,025	-0,007	-0,039	-0,052	-0,042	
			D	1,5163	-0,037	-0,063	-0,082	-0,084	-0,051	
			F	1,5220	0,150	0,141	0,158	0,188	0,271	
β = 2°										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
			-0,005							
			-0,005							
			-0,005							
			-0,006							
4,82	193,44	106,69 54,00 -374,50	C	1,5139	0,041	0,027	0,019	0,041	0,090	
			D	1,5163	-0,017	-0,021	-0,017	0,015	0,085	
			F	1,5220	0,167	0,181	0,234	0,290	0,410	
			-0,005							
			-0,010							
-100,0	-0,121	-0,100	-0,005		-0,264	-0,223	-0,017	-0,448	-0,391	-0,039
			-0,005							
			-0,005							
			-0,005							
			-0,006							
-120,0	-0,064	-0,081	-0,005		-0,130	-0,179	-0,018	-0,192	-0,310	-0,041
			-0,005							
			-0,005							
			-0,005							
			-0,006							
-140,0	-0,008	-0,062	-0,005		0,006	-0,136	-0,018	0,075	-0,230	-0,042
			-0,005							
			-0,005							
			-0,005							
			-0,006							
-160,0	0,046	-0,046	-0,006		0,144	-0,094	-0,019	0,360	-0,147	-0,041
			-0,006							
			-0,006							
			-0,006							
			-0,006							
-200,0	0,158	-0,010	-0,005		0,442	-0,006	-0,014	1,001	0,034	-0,030
			-0,005							
			-0,005							
			-0,005							
			-0,006							
4,89	193,14	102,85 52,97 -432,54	C	1,5139	0,063	0,060	0,072	0,115	0,202	
			D	1,5163	-0,002	0,004	0,032	0,087	0,188	
			F	1,5220	0,180	0,207	0,270	0,362	0,524	
-100,0	-0,173	-0,119	-0,005		-0,412	-0,272	-0,019	-1,347	-1,115	-0,038
			-0,006							
-120,0	-0,138	-0,106	-0,005		-0,295	-0,234	-0,021	-0,484	-0,408	-0,048
			-0,006							



-140,0	-0,100	-0,092	-0,006	-0,172	-0,196	-0,022	-0,241	-0,337	-0,052
-160,0	-0,038	-0,074	-0,008	-0,043	-0,157	-0,022	0,034	-0,256	-0,052
-200,0	0,071	-0,039	-0,007	0,250	-0,070	-0,021	0,692	-0,078	-0,047
4,96	192,84	99,27 51,97 -512,16	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,078 0,011 0,186	0,082 0,029 0,228	0,112 0,070 0,304	0,171 0,144 0,422	0,283 0,276 0,609
-100,0	-0,224	-0,134	-0,007	-0,519	-0,313	-0,022	-0,896	-0,566	-0,047
-120,0	-0,180	-0,119	-0,007	-0,388	-0,262	-0,024	-0,639	-0,453	-0,056
-140,0	-0,134	-0,104	-0,009	-0,283	-0,226	-0,023	-0,423	-0,397	-0,058
-160,0	-0,086	-0,088	-0,006	-0,154	-0,193	-0,024	-0,165	-0,323	-0,059
-200,0	0,016	-0,058	-0,008	0,124	-0,113	-0,025	0,474	-0,152	-0,056
5,03	192,54	95,94 51,01 -628,15	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,082 0,018 0,193	0,098 0,044 0,244	0,139 0,096 0,330	0,212 0,186 0,466	0,343 0,337 0,673
-100,0	-0,263	-0,147	-0,006	-0,581	-0,327	-0,023	-1,074	-0,647	-0,053
-120,0	-0,208	-0,134	-0,009	-0,490	-0,299	-0,024	-0,828	-0,523	-0,056
-140,0	-0,187	-0,123	-0,008	-0,390	-0,268	-0,025	-0,622	-0,463	-0,062
-160,0	-0,144	-0,108	-0,008	-0,281	-0,236	-0,027	-0,441	-0,445	-0,068
-200,0	-0,052	-0,080	-0,011	-0,023	-0,162	-0,030	0,225	-0,235	-0,071
5,10	192,25	92,82 50,98 -812,80	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,089 0,022 0,194	0,107 0,053 0,250	0,154 0,110 0,344	0,236 0,210 0,490	0,379 0,374 0,712
-100,0	-0,304	-0,160	-0,007	-0,673	-0,358	-0,024	-1,171	-0,632	-0,052
-120,0	-0,273	-0,150	-0,008	-0,598	-0,335	-0,026	-1,019	-0,587	-0,060
-140,0	-0,242	-0,141	-0,008	-0,518	-0,313	-0,030	-0,833	-0,540	-0,071
-160,0	-0,206	-0,129	-0,011	-0,401	-0,281	-0,034	-0,627	-0,477	-0,076
-200,0	-0,113	-0,102	-0,013	-0,186	-0,215	-0,038	-0,079	-0,322	-0,077

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'														
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20										
4,67	193,52	108,34 55,28 -364,42	C	1,5139	0,040	0,012	-0,044	-0,083	-0,096										
			D	1,5163	-0,044	-0,081	-0,116	-0,142											
			F	1,5220	0,059	0,050	0,024	0,051	0,098										
β = 2°																			
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'										
										β = 3°									
										β = 4°									
-100,0 -120,0 -140,0 -160,0 -200,0	-0,168 -0,123 -0,078 -0,035 0,050	-0,115 -0,100 -0,086 -0,072 -0,045	-0,005 -0,006 -0,006 -0,006 -0,006	-0,372 -0,262 -0,153 -0,044 0,190	-0,259 -0,242 -0,188 -0,155 -0,086	-0,018 -0,020 -0,011 -0,022 -0,024	-0,640 -0,431 -0,215 0,031 0,546	-0,453 -0,388 -0,323 -0,257 -0,114	-0,045 -0,046 -0,048 -0,049 -0,049										
										4,77	193,22	104,38 54,20 -419,11	C	1,5139	0,061	0,030	0,002	-0,005	0,014
													D	1,5163	-0,033	-0,051	-0,069	-0,065	-0,013
													F	1,5220	0,075	0,072	0,091	0,128	0,216
													-100,0 -120,0 -140,0 -160,0 -200,0	-0,188 -0,161 -0,119 -0,080 0,003	-0,124 -0,113 -0,099 -0,088 -0,061	-0,005 -0,006 -0,007 -0,007 -0,007	-0,447 -0,348 -0,232 -0,132 0,087	-0,283 -0,251 -0,205 -0,178 -0,107	-0,021 -0,021 -0,022 -0,018 -0,027
4,84	192,92	100,70 53,16 -493,38	C	1,5139	0,073	0,050	0,040	0,051	0,101										
			D	1,5163	-0,022	-0,031	-0,025	-0,009	0,053										
			F	1,5220	0,082	0,095	0,126	0,190	0,303										
			-100,0 -120,0	-0,239 -0,202	-0,138 -0,111	-0,006 -0,007	-0,559 -0,440	-0,340 -0,282	-0,021 -0,023	-0,919 -0,746	-0,546 -0,494	-0,048 -0,054							
h = ±17 0,160 h = ±11 0,056																			

-140,0	-0,166	-0,115	-0,007	-0,351	-0,256	-0,024	-0,560	-0,439	-0,059	$h=\pm 11$ 0,047
-160,0	-0,128	-0,102	-0,007	-0,252	-0,224	-0,027	-0,352	-0,380	-0,060	
-200,0	-0,053	-0,080	-0,008	-0,039	-0,164	-0,028	0,152	-0,249	-0,063	
4,91	192,62	97,27 52,15 -600,04	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,078 -0,011 0,089	0,070 -0,013 0,109	0,070 -0,001 0,154	0,094 0,038 0,232	0,158 0,119 0,366	
-100,0	-0,277	-0,151	-0,006	-0,615	-0,339	-0,021	-1,072	-0,597	-0,051	$h=\pm 17$ 0,135
-120,0	-0,247	-0,141	-0,009	-0,527	-0,313	-0,024	-0,954	-0,572	-0,061	
-140,0	-0,217	-0,132	-0,010	-0,454	-0,293	-0,029	-0,759	-0,505	-0,064	
-160,0	-0,184	-0,121	-0,008	-0,378	-0,266	-0,032	-0,570	-0,452	-0,071	$h=\pm 11$ 0,043
-200,0	-0,118	-0,101	-0,012	-0,194	-0,213	-0,032	-0,099	-0,334	-0,073	
4,98	192,33	94,07 51,19 -766,18	C 1,6121 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,085 -0,007 0,090	0,079 -0,004 0,117	0,085 0,015 0,169	0,118 0,062 0,258	0,196 0,157 0,407	
-100,0	-0,318	-0,165	-0,007	-0,717	-0,369	-0,023	-1,234	-0,651	-0,053	$h=\pm 17$ 0,126
-120,0	-0,295	-0,158	-0,008	-0,648	-0,350	-0,028	-1,124	-0,616	-0,062	
-140,0	-0,272	-0,150	-0,009	-0,586	-0,333	-0,030	-0,977	-0,579	-0,070	
-160,0	-0,246	-0,142	-0,010	-0,516	-0,312	-0,032	-0,814	-0,535	-0,076	$h=\pm 11$ 0,038
-200,0	-0,193	-0,127	-0,011	-0,349	-0,268	-0,037	-0,385	-0,432	-0,084	
5,05	192,03	91,07 50,25 -1060,82	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,086 -0,006 0,090	0,082 -0,002 0,117	0,089 0,018 0,170	0,128 0,070 0,266	0,208 0,172 0,423	
-100,0	-0,361	-0,179	-0,007	-0,803	-0,401	-0,024	-1,386	-0,708	-0,056	$h=\pm 17$ 0,118
-120,0	-0,346	-0,175	-0,008	-0,763	-0,389	-0,028	-1,316	-0,684	-0,066	
-140,0	-0,332	-0,170	-0,009	-0,695	-0,365	-0,032	-1,212	-0,659	-0,076	
-160,0	-0,314	-0,165	-0,010	-0,647	-0,344	-0,036	-1,078	-0,624	-0,083	$h=\pm 11$ 0,034
-200,0	-0,277	-0,155	-0,013	-0,521	-0,329	-0,041	-0,709	-0,542	-0,096	

$f' = 200, 0$ ;  $v_2 = 33, 9$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 3, 0$ ;  $d_2 = 9, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -140$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$				
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20
4, 63	193, 38	107, 10 55, 81 -390, 26	C	1, 5139	0, 069	-0, 007	-0, 068	-0, 139	-0, 189
			D	1, 5163	-0, 066	-0, 113	-0, 178	-0, 230	-0, 268
			F	1, 5220	-0, 031	-0, 064	-0, 095	-0, 117	-0, 112
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$
-100, 0	-0, 192	-0, 125	-0, 005	-0, 458	-0, 286	-0, 019	-0, 796	-0, 504	-0, 045
-120, 0	-0, 171	-0, 116	-0, 006	-0, 372	-0, 258	-0, 021	-0, 630	-0, 453	-0, 050
-140, 0	-0, 137	-0, 105	-0, 007	-0, 288	-0, 232	-0, 023	-0, 461	-0, 402	-0, 054
-160, 0	-0, 090	-0, 092	-0, 007	-0, 205	-0, 207	-0, 024	-0, 285	-0, 354	-0, 060
-200, 0	-0, 046	-0, 077	-0, 007	-0, 037	-0, 160	-0, 026	0, 117	-0, 250	-0, 058
$\beta = 3^\circ$									
4, 70	193, 08	103, 23 54, 70 -453, 77	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 070 -0, 049 -0, 019	0, 020 -0, 088 -0, 034	-0, 033 -0, 126 -0, 048	-0, 072 -0, 162 -0, 047	-0, 095 -0, 166 -0, 017
-100, 0	-0, 242	-0, 140	-0, 006	-0, 537	-0, 312	-0, 020	-0, 937	-0, 551	-0, 048
-120, 0	-0, 211	-0, 129	-0, 007	-0, 462	-0, 288	-0, 023	-0, 818	-0, 550	-0, 054
-140, 0	-0, 181	-0, 120	-0, 007	-0, 387	-0, 265	-0, 025	-0, 635	-0, 461	-0, 058
-160, 0	-0, 153	-0, 111	-0, 009	-0, 311	-0, 242	-0, 028	-0, 471	-0, 416	-0, 062
-200, 0	-0, 099	-0, 094	-0, 009	-0, 153	-0, 199	-0, 029	-0, 084	-0, 318	-0, 066
$\beta = 4^\circ$									
4, 77	192, 78	99, 63 53, 64 -542, 28	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 086 -0, 044 -0, 013	0, 038 -0, 071 -0, 023	-0, 002 -0, 099 -0, 022	-0, 018 -0, 114 -0, 001	-0, 032 -0, 101 0, 058
-100, 0	-0, 280	-0, 152	-0, 006	-0, 622	-0, 340	-0, 021	-1, 105	-0, 636	-0, 051
-120, 0	-0, 254	-0, 144	-0, 007	-0, 559	-0, 320	-0, 024	-0, 960	-0, 563	-0, 058
$\beta = 4^\circ$									
-100, 0	-0, 280	-0, 152	-0, 006	-0, 622	-0, 340	-0, 021	-1, 105	-0, 636	-0, 051
-120, 0	-0, 254	-0, 144	-0, 007	-0, 559	-0, 320	-0, 024	-0, 960	-0, 563	-0, 058

-140,0	-0,232	-0,138	-0,009	-0,496	-0,301	-0,027	-0,828	-0,526	-0,064	$h=\pm 11$ 0,033
-160,0	-0,206	-0,128	-0,008	-0,431	-0,282	-0,029	-0,681	-0,486	-0,069	
-200,0	-0,761	-0,115	-0,010	-0,290	-0,245	-0,033	-0,291	-0,386	-0,077	
4,84	192,49	96,27 52,62 -674,19	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,084 -0,035 -0,012	0,050 -0,060 -0,013	0,021 -0,079 -0,003	0,006 -0,083 0,030	0,015 -0,054 0,106	
-100,0	-0,320	-0,165	-0,007	-0,711	-0,370	-0,022	-1,243	-0,653	-0,053	$h=\pm 17$ 0,096
-120,0	-0,301	-0,159	-0,008	-0,663	-0,355	-0,026	-1,145	-0,625	-0,062	
-140,0	-0,283	-0,154	-0,009	-0,615	-0,342	-0,029	-1,038	-0,597	-0,070	
-160,0	-0,264	-0,147	-0,009	-0,564	-0,327	-0,032	-0,912	-0,563	-0,074	$h=\pm 11$ 0,028
-200,0	-0,204	-0,128	-0,012	-0,447	-0,298	-0,038	-0,594	-0,491	-0,087	
4,91	192,19	93,13 51,64 -891,79	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,086 -0,054 -0,010	0,056 -0,055 -0,010	0,028 -0,071 0,004	0,018 -0,067 0,045	0,039 -0,032 0,129	
-100,0	-0,362	-0,179	-0,007	-0,805	-0,401	-0,024	-1,411	-0,709	-0,056	$h=\pm 17$ 0,085
-120,0	-0,351	-0,176	-0,008	-0,775	-0,392	-0,028	-1,342	-0,690	-0,066	
-140,0	-0,341	-0,174	-0,010	-0,743	-0,384	-0,032	-1,265	-0,673	-0,077	
-160,0	-0,331	-0,170	-0,011	-0,710	-0,376	-0,036	-1,170	-0,650	-0,084	$h=\pm 11$ 0,022
-200,0	-0,312	-0,166	-0,013	-0,625	-0,358	-0,043	-0,903	-0,596	-0,098	
4,98	191,90	90,19 50,69 -1318,8	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,085 -0,035 -0,016	0,054 -0,095 -0,016	0,026 -0,074 -0,001	0,015 -0,072 0,040	0,036 -0,034 0,130	
-100,0	-0,406	-0,194	-0,007	-0,905	-0,434	-0,025	-1,574	-0,767	-0,059	$h=\pm 17$ 0,074
-120,0	-0,404	-0,194	-0,009	-0,894	-0,432	-0,030	-1,552	-0,761	-0,070	
-140,0	-0,403	-0,194	-0,010	-0,881	-0,429	-0,035	-1,507	-0,752	-0,080	
-160,0	-0,401	-0,194	-0,012	-0,867	-0,428	-0,039	-1,448	-0,744	-0,092	$h=\pm 11$ 0,017
-200,0	-0,400	-0,195	-0,014	-0,822	-0,423	-0,048	-1,248	-0,713	-0,111	

$f' = 200,0$ ;  $\gamma_2 = 33,9$ ;  $\gamma_3 = 64,1$ ;  $d_1 = 3,0$ ;  $d_2 = 9,0$ ;  $c = -0,0010$ ; кома для  $\beta = 4^\circ$  и  $s = -140$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'												
					β = 3°												
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20								
4,57	193,20	105,33 56,18 -429,34	C	1,5139	0,064	-0,011	-0,094	-0,191	-0,280								
			D	1,5163	-0,078	-0,142	-0,223	-0,304	-0,380								
			F	1,5220	-0,117	-0,170	-0,224	-0,273	-0,292								
β = 4°																	
	S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'							
												β = 3°					
												β = 4°					
	s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'							
												β = 3°					
												β = 4°					
4,65	192,86	101,07 54,90 -521,25	C	1,5139	0,080	0,015	-0,059	-0,126	-0,175								
			D	1,5163	-0,067	-0,120	-0,183	-0,242	-0,290								
			F	1,5220	-0,110	-0,148	-0,186	-0,217	-0,221								
	-100,0	-0,292	-0,156	-0,651	-0,350	-0,022	-1,139	-0,617	-0,051	h=±17 0,082							
			-0,149	-0,603	-0,335	-0,025	-1,040	-0,586	-0,058								
			-0,145	-0,558	-0,322	-0,028	-0,947	-0,564	-0,068								
	-140,0	-0,256	-0,140	-0,516	-0,310	-0,030	-0,842	-0,536	-0,071	h=±11 0,025							
			-0,140	-0,516	-0,310	-0,030	-0,842	-0,536	-0,071								
			-0,134	-0,430	-0,289	-0,036	-0,598	-0,482	-0,082								
4,73	192,52	97,14 53,68 -663,87	C	1,5139	0,083	0,028	-0,035	-0,094	-0,140								
			D	1,5163	-0,062	-0,110	-0,161	-0,210	-0,240								
			F	1,5220	-0,110	-0,138	-0,165	-0,179	-0,166								
	-100,0	-0,338	-0,172	-0,752	-0,383	-0,023	-1,319	-0,677	-0,054	h=±17 0,066							
			-0,167	-0,722	-0,374	-0,027	-1,253	-0,659	-0,063								

-140,0	-0,316	-0,164	-0,009	-0,694	-0,367	-0,030	-1,186	-0,644	-0,074	$h=\pm 11$ 0,017
-160,0	-0,309	-0,162	-0,010	-0,666	-0,359	-0,033	-1,106	-0,624	-0,079	
-200,0	-0,299	-0,161	-0,012	-0,609	-0,349	-0,041	-0,909	-0,588	-0,094	
4,81	192,19	93,51 52,52 -915,15	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,086 -0,060 -0,112	0,033 -0,106 -0,135	-0,026 -0,154 -0,158	-0,080 -0,197 -0,164	-0,118 -0,218 -0,141	
-100,0	-0,386	-0,187	-0,007	-0,860	-0,419	-0,024	-1,151	-0,741	-0,058	$h=\pm 17$ 0,050
-120,0	-0,383	-0,187	-0,008	-0,850	-0,417	-0,029	-1,140	-0,735	-0,069	
-140,0	-0,382	-0,186	-0,009	-0,842	-0,416	-0,033	-1,445	-0,730	-0,076	
-160,0	-0,384	-0,188	-0,011	-0,834	-0,416	-0,038	-1,402	-0,724	-0,089	$h=\pm 11$ 0,010
-200,0	-0,391	-0,192	-0,014	-0,814	-0,418	-0,046	-1,267	-0,710	-0,108	
4,89	191,85	90,14 51,40 -1475,67	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,085 -0,062 -0,116	0,028 -0,110 -0,142	-0,034 -0,162 -0,166	-0,090 -0,206 -0,174	-0,130 -0,228 -0,150	
-100,0	-0,437	-0,204	-0,008	-0,975	-0,475	-0,026	-1,714	-0,809	-0,061	$h=\pm 17$ 0,034
-120,0	-0,445	-0,207	-0,009	-0,988	-0,463	-0,031	-1,723	-0,816	-0,074	
-140,0	-0,457	-0,212	-0,012	-1,002	-0,469	-0,035	-1,728	-0,830	-0,085	
-160,0	-0,466	-0,215	-0,012	-1,018	-0,478	-0,042	-1,726	-0,833	-0,098	$h=\pm 11$ 0,002
-200,0	-0,496	-0,227	-0,016	-1,045	-0,496	-0,052	-1,670	-0,846	-0,122	
4,97	191,51	87,00 50,33 -3829,69	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,077 -0,070 -0,127	0,015 -0,125 -0,162	-0,055 -0,185 -0,192	-0,122 -0,239 -0,204	-0,171 -0,270 -0,192	
-100,0	-0,491	-0,222	-0,008	-1,096	-0,498	-0,027	-1,928	-0,881	-0,065	$h=\pm 17$ 0,018
-120,0	-0,510	-0,229	-0,009	-1,135	-0,512	-0,033	-1,983	-0,903	-0,078	
-140,0	-0,532	-0,236	-0,011	-1,177	-0,528	-0,040	-2,034	-0,927	-0,103	
-160,0	-0,556	-0,245	-0,014	-1,219	-0,545	-0,046	-2,079	-0,952	-0,108	$h=\pm 11$ 0,005
-200,0	-0,610	-0,264	-0,018	-1,301	-0,582	-0,059	-2,120	-0,999	-0,138	

$$f' = 200, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 3, 0; \quad d_2 = 9, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 8	h = 11	h = 14	h = 17	h = 20	
4, 55	192, 86	101, 51 55, 90 —529, 10	C	1, 5139	0, 074	0, 000	—0, 100	—0, 211	—0, 320	
			D	1, 5163	—0, 094	—0, 168	—0, 256	—0, 359	—0, 461	
			F	1, 5220	—0, 213	—0, 267	—0, 340	—0, 409	—0, 468	
β = 2°										
β = 3°										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	Δy'
—100, 0	—0, 315	—0, 163	—0, 006	—0, 702	—0, 366	—0, 022	—1, 232	—0, 647	—0, 052	
—120, 0	—0, 303	—0, 160	—0, 008	—0, 672	—0, 357	—0, 026	—1, 169	—0, 629	—0, 061	
—140, 0	—0, 295	—0, 157	—0, 009	—0, 648	—0, 351	—0, 029	—1, 111	—0, 615	—0, 069	
—160, 0	—0, 290	—0, 156	—0, 009	—0, 630	—0, 347	—0, 033	—1, 053	—0, 602	—0, 075	
—200, 0	—0, 292	—0, 158	—0, 012	—0, 602	—0, 344	—0, 039	—0, 926	—0, 585	—0, 090	
4, 64	192, 48	97, 07 54, 48 —701, 19	C	1, 5139	0, 088	0, 011	—0, 080	—0, 179	—0, 274	
			D	1, 5163	—0, 085	—0, 155	—0, 237	—0, 325	—0, 406	
			F	1, 5220	—0, 207	—0, 258	—0, 317	—0, 374	—0, 415	
—100, 0	—0, 366	—0, 180	—0, 007	—0, 817	—0, 404	—0, 024	—1, 437	—0, 716	—0, 056	
—120, 0	—0, 364	—0, 180	—0, 008	—0, 808	—0, 402	—0, 028	—1, 409	—0, 710	—0, 066	
—140, 0	—0, 366	—0, 182	—0, 010	—0, 805	—0, 404	—0, 033	—1, 386	—0, 707	—0, 077	
—160, 0	—0, 367	—0, 181	—0, 011	—0, 803	—0, 404	—0, 036	—1, 358	—0, 704	—0, 084	
—200, 0	—0, 385	—0, 189	—0, 013	—0, 809	—0, 414	—0, 045	—1, 287	—0, 707	—0, 104	
4, 73	192, 09	93, 01 53, 14 —1041, 17	C	1, 5139	0, 087	0, 005	—0, 077	—0, 173	—0, 264	
			D	1, 5163	—0, 084	—0, 153	—0, 234	—0, 319	—0, 394	
			F	1, 5220	—0, 209	—0, 260	—0, 317	—0, 369	—0, 403	
—100, 0	—0, 422	—0, 199	—0, 007	—0, 942	—0, 446	—0, 025	—1, 656	—1, 789	—0, 060	
—120, 0	—0, 430	—0, 202	—0, 009	—0, 955	—0, 451	—0, 030	—1, 670	—0, 797	—0, 072	



-140,0	-0,442	-0,207	-0,011	-0,977	-0,462	-0,036	-1,685	-0,806	-0,082
-160,0	-0,456	-0,211	-0,012	-0,997	-0,469	-0,040	-1,702	-0,821	-0,096
-200,0	-0,493	-0,225	-0,015	-1,050	-0,495	-0,051	-1,707	-0,849	-0,120
4,82	191,71	89,28 51,85 -2028,73	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,085 -0,091 -0,221	0,003 -0,164 -0,273	-0,092 -0,251 -0,334	-0,197 -0,342 -0,391	-0,292 -0,423 -0,431
-100,0	-0,481	-0,218	-0,008	-1,074	-0,490	-0,027	-1,890	-0,867	-0,064
-120,0	-0,501	-0,225	-0,009	-1,115	-0,504	-0,032	-1,952	-0,891	-0,078
-140,0	-0,525	-0,234	-0,012	-1,160	-0,520	-0,038	-2,106	-0,918	-0,091
-160,0	-0,550	-0,241	-0,013	-1,213	-0,542	-0,045	-2,081	-0,948	-0,106
-200,0	-0,615	-0,266	-0,017	-1,322	-0,587	-0,058	-2,202	-1,028	-0,136
4,91	191,33	85,83 50,63 -4252,81	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,071 -0,102 -0,237	-0,020 -0,187 -0,301	-0,130 -0,287 -0,373	-0,250 -0,393 -0,446	-0,364 -0,491 -0,501
-100,0	-0,544	-0,240	-0,008	-1,238	-0,560	-0,028	-2,141	-0,952	-0,068
-120,0	-0,577	-0,251	-0,010	-1,287	-0,563	-0,034	-2,256	-0,995	-0,083
-140,0	-0,615	-0,263	-0,011	-1,365	-0,590	-0,041	-2,377	-1,041	-0,100
-160,0	-0,658	-0,278	-0,015	-1,449	-0,621	-0,050	-2,499	-1,091	-0,117
-200,0	-0,766	-0,326	-0,020	-1,631	-0,693	-0,066	-2,690	-1,165	-0,154
5,00	190,95	82,64 49,46 -22332,9	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,057 -0,121 -0,259	-0,051 -0,221 -0,338	-0,183 -0,342 -0,431	-0,327 -0,474 -0,526	-0,477 -0,600 -0,604
-100,0	-0,610	-0,265	-0,008	-1,370	-0,582	-0,031	-2,408	-1,046	-0,042
-120,0	-0,659	-0,278	-0,011	-1,470	-0,623	-0,038	-2,578	-1,102	-0,090
-140,0	-0,714	-0,297	-0,014	-1,584	-0,663	-0,046	-2,761	-1,169	-0,109
-160,0	-0,772	-0,317	-0,016	-1,706	-0,707	-0,055	-2,949	-1,241	-0,130
-200,0	-0,903	-0,362	-0,022	-1,963	-0,802	-0,074	-3,309	-1,394	-0,174

$$f' = 150, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_3 = 8, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'									
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16					
6, 14	148, 62	171, 93 36, 27 — 85, 82	C 1, 6213	1, 5155	—0, 064	—0, 177	—0, 280	—0, 293	—0, 140					
			D 1, 6259	1, 5181	—0, 124	—0, 216	—0, 292	—0, 288	—0, 123					
			F 1, 6373	1, 5243	0, 051	—0, 002	—0, 035	0, 042	0, 307					
β = 2°					β = 3°, 5					β = 5°				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'					
—22, 5	—0, 024	—0, 054	—0, 001	—0, 071	—0, 164	—0, 006	—0, 136	—0, 334	—0, 019					
—25, 5	0, 009	—0, 043	—0, 001	0, 030	—0, 131	—0, 006	0, 073	—0, 265	—0, 019					
—28, 5	0, 041	—0, 032	—0, 001	0, 131	—0, 098	—0, 006	0, 283	—0, 196	—0, 018					
—31, 5	0, 074	—0, 021	—0, 001	0, 231	—0, 064	—0, 006	0, 492	—0, 128	—0, 018					
—34, 5	0, 106	—0, 011	—0, 001	0, 332	—0, 032	—0, 006	0, 702	—0, 060	—0, 017					
6, 18	148, 47	164, 39 35, 91 — 87, 76	C 1, 6213	1, 5155	—0, 025	—0, 087	—0, 119	—0, 066	0, 167					
			D 1, 6259	1, 5181	—0, 080	—0, 133	—0, 145	—0, 061	0, 213					
			F 1, 6373	1, 5243	0, 095	0, 085	0, 124	0, 274	0, 659					
—22, 5	—0, 028	—0, 055	—0, 001	—0, 083	—0, 169	—0, 006	—0, 161	—0, 342	—0, 019					
—25, 5	0, 005	—0, 044	—0, 001	0, 018	—0, 135	—0, 006	0, 048	—0, 273	—0, 019					
—28, 5	0, 037	—0, 034	—0, 001	0, 119	—0, 102	—0, 006	0, 258	—0, 205	—0, 019					
—31, 5	0, 070	—0, 023	—0, 001	0, 220	—0, 068	—0, 006	0, 468	—0, 136	—0, 018					
—34, 5	0, 102	—0, 012	—0, 001	0, 321	—0, 035	—0, 006	0, 680	—0, 067	—0, 017					
6, 22	148, 32	157, 49 35, 56 — 89, 80	C 1, 6213	1, 5155	0, 018	—0, 004	0, 020	0, 167	0, 517					
			D 1, 6259	1, 5181	—0, 036	—0, 046	0, 000	0, 165	0, 558					
			F 1, 6373	1, 5243	0, 142	0, 170	0, 274	0, 511	1, 013					
—22, 5	—0, 032	—0, 057	—0, 001	—0, 173	—0, 173	—0, 006	—0, 187	—0, 351	—0, 019					
—25, 5	0, 000	—0, 046	—0, 001	0, 005	—0, 139	—0, 006	0, 022	—0, 282	—0, 019					

-28,5	0,033	-0,035	-0,001	0,106	-0,106	0,233	-0,213	-0,019
-31,5	0,066	-0,024	-0,001	0,208	-0,072	0,444	-0,144	-0,018
-34,5	0,098	-0,013	-0,001	0,309	-0,039	0,656	-0,075	-0,017
6,26	148,18	151,14	C	1,6213	0,055	0,170	0,387	0,844
		35,22	D	1,6259	0,002	0,146	0,392	0,885
		-91,93	F	1,6373	0,183	0,420	0,742	1,347
-22,5	-0,036	-0,058	-0,001	-0,109	-0,177	-0,213	-0,360	-0,019
-25,5	-0,004	-0,047	-0,001	-0,008	-0,144	-0,004	-0,291	-0,019
-28,5	0,029	-0,036	-0,001	0,094	-0,110	0,207	-0,222	-0,019
-31,5	0,062	-0,025	-0,001	0,195	-0,077	0,419	-0,153	-0,018
-34,5	0,094	-0,014	-0,001	0,297	-0,043	0,633	-0,083	-0,018
6,30	148,03	145,29	C	1,6213	0,101	0,307	0,608	1,166
		34,88	D	1,6259	0,041	0,282	0,612	1,210
		-94,18	F	1,6373	0,226	0,562	0,968	1,684
-22,5	-0,041	-0,060	-0,001	-0,122	-0,182	-0,239	-0,368	-0,019
-25,5	-0,008	-0,049	-0,001	-0,021	-0,148	-0,030	-0,300	-0,019
-28,5	0,025	-0,038	-0,001	0,081	-0,114	0,180	-0,231	-0,019
-31,5	0,058	-0,027	-0,001	0,183	-0,081	0,393	-0,162	-0,019
-34,5	0,090	-0,016	-0,001	0,285	-0,047	0,608	-0,092	-0,018
6,34	147,88	139,87	C	1,6213	0,132	0,442	0,819	1,480
		34,54	D	1,6259	0,079	0,421	0,824	1,527
		-96,54	F	1,6373	0,260	0,705	1,192	2,009
-22,5	-0,045	-0,061	-0,001	-0,135	-0,186	-0,266	-0,377	-0,019
-25,5	-0,012	-0,050	-0,001	-0,034	-0,153	-0,057	-0,309	-0,020
-28,5	0,020	-0,039	-0,001	0,067	-0,119	0,153	-0,240	-0,020
-31,5	0,053	-0,028	-0,001	0,170	-0,085	0,366	-0,170	-0,019
-34,5	0,086	-0,017	-0,001	0,272	-0,052	0,582	-0,100	-0,018

$f' = 150,0$ ;  $v_2 = 39,1$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = 0,0000$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -28,5$ 

Q	$\dot{s}_0'$	r	$n_2$	$n_3$	$\Delta s'$					
					$h$					
					$h=6$	$h=8,5$	$h=11$	$h=13,5$	$h=16$	
6,04	148,38	162,47	C	1,6213	1,5155	—0,236	—0,323	—0,341	—0,222	$h=\pm 13,5$ 0,437
		39,63	D	1,6259	1,5181	—0,195	—0,262	—0,258	—0,104	
		—89,29	F	1,6373	1,5243	—0,152	—0,170	—0,103	0,150	
$\beta=2^\circ$					$\beta=5^\circ$					
s	$x_t$	$x_s$	$\Delta y'$	$x_t$	$x_s$	$\Delta y'$	$x_t$	$x_s$	$\Delta y'$	
—22,5	—0,039	—0,059	—0,001	—0,116	—0,180	—0,006	—0,228	—0,363	—0,019	$h=\pm 8,5$ 0,158
—25,5	—0,074	—0,048	—0,001	—0,019	—0,147	—0,007	—0,028	—0,298	—0,019	
—28,5	0,024	—0,039	—0,001	0,077	—0,115	—0,007	0,171	—0,232	—0,019	
—31,5	0,055	—0,028	—0,001	0,173	—0,083	—0,006	0,371	—0,167	—0,019	
—34,5	0,085	—0,017	—0,001	0,268	—0,052	—0,006	0,571	—0,102	—0,018	
6,08	148,23	155,72	C	1,6213	0,003	—0,046	—0,075	—0,014	0,209	$h=\pm 13,5$ 0,461
		36,27	D	1,6259	—0,068	—0,113	—0,124	—0,038	0,220	
		—91,40	F	1,6373	0,054	0,041	0,082	0,234	0,589	
—22,5	—0,042	—0,060	—0,001	—0,129	—0,183	—0,007	—0,254	—0,372	—0,019	$h=\pm 8,5$ 0,165
—25,5	—0,012	—0,050	—0,001	—0,032	—0,151	—0,007	—0,054	—0,306	—0,020	
—28,5	0,020	—0,039	—0,001	0,064	—0,119	—0,007	0,145	—0,241	—0,020	
—31,5	0,051	—0,029	—0,001	0,161	—0,088	—0,006	0,346	—0,175	—0,019	
—34,5	0,082	—0,019	—0,001	0,257	—0,056	—0,006	0,547	—0,110	—0,018	
6,12	148,08	149,52	C	1,6213	0,044	0,031	0,062	0,202	0,526	$h=\pm 13,5$ 0,486
		35,91	D	1,6259	—0,032	—0,035	0,017	0,176	0,538	
		—93,62	F	1,6373	0,095	0,122	0,226	0,455	0,913	
—22,5	—0,047	—0,061	—0,001	—0,141	—0,188	—0,007	—0,280	—0,381	—0,019	$h=\pm 13,5$ 0,486
—25,5	—0,016	—0,051	—0,001	—0,045	—0,156	—0,007	—0,081	—0,316	—0,020	

-28,5 -31,5 -34,5	0,015 0,046 0,078	-0,041 -0,030 -0,020	-0,001 -0,001 -0,001	0,051 0,148 0,245	-0,124 -0,092 -0,060	-0,007 -0,007 -0,006	0,119 0,320 0,522	-0,250 -0,184 -0,118	-0,020 -0,019 -0,019	$h=\pm 8,5$ 0,173
6,16	147,94	143,78 35,56 -95,96	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,082 0,009 0,095	0,107 0,046 0,166	0,200 0,155 0,319	0,408 0,387 0,624	0,836 0,848 1,179	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,051 -0,020 0,011 0,042 0,073	-0,063 -0,053 -0,042 -0,032 -0,021	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,155 -0,058 0,038 0,135 0,232	-0,192 -0,160 -0,128 -0,096 -0,064	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,006	-0,507 -0,108 0,092 0,293 0,496	-0,390 -0,325 -0,259 -0,193 -0,127	-0,020 -0,020 -0,020 -0,020 -0,019	$h=\pm 13,5$ 0,510 $h=\pm 8,5$ 0,181
6,20	147,79	138,47 35,21 -98,41	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,119 0,045 0,168	0,185 0,121 0,280	0,330 0,282 0,498	0,611 0,595 0,879	1,137 1,150 1,544	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,056 -0,025 0,006 0,038 0,069	-0,064 -0,054 -0,044 -0,033 -0,023	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,168 -0,126 0,024 0,121 0,219	-0,196 -0,165 -0,133 -0,101 -0,069	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,334 -0,136 0,064 0,266 0,470	-0,399 -0,334 0,268 -0,202 -0,136	-0,020 -0,020 -0,020 -0,020 -0,019	$h=\pm 13,5$ 0,535 $h=\pm 8,5$ 0,189
6,24	147,64	133,54 34,87 -101,01	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,155 0,079 0,206	0,256 0,193 0,360	0,455 0,413 0,630	0,810 0,793 1,085	1,433 1,451 1,847	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,060 -0,029 0,002 0,033 0,065	-0,066 -0,056 -0,045 -0,035 -0,024	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,181 -0,086 0,010 0,107 0,205	-0,201 -0,169 -0,138 -0,106 -0,073	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,361 -0,164 0,036 0,238 0,442	-0,408 -0,343 -0,278 -0,212 -0,145	-0,020 -0,020 -0,020 -0,020 -0,020	$h=\pm 13,5$ 0,559 $h=\pm 8,5$ 0,197

$f' = 150,0$ ;  $v_2 = 39,1$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = -0,0005$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -28,5$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 6					
					h = 6	h = 8,5	h = 11	h = 13,5	h = 16	
5,94	148,14	154,00 37,00 — 93,03	C	1,5155	—0,003	—0,092	—0,161	—0,178	—0,068	
			D	1,5181	—0,100	—0,174	—0,233	—0,231	—0,088	
			F	1,5243	—0,037	—0,078	—0,092	—0,029	0,200	
β = 3° , 5										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
			—0,001							
			—0,001							
—22,5	—0,053	—0,063	—0,001	—0,160	—0,193	—0,006	—0,320	—0,393	—0,020	h = ±13,5
—25,5	—0,023	—0,053	—0,001	—0,068	—0,163	—0,007	—0,129	—0,350	—0,020	0,518
—28,5	0,006	—0,044	—0,001	0,023	—0,132	—0,007	0,061	—0,268	—0,020	
—31,5	0,036	—0,034	—0,001	0,115	—0,102	—0,007	0,251	—0,206	—0,020	h = ±8,5
—34,5	0,065	—0,024	—0,001	0,206	—0,072	—0,007	0,441	—0,144	—0,019	0,186
5,98	147,99	147,92 36,63 — 95,38	C	1,5155	0,034	—0,012	—0,032	—0,022	0,236	
			D	1,5181	—0,061	—0,094	—0,103	—0,020	0,219	
			F	1,5243	0,003	—0,002	0,041	0,187	0,511	
—22,5	—0,057	—0,065	—0,001	—0,174	—0,198	—0,007	—0,346	—0,402	—0,020	h = ±13,5
			—0,001	—0,082	—0,167	—0,007	—0,157	—0,339	—0,020	0,518
			—0,001	0,010	—0,137	—0,007	0,033	—0,020	—0,020	
—28,5	0,002	—0,045	—0,001	0,102	—0,107	—0,007	0,224	—0,215	—0,020	h = ±8,5
—31,5	0,032	—0,035	—0,001	0,193	—0,077	—0,007	0,415	—0,152	—0,020	0,186
—34,5	0,061	—0,025	—0,001							
6,02	147,84	142,31 36,26 — 97,81	C	1,5155	0,076	0,063	0,098	0,227	0,528	
			D	1,5181	—0,022	—0,019	0,027	0,180	0,514	
			F	1,5243	0,039	0,077	0,174	0,390	0,812	
—22,5	—0,062	—0,066	—0,001	—0,187	—0,202	—0,007	—0,373	—0,411	—0,020	h = ±13,5
—25,5	—0,032	—0,056	—0,001	—0,095	—0,172	—0,007	—0,184	—0,349	—0,020	0,520

-28,5 -31,5 -34,5	-0,002 0,07 0,057	-0,047 -0,037 -0,027	-0,001 -0,001 -0,001	-0,004 0,088 0,180	-0,142 -0,111 -0,081	-0,007 -0,007 -0,007	0,006 0,196 0,388	-0,286 -0,224 -0,161	-0,020 -0,020 -0,020	$h=\pm 8,5$ 0,186
6,06	147,70	137,11 35,91 -100,36	C D F	1,6213 1,6259 1,6374	1,5155 1,5181 1,5243	0,107 0,012 0,079	0,137 0,054 0,147	0,422 0,378 0,594	0,815 0,805 1,109	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,066 -0,037 -0,007 0,023 0,052	-0,068 -0,058 -0,048 -0,038 -0,028	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,200 -0,109 -0,018 0,074 0,166	-0,207 -0,177 -0,146 -0,116 -0,086	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,401 -0,212 -0,023 0,168 0,360	-0,420 -0,358 -0,296 -0,234 -0,171	-0,020 -0,021 -0,021 -0,021 -0,020	$h=\pm 13,5$ 0,521 $h=\pm 8,5$ 0,186
6,10	147,55	132,27 35,55 -103,06	C D F	1,6213 1,6259 1,6374	1,5155 1,5181 1,5243	0,140 0,048 0,117	0,205 0,126 0,224	0,617 0,574 0,792	1,103 1,090 1,398	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,071 -0,041 -0,012 0,018 0,048	-0,069 -0,059 -0,050 -0,040 -0,030	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,214 -0,123 -0,032 0,060 0,152	-0,211 -0,181 -0,151 -0,121 -0,090	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,428 -0,241 -0,052 0,139 0,332	-0,430 -0,368 -0,306 -0,243 -0,180	-0,020 -0,021 -0,021 -0,021 -0,021	$h=\pm 13,5$ 0,522 $h=\pm 8,5$ 0,186
6,14	147,40	127,76 35,21 -105,92	C D F	1,6213 1,6259 1,6374	1,5155 1,5181 1,5243	0,176 0,082 0,149	0,273 0,195 0,296	0,802 0,759 0,984	1,377 1,368 1,685	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,075 -0,046 -0,016 0,013 0,043	-0,071 -0,061 -0,051 -0,041 -0,032	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,228 -0,137 -0,046 0,045 0,138	-0,216 -0,186 -0,156 -0,126 -0,095	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,456 -0,270 -0,081 0,109 0,302	-0,439 -0,378 -0,316 -0,253 -0,190	-0,020 -0,021 -0,021 -0,021 -0,021	$h=\pm 13,5$ 0,525 $h=\pm 8,5$ 0,186

[illegible]



-28,5 -31,5 -34,5	-0,020 0,008 0,036	-0,052 -0,043 -0,034	-0,001 -0,001 -0,001	-0,058 0,028 0,115	-0,159 -0,131 -0,102	-0,007 -0,007 -0,007	-0,107 0,073 0,255	-0,323 -0,264 -0,204	-0,022 -0,022 -0,021	$h=\pm 8,5$ 0,112
5,96	147,45	131,02 36,26 -105,21	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,128 0,017 0,025	0,158 0,055 0,096	0,244 0,157 0,239	0,431 0,363 0,510	0,799 0,759 0,099	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,081 -0,053 -0,025 0,003 0,031	-0,073 -0,063 -0,054 -0,045 -0,035	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,246 -0,160 -0,073 0,014 0,101	-0,222 -0,193 -0,164 -0,136 -0,107	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,494 -0,316 -0,137 0,043 0,225	-0,450 -0,392 -0,333 -0,274 -0,214	-0,021 -0,021 -0,022 -0,022 -0,022	$h=\pm 13,5$ 0,448 $h=\pm 8,5$ 0,101
6,00	147,31	126,60 35,90 -108,19	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,160 0,047 0,061	0,224 0,123 0,165	0,358 0,269 0,360	0,614 0,547 0,698	1,062 1,023 1,255	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,086 -0,058 -0,030 -0,002 0,026	-0,074 -0,065 -0,056 -0,046 -0,037	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,260 -0,174 -0,088 -0,001 0,086	-0,226 -0,198 -0,169 -0,141 -0,112	-0,007 -0,007 -0,008 -0,008 -0,008	-0,522 -0,346 -0,167 -0,001 0,195	-0,460 -0,402 -0,343 -0,284 -0,225	-0,021 -0,022 -0,022 -0,022 -0,022	$h=\pm 13,5$ 0,448 $h=\pm 8,5$ 0,090
6,04	147,16	122,47 35,55 -111,36	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,196 0,083 0,092	0,290 0,190 0,232	0,470 0,383 0,474	0,785 0,717 0,875	1,319 1,282 1,523	
-22,5 -25,5 -28,5 -31,5 -34,5	-0,090 -0,063 -0,035 -0,007 0,021	-0,076 -0,066 -0,057 -0,048 -0,039	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,274 -0,189 -0,103 -0,017 0,070	-0,231 -0,203 -0,174 -0,146 -0,117	-0,007 -0,007 -0,008 -0,008 -0,008	-0,551 -0,376 -0,198 -0,018 0,163	-0,470 -0,412 -0,353 -0,294 -0,235	-0,021 -0,022 -0,022 -0,022 -0,022	$h=\pm 13,5$ 0,448 $h=\pm 8,5$ 0,081

$$j' = 150, 0; \quad \nu_2 = 39, 1; \quad \nu_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16
5, 74	147, 66	139, 45 37, 77 -101, 73	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5155 1, 5181 1, 5243	0, 053 -0, 079 -0, 130	-0, 019 -0, 143 -0, 165	-0, 078 -0, 191 -0, 173	-0, 089 -0, 187 -0, 121	0, 003 -0, 072 0, 069
β = 2°									
β = 3°, 5									
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-22, 5	-0, 082	-0, 073	-0, 001	-0, 249	-0, 222	-0, 007	-0, 501	-0, 451	-0, 021
-25, 5	-0, 055	-0, 064	-0, 001	-0, 166	-0, 195	-0, 007	-0, 330	-0, 395	-0, 021
-28, 5	-0, 028	-0, 055	-0, 001	-0, 084	-0, 167	-0, 007	-0, 160	-0, 339	-0, 022
-31, 5	-0, 002	-0, 046	-0, 001	-0, 001	-0, 140	-0, 008	0, 011	-0, 283	-0, 022
-34, 5	0, 025	-0, 037	-0, 001	0, 081	-0, 113	-0, 007	0, 181	-0, 227	-0, 022
5, 78	147, 51	134, 45 37, 38 -104, 51	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5155 1, 5181 1, 5243	0, 087 -0, 045 -0, 092	0, 049 -0, 075 -0, 095	0, 038 -0, 076 -0, 056	0, 091 -0, 006 0, 067	0, 264 0, 195 0, 324
-22, 5	-0, 087	-0, 074	-0, 001	-0, 263	-0, 227	-0, 007	-0, 529	-0, 461	-0, 021
-25, 5	-0, 060	-0, 065	-0, 001	-0, 180	-0, 199	-0, 007	-0, 360	-0, 405	-0, 022
-28, 5	-0, 033	-0, 056	-0, 001	-0, 098	-0, 172	-0, 008	-0, 190	-0, 349	-0, 022
-31, 5	-0, 007	-0, 048	-0, 001	-0, 016	-0, 145	-0, 008	-0, 019	-0, 293	-0, 022
-34, 5	0, 020	-0, 039	-0, 001	0, 066	-0, 118	-0, 008	0, 152	-0, 237	-0, 022
5, 82	147, 36	129, 80 37, 00 -107, 45	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5155 1, 5181 1, 5243	0, 123 -0, 016 -0, 062	0, 117 -0, 005 -0, 024	0, 153 0, 041 0, 062	0, 264 0, 174 0, 245	0, 525 0, 456 0, 604
-22, 5	-0, 091	-0, 076	-0, 001	-0, 277	-0, 231	-0, 007	-0, 558	-0, 470	-0, 021
-25, 5	-0, 065	-0, 067	-0, 001	-0, 195	-0, 204	-0, 007	-0, 389	-0, 415	-0, 022

-28,5	-0,038	-0,058	-0,001	-0,113	-0,177	-0,008	-0,220	-0,359	-0,022
-31,5	-0,012	-0,049	-0,001	-0,031	-0,150	-0,008	-0,050	-0,303	-0,022
-34,5	0,015	-0,040	-0,001	0,051	-0,123	-0,008	0,121	-0,247	-0,022
5,86	147,21	125,46 36,62 -110,57	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,151 0,015 -0,027	0,185 0,059 0,040	0,265 0,152 0,171	0,439 0,347 0,422	0,776 0,708 0,860
-22,5	-0,096	-0,077	-0,001	-0,291	-0,236	-0,007	-0,587	-0,480	-0,021
-25,5	-0,069	-0,069	-0,001	-0,210	-0,209	-0,008	-0,419	-0,425	-0,022
-28,5	-0,043	-0,060	-0,001	-0,128	-0,182	-0,008	-0,251	-0,369	-0,023
-31,5	-0,017	-0,051	-0,001	-0,047	-0,155	-0,008	-0,081	-0,314	-0,023
-34,5	0,010	-0,042	-0,001	0,035	-0,128	-0,008	0,090	-0,258	-0,023
5,90	147,07	121,40 36,26 -113,88	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,180 0,049 0,004	0,246 0,121 0,104	0,372 0,257 0,282	0,604 0,515 0,593	1,016 0,955 1,114
-22,5	-0,100	-0,079	-0,001	-0,305	-0,241	-0,007	-0,616	-0,490	-0,021
-25,5	-0,074	-0,070	-0,001	-0,225	-0,214	-0,008	-0,450	-0,435	-0,022
-28,5	-0,048	-0,061	-0,001	-0,144	-0,187	-0,008	-0,282	-0,380	-0,023
-31,5	-0,022	-0,053	-0,001	-0,062	-0,160	-0,008	-0,113	-0,325	-0,023
-34,5	0,005	-0,044	-0,001	0,020	-0,133	-0,008	0,058	-0,269	-0,023
5,94	146,92	117,59 35,90 -117,40	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,210 0,074 0,032	0,307 0,183 0,162	0,458 0,359 0,392	0,778 0,674 0,757	1,254 1,190 1,359
-22,5	-0,100	-0,079	-0,001	-0,305	-0,241	-0,007	-0,616	-0,490	-0,021
-25,5	-0,074	-0,070	-0,001	-0,225	-0,214	-0,008	-0,450	-0,435	-0,022
-28,5	-0,048	-0,061	-0,001	-0,144	-0,187	-0,008	-0,282	-0,380	-0,023
-31,5	-0,022	-0,053	-0,002	-0,062	-0,160	-0,008	-0,113	-0,325	-0,023
-34,5	0,005	-0,044	-0,002	0,020	-0,133	-0,008	0,058	-0,269	-0,024

$f' = 150, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 2, 5$ ;  $d_2 = 8, 0$ ;  $c = 0, 0005$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'										
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16						
5, 46	146, 84	118, 92 38, 71 -120, 01	C	1, 5139	-0, 003	-0, 040	-0, 067	-0, 054	0, 046						
			D	1, 5163	-0, 046	-0, 075	-0, 086	-0, 057	0, 067						
			F	1, 5220	0, 112	0, 108	0, 129	0, 213	0, 401						
β = 2°															
β = 3°, 5															
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'						
-37, 5	-0, 016	-0, 050	-0, 002	-0, 043	-0, 153	-0, 009	-0, 072	-0, 309	-0, 026						
-40, 5	0, 006	-0, 043	-0, 002	0, 025	-0, 131	-0, 009	0, 071	-0, 263	-0, 026						
-43, 5	0, 028	-0, 036	-0, 002	0, 093	-0, 108	-0, 009	0, 214	-0, 218	-0, 028						
-46, 5	0, 050	-0, 029	-0, 002	0, 162	-0, 086	-0, 009	0, 358	-0, 170	-0, 025						
-49, 5	0, 072	-0, 021	-0, 002	0, 230	-0, 063	-0, 008	0, 502	-0, 123	-0, 024						
5, 50	146, 70	115, 26 38, 30 -123, 94	C	1, 5139	0, 027	0, 011	0, 026	0, 090	0, 254						
			D	1, 5163	-0, 018	-0, 019	0, 003	0, 086	0, 272						
			F	1, 5220	0, 138	0, 161	0, 227	0, 360	0, 608						
-37, 5	-0, 021	-0, 052	-0, 002	-0, 061	-0, 159	-0, 009	-0, 108	-0, 321	-0, 026						
										-0, 045	-0, 137	0, 035	-0, 275	-0, 026	
										-0, 038	-0, 114	0, 177	-0, 228	-0, 026	
-43, 5	0, 022	-0, 030	-0, 002	0, 076	-0, 092	-0, 009	0, 323	-0, 181	-0, 026						
-46, 5	0, 044	-0, 023	-0, 002	0, 144	-0, 069	-0, 009	0, 468	-0, 135	-0, 025						
-49, 5	0, 066			0, 213											
5, 54	146, 55	111, 82 37, 90 -128, 14	C	1, 5139	0, 049	0, 067	0, 117	0, 229	0, 457						
			D	1, 5163	0, 010	0, 031	0, 094	0, 226	0, 476						
			F	1, 5220	0, 169	0, 218	0, 316	0, 497	0, 817						
-37, 5	-0, 027	-0, 054	-0, 002	-0, 079	-0, 165	-0, 009	-0, 146	-0, 333	-0, 027						
										-0, 047	-0, 002	-0, 009	-0, 002	-0, 287	-0, 029

-43,5	0,016	-0,040	-0,002	0,057	-0,120	-0,009	0,141	-0,240	-0,027
-46,5	0,038	-0,033	-0,002	0,126	-0,098	-0,009	0,285	-0,194	-0,026
-49,5	0,060	-0,025	-0,002	0,195	-0,075	-0,009	0,431	-0,146	-0,026
5,58	146,40	108,59 37,51 -132,65	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,076 0,033 0,194	0,111 0,083 0,268	0,199 0,179 0,400	0,363 0,360 0,636	0,647 0,673 1,019
-37,5	-0,033	-0,056	-0,002	-0,097	-0,171	-0,009	-0,182	-0,346	-0,027
-40,5	-0,012	-0,049	-0,001	-0,030	-0,149	-0,009	-0,041	-0,302	-0,028
-43,5	0,010	-0,042	-0,002	0,038	-0,127	-0,009	0,103	-0,253	-0,028
-46,5	0,032	-0,035	-0,002	0,107	-0,104	-0,009	0,247	-0,206	-0,027
-49,5	0,054	-0,027	-0,002	0,176	-0,081	-0,009	0,394	-0,159	-0,027
5,62	146,25	105,53 37,12 -137,50	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,103 0,057 0,213	0,162 0,129 0,315	0,279 0,263 0,489	0,491 0,486 0,769	0,843 0,860 1,216
-37,5	-0,040	-0,058	-0,002	-0,116	-0,178	-0,010	-0,221	-0,359	-0,028
-40,5	-0,018	-0,051	-0,002	-0,049	-0,155	-0,010	-0,080	-0,313	-0,028
-43,5	0,004	-0,044	-0,002	0,019	-0,133	-0,010	0,063	-0,266	-0,028
-46,5	0,026	-0,037	-0,002	0,084	-0,111	-0,009	0,208	-0,220	-0,028
-49,5	0,048	-0,029	-0,002	0,156	-0,088	-0,009	0,355	-0,173	-0,027
5,66	146,11	102,64 36,75 -142,73	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,124 0,079 0,239	0,209 0,179 0,363	0,362 0,377 0,569	0,614 0,610 0,895	1,015 1,041 1,399
-37,5	-0,046	-0,060	-0,002	-0,136	-0,184	-0,010	-0,261	-0,372	-0,028
-40,5	-0,025	-0,053	-0,002	-0,069	-0,162	-0,010	-0,120	-0,326	-0,028
-43,5	-0,003	-0,046	-0,002	-0,001	-0,140	-0,010	0,022	-0,280	-0,029
-46,5	0,019	-0,039	-0,002	0,067	-0,117	-0,010	0,166	-0,233	-0,028
-49,5	0,041	-0,032	-0,002	0,136	-0,095	-0,010	0,313	-0,186	-0,028



-43,5	-0,004	-0,046	-0,002	-0,006	-0,141	-0,010	0,009	-0,283	-0,028	$h=\pm 8,5$ 0,131
-46,5	0,016	-0,040	-0,002	0,058	-0,120	-0,010	0,144	-0,239	-0,028	
-49,5	0,037	-0,032	-0,002	0,122	-0,099	-0,010	0,280	-0,200	-0,028	
5,48	146,24	106,26 37,98 -138,44	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,084 0,021 0,122	0,108 0,053 0,182	0,175 0,128 0,295	0,297 0,277 0,484	0,537 0,535 0,813	
-37,5	-0,051	-0,062	-0,002	-0,152	-0,189	-0,010	-0,296	-0,382	-0,028	$h=\pm 13,5$ 0,371
-40,5	-0,024	-0,031	-0,002	-0,089	-0,167	-0,010	-0,164	-0,339	-0,029	
-43,5	-0,011	-0,049	-0,002	-0,026	-0,147	-0,010	-0,031	-0,296	-0,029	
-46,5	0,010	-0,042	-0,002	0,038	-0,126	-0,010	0,103	-0,253	-0,029	$h=\pm 8,5$ 0,131
-49,5	0,030	-0,035	-0,002	0,102	-0,106	-0,010	0,239	-0,209	-0,029	
5,52	146,10	103,33 37,58 -143,75	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,127 0,041 0,141	0,195 0,097 0,230	0,324 0,205 0,372	0,534 0,395 0,609	0,881 0,706 0,993	
-37,5	-0,058	-0,064	-0,002	-0,170	-0,195	-0,010	-0,343	-0,404	-0,028	$h=\pm 13,5$ 0,372
-40,5	-0,038	-0,058	-0,002	-0,110	-0,175	-0,010	-0,207	-0,353	-0,031	
-43,5	-0,017	-0,051	-0,002	-0,046	-0,152	-0,010	-0,073	-0,313	-0,030	
-46,5	0,003	-0,044	-0,002	0,017	-0,133	-0,010	0,062	-0,267	-0,030	$h=\pm 8,5$ 0,131
-49,5	0,023	-0,037	-0,002	0,081	-0,112	-0,010	0,198	-0,223	-0,030	
5,56	145,95	100,56 37,20 -149,49	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,107 0,062 0,164	0,153 0,142 0,274	0,251 0,278 0,444	0,420 0,510 0,725	0,707 0,881 1,167	
-37,5	-0,064	-0,066	-0,002	-0,192	-0,202	-0,010	-0,377	-0,410	-0,029	$h=\pm 13,5$ 0,372
-40,5	-0,044	-0,060	-0,002	-0,130	-0,182	-0,010	-0,247	-0,367	-0,030	
-43,5	-0,024	-0,053	-0,002	-0,068	-0,161	-0,010	-0,115	-0,324	-0,030	
-46,5	-0,004	-0,046	-0,002	-0,004	-0,140	-0,010	0,018	-0,281	-0,030	$h=\pm 8,5$ 0,131
-49,5	0,016	-0,040	-0,002	0,060	-0,119	-0,010	0,154	-0,237	-0,030	

$f' = 150.0$ ;  $v_2 = 39.1$ ;  $v_3 = 64.1$ ;  $d_1 = 2.5$ ;  $d_2 = 8.0$ ;  $c = -0.0005$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -43.5$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					β = 5°					
					h = 6	h = 8,5	h = 11	h = 13,5	h = 16	
5,26	146,53	113,46 39,72 -129,78	C	1,5139	0,027	-0,032	-0,088	-0,116	-0,095	
			D	1,5163	-0,061	-0,110	-0,153	-0,170	-0,128	
			F	1,5220	-0,014	-0,043	-0,054	-0,036	0,063	
β = 2°										
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	
-37,5	-0,050	-0,061	-0,002	-0,148	-0,187	-0,010	-0,290	-0,339	-0,028	h=±13,5 0,343
-40,5	-0,031	-0,055	-0,002	-0,089	-0,167	-0,010	-0,165	-0,374	-0,028	
-43,5	-0,011	-0,049	-0,002	-0,029	-0,148	-0,010	-0,043	-0,298	-0,029	
-46,5	0,008	-0,042	-0,002	0,020	-0,128	-0,010	0,084	-0,257	-0,029	h=±8,5 0,122
-49,5	0,027	-0,036	-0,002	0,090	-0,109	-0,010	0,210	-0,217	-0,029	
5,30	146,38	110,13 39,29 -134,41	C	1,5139	0,049	0,017	-0,005	0,007	0,092	
			D	1,5163	-0,032	-0,064	-0,075	-0,043	0,056	
			F	1,5220	0,006	0,006	0,025	0,095	0,53	
-37,5	-0,059	-0,065	-0,002	-0,178	-0,197	-0,010	-0,349	-0,399	-0,029	h=±13,5 0,343
			-0,002	-0,108	-0,174	-0,010	-0,204	-0,351	-0,029	
			-0,002	-0,049	-0,154	-0,010	-0,080	-0,311	-0,029	
-43,5	-0,018	-0,051	-0,002	0,011	-0,135	-0,010	0,045	-0,270	-0,029	h=±8,5 0,122
-46,5	0,001	-0,044	-0,002	0,070	-0,115	-0,010	0,171	-0,231	-0,029	
-49,5	0,020	-0,038	-0,002							
5,34	146,23	106,99 38,87 -139,40	C	1,5139	0,071	0,060	0,072	0,133	0,261	
			D	1,5163	-0,017	-0,008	0,008	0,080	0,236	
			F	1,5220	0,032	0,050	0,108	0,218	0,434	
-37,5	-0,066	-0,067	-0,002	-0,197	-0,203	-0,010	-0,389	-0,412	-0,029	h=±13,5 0,343
			-0,002	-0,128	-0,181	-0,010	-0,245	-0,365	-0,030	



-43,5	-0,024	-0,053	-0,002	-0,069	-0,161	-0,010	-0,121	-0,325	-0,030	$h=\pm 8,5$ 0,122
-46,5	-0,005	-0,047	-0,002	-0,010	-0,142	-0,010	0,004	-0,284	-0,030	
-49,5	0,013	-0,040	-0,002	0,050	-0,122	-0,010	0,130	-0,243	-0,030	
5,38	146,08	C D F	1,6213	1,5139	0,093	0,101	0,145	0,443	0,434	
			1,6259	1,5163	0,005	0,026	0,084	0,194	0,404	
			1,6373	1,5220	0,052	0,096	0,184	0,341	0,608	
-37,5	-0,069	-0,068	-0,002	-0,207	-0,207	-0,010	-0,409	-0,419	-0,030	$h=\pm 13,5$ 0,342
-40,5	-0,050	-0,062	-0,002	-0,148	-0,187	-0,010	-0,286	-0,379	-0,030	
-43,5	-0,031	-0,055	-0,002	-0,090	-0,168	-0,010	-0,163	-0,339	-0,031	
-46,5	-0,012	-0,049	-0,002	-0,031	-0,149	-0,011	-0,039	-0,298	-0,031	$h=\pm 8,5$ 0,120
-49,5	0,006	-0,043	-0,002	0,029	-0,129	-0,011	0,087	-0,258	-0,031	
5,42	145,94	C D F	1,6213	1,5139	0,114	0,147	0,217	0,356	0,592	
			1,6259	1,5163	0,027	0,070	0,152	0,303	0,568	
			1,6373	1,5220	0,077	0,141	0,253	0,456	0,773	
-37,5	-0,076	-0,070	-0,002	-0,227	-0,213	-0,011	-0,450	-0,432	-0,030	$h=\pm 13,5$ 0,342
-40,5	-0,057	-0,064	-0,002	-0,169	-0,194	-0,011	-0,329	-0,393	-0,031	
-43,5	-0,038	-0,058	-0,002	-0,111	-0,175	-0,011	-0,206	-0,353	-0,031	
-46,5	-0,020	-0,051	-0,002	-0,052	-0,156	-0,011	-0,083	-0,312	-0,032	$h=\pm 8,5$ 0,120
-49,5	-0,001	-0,045	-0,002	0,007	-0,136	-0,011	0,042	-0,273	-0,032	
5,46	145,79	C D F	1,6213	1,5139	0,137	0,182	0,286	0,457	0,748	
			1,6259	1,5163	0,050	0,108	0,225	0,413	0,721	
			1,6373	1,5220	0,093	0,180	0,328	0,559	0,931	
-37,5	-0,082	-0,072	-0,002	-0,248	-0,220	-0,010	-0,492	-0,447	-0,031	$h=\pm 13,5$ 0,342
-40,5	-0,064	-0,066	-0,002	-0,191	-0,201	-0,011	-0,372	-0,407	-0,031	
-43,5	-0,046	-0,060	-0,002	-0,133	-0,182	-0,011	-0,251	-0,368	-0,032	
-46,5	-0,027	-0,054	-0,002	-0,075	-0,163	-0,011	-0,128	-0,328	-0,032	$h=\pm 8,5$ 0,120
-49,5	-0,008	-0,048	-0,002	-0,016	-0,144	-0,011	-0,004	-0,288	-0,032	

$f' = 150,0$ ;  $v_2 = 39,1$ ;  $v_3 = 64,1$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = -0,0010$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -43,5$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'										
					β = 3°, 5										
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16						
5, 16	146, 37	110, 92 40, 25 -135, 31	C	1, 5139	0, 038	-0, 026	-0, 098	-0, 151	-0, 158	h = ±13, 5 0, 255 h = ±8, 5 0, 053					
			D	1, 5163	-0, 070	-0, 124	-0, 184	-0, 225	-0, 219						
			F	1, 5220	-0, 077	-0, 118	-0, 149	-0, 154	-0, 095						
β = 2°															
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'						
5, 20	146, 22	107, 74 39, 81 -140, 37	C	1, 5139	0, 061	0, 019	-0, 022	-0, 034	0, 011	h = ±13, 5 0, 253 h = ±8, 5 0, 051					
			D	1, 5163	-0, 046	-0, 081	-0, 110	-0, 108	-0, 046						
			F	1, 5220	-0, 060	-0, 072	-0, 071	-0, 032	0, 080						
-37, 5 -40, 5 -43, 5 -46, 5 -49, 5	-0, 073 -0, 055 -0, 038 -0, 020 -0, 002	-0, 069 -0, 063 -0, 057 -0, 051 -0, 046	-0, 002	-0, 220	-0, 211	-0, 010	-0, 437	-0, 427	-0, 030	h = ±13, 5 0, 253 h = ±8, 5 0, 051					
			-0, 002	-0, 165	-0, 192	-0, 010	-0, 322	-0, 389	-0, 030						
			-0, 002	-0, 110	-0, 174	0, 011	-0, 206	-0, 352	-0, 031						
-46, 5 -49, 5	-0, 051 -0, 046	-0, 055 -0, 046	-0, 002	-0, 055	-0, 156	-0, 011	-0, 091	-0, 314	-0, 031	h = ±13, 5 0, 253 h = ±8, 5 0, 051					
			-0, 002	0, 000	-0, 138	-0, 011	0, 025	-0, 277	-0, 031						
5, 24	146, 07	104, 73 39, 38 -145, 83	C	1, 5139	0, 080	0, 058	0, 049	0, 078	0, 171	h = ±13, 5 0, 251					
			D	1, 5163	-0, 024	-0, 037	-0, 037	0, 007	0, 120						
			F	1, 5220	-0, 033	-0, 031	0, 006	0, 084	0, 246						
-37, 5 -40, 5	-0, 080 -0, 062	-0, 071 -0, 065	-0, 002	-0, 240	-0, 217	-0, 010	-0, 478	-0, 441	-0, 030	h = ±13, 5 0, 251					
			-0, 002	-0, 186	-0, 199	-0, 011	-0, 364	-0, 403	-0, 031						

-43,5	-0,045	-0,060	-0,002	-0,131	-0,181	-0,011	-0,249	-0,366	-0,032	$h=\pm 8,5$ 0,049
-46,5	-0,027	-0,054	-0,002	-0,076	-0,163	-0,011	-0,134	-0,328	-0,032	
-49,5	-0,009	-0,048	-0,002	-0,021	-0,145	-0,011	-0,018	-0,291	-0,032	
5,28	145,93	101,88	C	1,6213	0,101	0,097	0,121	0,187	0,332	
		38,96	D	1,6259	-0,006	0,003	0,034	0,112	0,276	
		-151,74	F	1,6373	-0,015	0,013	0,073	0,195	0,408	
-37,5	-0,086	-0,074	-0,002	-0,261	-0,224	-0,010	-0,520	-0,454	-0,031	$h=\pm 13,5$ 0,249
-40,5	-0,069	-0,068	-0,002	-0,207	-0,206	-0,011	-0,407	-0,418	-0,032	
-43,5	-0,052	-0,062	-0,002	-0,153	-0,188	-0,011	-0,293	-0,381	-0,032	
-46,5	-0,034	-0,056	-0,002	-0,098	-0,170	-0,011	-0,179	-0,343	-0,033	$h=\pm 8,5$ 0,047
-49,5	-0,017	-0,050	-0,002	-0,044	-0,153	-0,011	-0,064	-0,306	-0,033	
5,32	145,78	99,19	C	1,6213	0,119	0,141	0,189	0,293	0,477	
		38,54	D	1,6259	0,014	0,039	0,103	0,214	0,427	
		-158,16	F	1,6373	0,004	0,051	0,141	0,299	0,562	
-37,5	-0,093	-0,076	-0,002	-0,282	-0,231	-0,011	-0,562	-0,469	-0,031	$h=\pm 13,5$ 0,247
-40,5	-0,076	-0,070	-0,002	-0,228	-0,213	-0,011	-0,451	-0,432	-0,032	
-43,5	-0,059	-0,064	-0,002	-0,175	-0,196	-0,011	-0,339	-0,396	-0,033	
-46,5	-0,042	-0,059	-0,002	-0,121	-0,178	-0,011	-0,225	-0,359	-0,033	$h=\pm 8,5$ 0,045
-49,5	-0,024	-0,053	-0,002	-0,067	-0,160	-0,012	-0,111	-0,322	-0,034	
5,36	145,63	96,63	C	1,6213	0,135	0,173	0,248	0,386	0,622	
		38,14	D	1,6259	0,031	0,078	0,164	0,315	0,571	
		-165,17	F	1,6373	0,020	0,087	0,204	0,398	0,709	
-37,5	-0,100	-0,078	-0,002	-0,303	-0,238	-0,011	-0,606	-0,483	-0,032	$h=\pm 13,5$ 0,245
-40,5	-0,083	-0,072	-0,002	-0,251	-0,221	-0,011	-0,496	-0,447	-0,033	
-43,5	-0,066	-0,067	-0,002	-0,198	-0,203	-0,012	-0,385	-0,411	-0,033	
-46,5	-0,049	-0,061	-0,002	-0,144	-0,186	-0,012	-0,273	-0,375	-0,034	$h=\pm 8,5$ 0,044
-49,5	-0,032	-0,055	-0,002	-0,091	-0,168	-0,012	-0,159	-0,338	-0,034	

$$f' = 150, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16
5, 06	146, 21	108, 49 40, 79 -141, 35	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 052	-0, 027	-0, 096	-0, 179	-0, 220
					-0, 074	-0, 141	-0, 215	-0, 280	-0, 304
					-0, 142	-0, 191	-0, 241	-0, 268	-0, 254
β = 3°, 5					β = 5°				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-37, 5	-0, 083	-0, 072	-0, 002	-0, 252	-0, 221	-0, 010	-0, 502	-0, 448	-0, 030
-40, 5	-0, 067	-0, 067	-0, 002	-0, 200	-0, 204	-0, 011	-0, 395	-0, 412	-0, 031
-43, 5	-0, 050	-0, 061	-0, 002	-0, 149	-0, 187	-0, 011	-0, 288	-0, 377	-0, 032
-46, 5	-0, 034	-0, 056	-0, 002	-0, 098	-0, 170	-0, 011	-0, 181	-0, 343	-0, 032
-49, 5	-0, 018	-0, 051	-0, 002	-0, 047	-0, 153	-0, 011	-0, 074	-0, 308	-0, 032
5, 10	146, 06	105, 44 40, 34 -146, 89	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 070	0, 019	-0, 039	-0, 071	-0, 063
					-0, 058	-0, 100	-0, 145	-0, 170	-0, 145
					-0, 120	-0, 152	-0, 170	-0, 156	-0, 089
-37, 5	-0, 090	-0, 075	-0, 002	-0, 272	-0, 227	-0, 011	-0, 544	-0, 461	-0, 031
-40, 5	-0, 073	-0, 069	-0, 002	-0, 221	-0, 211	-0, 011	-0, 438	-0, 427	-0, 032
-43, 5	-0, 057	-0, 064	-0, 002	-0, 170	-0, 194	-0, 011	-0, 332	-0, 392	-0, 032
-46, 5	-0, 041	-0, 058	-0, 002	-0, 120	-0, 177	-0, 011	-0, 225	-0, 357	-0, 033
-49, 5	-0, 025	-0, 053	-0, 002	-0, 069	-0, 160	-0, 011	-0, 119	-0, 323	-0, 033
5, 14	145, 92	102, 56 39, 90 -152, 89	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 086	0, 056	0, 036	0, 035	0, 089
					-0, 036	-0, 059	-0, 075	-0, 065	0, 009
					-0, 106	-0, 110	-0, 100	-0, 050	0, 067
-37, 5	-0, 097	-0, 077	-0, 002	-0, 293	-0, 234	-0, 011	-0, 586	-0, 475	-0, 031
-40, 5	-0, 081	-0, 071	-0, 002	-0, 242	-0, 218	-0, 011	-0, 481	-0, 441	-0, 032

-43,5	-0,064	-0,066	-0,002	-0,192	-0,201	-0,011	-0,376	-0,407	-0,033
-46,5	-0,048	-0,061	-0,002	-0,142	-0,185	-0,012	-0,271	-0,372	-0,034
-49,5	-0,032	-0,055	-0,002	-0,091	-0,168	-0,012	-0,165	-0,338	-0,034
5,18	145,77	99,83 39,46 -159,42	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,106 -0,017 -0,081	0,097 -0,024 -0,074	0,099 -0,010 -0,036	0,121 0,039 0,053	0,234 0,152 0,218
-37,5	-0,104	-0,079	-0,002	-0,314	-0,241	-0,011	-0,629	-0,490	-0,032
-40,5	-0,088	-0,074	-0,002	-0,264	-0,225	-0,011	-0,526	-0,456	-0,033
-43,5	-0,072	-0,068	-0,002	-0,215	-0,209	-0,012	-0,422	-0,422	-0,034
-46,5	-0,056	-0,063	-0,002	-0,165	-0,192	-0,012	-0,317	-0,388	-0,034
-49,5	-0,040	-0,058	-0,002	-0,115	-0,176	-0,012	-0,212	-0,354	-0,035
5,22	145,62	97,24 39,04 -166,54	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,130 0,000 -0,068	0,128 0,012 -0,037	0,161 0,049 0,027	0,227 0,131 0,147	0,371 0,292 0,357
-37,5	-0,111	-0,081	-0,002	-0,336	-0,249	-0,011	-0,673	-0,504	-0,032
-40,5	-0,095	-0,076	-0,002	-0,287	-0,232	-0,012	-0,572	-0,471	-0,034
-43,5	-0,079	-0,071	-0,002	-0,238	-0,216	-0,012	-0,469	-0,438	-0,034
-46,5	-0,064	-0,066	-0,002	-0,189	-0,200	-0,012	-0,366	-0,404	-0,035
-49,5	-0,048	-0,061	-0,002	-0,139	-0,184	-0,012	-0,262	-0,370	-0,036
5,26	145,47	94,78 38,62 -174,35	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,141 0,016 -0,051	0,162 0,045 -0,002	0,214 0,107 0,086	0,315 0,222 0,239	0,501 0,423 0,492
-37,5	-0,118	-0,084	-0,002	-0,358	-0,256	-0,011	-0,718	-0,519	-0,033
-40,5	-0,103	-0,079	-0,002	-0,310	-0,240	-0,012	-0,618	-0,487	-0,034
-43,5	-0,087	-0,074	-0,002	-0,262	-0,224	-0,012	-0,517	-0,454	-0,035
-46,5	-0,072	-0,068	-0,002	-0,213	-0,208	-0,012	-0,415	-0,421	-0,036
-49,5	-0,056	-0,063	-0,002	-0,165	-0,192	-0,013	-0,312	-0,387	-0,037

$$f' = 150, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16
4, 97	146, 15	104, 70 41, 51 -141, 38	C	1, 5155	0, 000	-0, 053	-0, 103	-0, 135	-0, 127
			D	1, 5181	-0, 053	-0, 096	-0, 136	-0, 153	-0, 126
			F	1, 5243	0, 105	0, 089	0, 078	0, 100	0, 185
β = 2°									
β = 3°, 5									
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-52, 5	0, 011	-0, 042	-0, 002	0, 042	-0, 125	-0, 011	0, 112	-0, 250	-0, 031
-57, 0	0, 037	-0, 033	-0, 002	0, 122	-0, 099	-0, 011	0, 284	-0, 195	-0, 031
-61, 5	0, 062	-0, 025	-0, 002	0, 203	-0, 073	-0, 011	0, 458	-0, 140	-0, 030
-66, 0	0, 087	-0, 016	-0, 002	0, 284	-0, 047	-0, 010	0, 633	-0, 085	-0, 029
-70, 5	0, 112	-0, 008	-0, 002	0, 364	-0, 020	-0, 009	0, 810	-0, 029	-0, 027
5, 03	145, 92	100, 49 40, 81 -149, 86	C	1, 5155	0, 030	0, 011	0, 005	0, 029	0, 114
			D	1, 5181	-0, 023	-0, 035	-0, 030	0, 009	0, 115
			F	1, 5243	0, 137	0, 148	0, 185	0, 269	0, 430
-52, 5 -57, 0 -61, 5 -66, 0 -70, 5	0, 000 0, 026 0, 051 0, 077 0, 102	-0, 045 -0, 037 -0, 028 -0, 020 -0, 011	-0, 002	0, 008	-0, 136	-0, 011	0, 045	-0, 273	-0, 033
			-0, 002	0, 089	-0, 110	-0, 011	0, 218	-0, 218	-0, 032
			-0, 002	0, 170	-0, 084	-0, 011	0, 392	-0, 162	-0, 032
			-0, 002	0, 252	-0, 057	-0, 011	0, 569	-0, 106	-0, 030
			-0, 002	0, 334	-0, 031	-0, 010	0, 749	-0, 050	-0, 029
5, 09	145, 70	96, 61 40, 13 -159, 45	C	1, 5155	0, 056	0, 066	0, 100	0, 178	0, 332
			D	1, 5181	0, 006	0, 024	0, 069	0, 163	0, 337
			F	1, 5243	0, 164	0, 203	0, 286	0, 426	0, 660
-52, 5 -57, 0	-0, 012 0, 014	-0, 049 -0, 041	-0, 002	-0, 027	-0, 148	-0, 012	-0, 026	-0, 296	-0, 034
			-0, 002	0, 054	-0, 122	-0, 012	0, 146	-0, 241	-0, 034

-61,5	0,040	-0,032	-0,002	0,135	-0,095	-0,012	0,321	-0,186	-0,033
-66,0	0,065	-0,024	-0,002	0,217	-0,069	-0,011	0,499	-0,129	-0,032
-70,5	0,091	-0,015	-0,002	0,300	-0,042	-0,011	0,681	-0,072	-0,031
5,15	145,48	93,01 39,47 -170,40	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,083 0,033 0,190	0,121 0,078 0,261	0,192 0,162 0,381	0,320 0,307 0,572	0,539 0,546 0,874
-52,5	-0,024	-0,053	-0,002	-0,064	-0,161	-0,012	-0,102	-0,322	-0,035
-57,0	0,002	-0,045	-0,002	0,016	-0,134	-0,012	0,069	-0,267	-0,036
-61,5	0,027	-0,036	-0,002	0,097	-0,108	-0,012	0,244	-0,211	-0,035
-66,0	0,053	-0,028	-0,002	0,179	-0,081	-0,012	0,423	-0,155	-0,034
-70,5	0,079	-0,019	-0,002	0,262	-0,054	-0,011	0,606	-0,098	-0,033
5,21	145,25	89,68 38,84 -183,00	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,107 0,057 0,215	0,170 0,127 0,311	0,276 0,247 0,465	0,451 0,438 0,707	0,729 0,740 1,072
-52,5	-0,037	-0,057	-0,002	-0,103	-0,174	-0,013	-0,181	-0,348	-0,037
-57,0	-0,012	-0,049	-0,002	-0,024	-0,148	-0,013	-0,012	-0,294	-0,037
-61,5	0,014	-0,041	-0,002	0,056	-0,122	-0,013	0,161	-0,239	-0,037
-66,0	0,039	-0,032	-0,002	0,138	-0,095	-0,013	0,339	-0,183	-0,036
-70,5	0,065	-0,024	-0,002	0,221	-0,068	-0,012	0,523	-0,125	-0,035
5,27	145,03	86,57 38,22 -197,66	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,130 0,079 0,236	0,214 0,172 0,356	0,354 0,325 0,544	0,572 0,560 0,830	0,906 0,917 0,830
-52,5	-0,050	-0,062	-0,002	-0,145	-0,187	-0,013	-0,265	-0,376	-0,038
-57,0	-0,026	-0,054	-0,002	-0,067	-0,162	-0,013	-0,099	-0,323	-0,039
-61,5	0,000	-0,045	-0,003	0,012	-0,136	-0,013	0,073	-0,268	-0,039
-66,0	0,025	-0,037	-0,003	0,093	-0,110	-0,013	0,250	-0,212	-0,038
-70,5	0,050	-0,029	-0,002	0,176	-0,083	-0,013	0,433	-0,155	-0,038





-61,5 -66,0 -70,5	0,013 0,037 0,061	-0,041 -0,033 -0,025	-0,002 -0,002 -0,002	0,053 0,128 0,204	-0,122 -0,097 -0,073	-0,013 -0,012 -0,012	0,149 0,313 0,480	-0,241 -0,189 -0,137	-0,036 -0,036 -0,035	$h=\pm 8,5$ 0,103
5,08	145,32	91,25 39,79 -180,05	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,094 0,023 0,124	0,120 0,058 0,182	0,176 0,124 0,281	0,281 0,244 0,445	0,465 0,449 0,707	
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,047 -0,023 0,000 0,023 0,047	-0,061 -0,053 -0,045 -0,037 -0,030	-0,002 -0,002 -0,002 -0,002 -0,002	-0,135 -0,062 0,012 0,087 0,163	-0,184 -0,160 -0,135 -0,111 -0,087	-0,013 -0,013 -0,013 -0,013 -0,013	-0,249 -0,093 0,067 0,230 0,397	-0,369 -0,319 -0,268 -0,216 -0,164	-0,038 -0,038 -0,038 -0,038 -0,037	$h=\pm 13,5$ 0,306  $h=\pm 8,5$ 0,104
5,14	145,10	88,03 39,14 -194,21	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,115 0,045 0,146	0,166 0,102 0,227	0,253 0,202 0,360	0,401 0,365 0,568	0,640 0,624 0,887	
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,060 -0,037 -0,014 0,009 0,032	-0,065 -0,057 -0,050 -0,042 -0,034	-0,003 -0,003 -0,003 -0,003 -0,003	-0,176 -0,104 -0,031 0,043 0,119	-0,197 -0,174 -0,150 -0,126 -0,101	-0,013 -0,014 -0,014 -0,014 -0,014	-0,332 -0,178 -0,021 0,141 0,307	-0,397 -0,347 -0,297 -0,246 -0,194	-0,039 -0,040 -0,040 -0,040 -0,039	$h=\pm 13,5$ 0,309  $h=\pm 8,5$ 0,105
5,20	144,87	85,04 38,52 -210,84	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	0,136 0,064 0,165	0,207 0,144 0,268	0,324 0,273 0,433	0,510 0,474 0,681	0,799 0,785 1,053	
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,074 -0,052 -0,030 -0,007 0,016	-0,070 -0,062 -0,055 -0,047 -0,040	-0,003 -0,003 -0,003 -0,003 -0,003	-0,219 -0,149 -0,077 -0,004 0,070	-0,212 -0,189 -0,165 -0,141 -0,117	-0,014 -0,014 -0,014 -0,015 -0,015	-0,420 -0,269 -0,114 0,046 0,210	-0,426 -0,378 -0,328 -0,278 -0,226	-0,040 -0,041 -0,042 -0,042 -0,042	$h=\pm 13,5$ 0,312  $h=\pm 8,5$ 0,106

$f' = 150,0$ ;  $v_2 = 33,9$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = -0,0005$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -61,5$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					β = 3°, 5					
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16	
4, 85	145, 75	99, 00 41, 96 -158, 34	C	1, 5155	0, 042	-0, 010	-0, 063	-0, 103	-0, 109	
			D	1, 5181	-0, 052	-0, 095	-0, 138	-0, 154		
			F	1, 5243	-0, 006	-0, 029	-0, 046	0, 025		
			β = 5°							
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	
-52, 5	-0, 035	-0, 057	-0, 002	-0, 101	-0, 172	-0, 012	-0, 183	-0, 346	-0, 036	
-57, 0	-0, 013	-0, 049	-0, 002	-0, 052	-0, 149	-0, 012	-0, 036	-0, 298	-0, 036	
-61, 5	0, 008	-0, 042	-0, 002	0, 037	-0, 127	-0, 012	0, 112	-0, 251	-0, 036	
-66, 0	0, 030	-0, 035	-0, 002	0, 106	-0, 104	-0, 012	0, 261	-0, 204	-0, 036	
-70, 5	0, 052	-0, 028	-0, 002	0, 175	-0, 082	-0, 012	0, 411	-0, 157	-0, 035	
4, 92	145, 49	94, 63 41, 13 -171, 07	C	1, 5155	0, 069	0, 050	0, 040	0, 057	0, 123	
			D	1, 5181	-0, 021	-0, 034	-0, 033	-0, 004	0, 079	
			F	1, 5243	0, 022	0, 032	0, 061	0, 130	0, 264	
-52, 5	-0, 050	-0, 061	-0, 002	-0, 145	-0, 186	-0, 013	-0, 272	-0, 375	-0, 038	
-57, 0	-0, 028	-0, 054	-0, 002	-0, 077	-0, 164	-0, 013	-0, 127	-0, 329	-0, 038	
-61, 5	-0, 006	-0, 047	-0, 002	-0, 008	-0, 142	-0, 013	0, 020	-0, 282	-0, 038	
-66, 0	0, 015	-0, 040	-0, 002	0, 061	-0, 119	-0, 013	0, 169	-0, 234	-0, 038	
-70, 5	0, 037	-0, 033	-0, 002	0, 130	-0, 097	-0, 013	0, 321	-0, 187	-0, 037	
4, 99	145, 23	90, 62 40, 33 -186, 08	C	1, 5155	0, 096	0, 105	0, 135	0, 202	0, 334	
			E	1, 5181	0, 005	0, 021	0, 061	0, 142	0, 292	
			F	1, 5243	0, 052	0, 087	0, 158	0, 278	0, 481	
-52, 5	-0, 065	-0, 066	-0, 003	-0, 192	-0, 202	-0, 013	-0, 367	-0, 407	-0, 039	
-57, 0	-0, 044	-0, 059	-0, 003	-0, 125	-0, 180	-0, 014	-0, 224	-0, 361	-0, 040	
					h = ±13, 5 0, 274					

-61,5	-0,022	-0,052	-0,003	-0,057	-0,158	-0,014	-0,079	-0,315	-0,040	$h=\pm 8,5$ 0,096
-66,0	-0,001	-0,045	-0,003	0,011	-0,136	-0,014	0,069	-0,268	-0,040	
-70,5	0,020	-0,038	-0,003	0,080	-0,114	-0,014	0,220	-0,220	-0,040	
5,06	144,98	86,95 39,55 -204,04	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,122 0,029 0,075	0,156 0,071 0,137	0,218 0,145 0,242	0,332 0,273 0,412	0,524 0,484 0,677	
-52,5	-0,081	-0,072	-0,003	-0,241	-0,218	-0,014	-0,468	-0,440	-0,041	$h=\pm 13,5$ 0,273
-57,0	-0,061	-0,065	-0,003	-0,176	-0,197	-0,014	-0,328	-0,396	-0,042	
-61,5	-0,040	-0,058	-0,003	-0,110	-0,175	-0,015	-0,186	-0,350	-0,043	
-66,0	-0,019	-0,051	-0,003	-0,043	-0,154	-0,015	-0,304	-0,304	-0,043	$h=\pm 8,5$ 0,095
-70,5	0,002	-0,044	-0,003	0,025	-0,132	-0,015	0,110	-0,257	-0,043	
5,13	144,72	83,56 38,81 -225,94	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,142 0,050 0,094	0,198 0,113 0,180	0,293 0,220 0,318	0,448 0,389 0,530	0,693 0,654 0,852	
-52,5	-0,098	-0,078	-0,003	-0,293	-0,236	-0,015	-0,573	-0,475	-0,043	$h=\pm 13,5$ 0,272
-57,0	-0,078	-0,071	-0,003	-0,230	-0,215	-0,015	-0,439	-0,432	-0,044	
-61,5	-0,058	-0,064	-0,003	-0,166	-0,194	-0,016	-0,300	-0,388	-0,045	
-66,0	-0,038	-0,058	-0,003	-0,101	-0,173	-0,016	-0,158	-0,343	-0,046	$h=\pm 8,5$ 0,093
-70,5	-0,017	-0,051	-0,003	-0,035	-0,152	-0,016	-0,011	-0,297	-0,046	
5,20	144,46	80,42 38,10 -253,21	C 1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,161 0,070 0,110	0,236 0,151 0,217	0,358 0,284 0,383	0,548 0,490 0,634	0,839 0,804 1,005	
-52,5	-0,116	-0,083	-0,003	-0,348	-0,254	-0,015	-0,684	-0,512	-0,045	$h=\pm 13,5$ 0,271
-57,0	-0,097	-0,077	-0,003	-0,288	-0,234	-0,016	-0,555	-0,471	-0,046	
-61,5	-0,078	-0,071	-0,003	-0,225	-0,214	-0,016	-0,422	-0,429	-0,048	
-66,0	-0,058	-0,064	-0,003	-0,164	-0,194	-0,017	-0,284	-0,385	-0,048	$h=\pm 8,5$ 0,092
-70,5	-0,038	-0,058	-0,003	-0,099	-0,173	-0,017	-0,141	-0,340	-0,049	

$f' = 150,0; \quad v_2 = 33,9; \quad v_3 = 58,9; \quad d_1 = 2,5; \quad d_2 = 8,0; \quad c = -0,0010; \quad \text{кома для } \beta = 5^\circ \text{ и } s = -61,5$ 

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16
4, 80	145, 52	95, 76 42, 07 -170, 42	C	1, 5155	0, 063	0, 016	-0, 034	-0, 073	-0, 079
			D	1, 5181	-0, 048	-0, 090	-0, 130	-0, 157	-0, 148
			F	1, 5243	-0, 059	-0, 080	-0, 095	-0, 087	-0, 034
			β = 5°						
		β = 2°	β = 3°, 5						
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
-52, 5	-0, 061	-0, 065	-0, 002	-0, 179	-0, 197	-0, 013	-0, 345	-0, 398	-0, 038
-57, 0	-0, 041	-0, 058	-0, 003	-0, 117	-0, 177	-0, 013	-0, 211	-0, 355	-0, 039
-61, 5	-0, 021	-0, 052	-0, 003	-0, 054	-0, 156	-0, 014	-0, 077	-0, 312	-0, 040
-66, 0	-0, 001	-0, 045	-0, 003	0, 009	-0, 136	-0, 014	0, 059	-0, 269	-0, 040
-70, 5	0, 018	-0, 039	-0, 003	0, 072	-0, 116	-0, 014	0, 195	-0, 226	-0, 039
4, 87	145, 26	91, 66 41, 23 -185, 31	C	1, 5155	0, 089	0, 070	0, 058	0, 071	0, 128
			D	1, 5181	-0, 022	-0, 035	-0, 037	-0, 013	0, 061
			F	1, 5243	-0, 034	-0, 026	-0, 002	0, 057	0, 179
			h = ±13, 5 0, 173						
			h = ±8, 5 0, 009						
-52, 5 -57, 0 -61, 5 -66, 0 -70, 5	-0, 076 -0, 057 -0, 037 -0, 017 0, 002	-0, 070 -0, 064 -0, 057 -0, 051 -0, 044	-0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003	-0, 226 -0, 165 -0, 103 -0, 041 0, 021	-0, 213 -0, 193 -0, 173 -0, 152 -0, 132	-0, 014 -0, 014 -0, 014 -0, 014 -0, 015	-0, 440 -0, 309 -0, 177 -0, 042 0, 094	-0, 430 -0, 388 -0, 345 -0, 303 -0, 260	-0, 040 -0, 041 -0, 042 -0, 042 -0, 042
4, 94	145, 00	87, 90 40, 42 -203, 12	C	1, 5155	0, 113	0, 118	0, 141	0, 199	0, 314
			D	1, 5181	0, 002	0, 014	0, 046	0, 116	0, 250
			F	1, 5243	-0, 009	0, 022	0, 083	0, 190	0, 371
			h = ±13, 5 0, 157						
-52, 5 -57, 0	-0, 092 -0, 073	-0, 075 -0, 069	-0, 003 -0, 003	-0, 276 -0, 216	-0, 229 -0, 210	-0, 014 -0, 015	-0, 541 -0, 414	-0, 463 -0, 422	-0, 042 -0, 043

 $h = \pm 13,5$   
 $0,173$   
 $h = \pm 8,5$   
 $0,009$   
 $h = \pm 13,5$   
 $0,165$   
 $h = \pm 8,5$   
 $0,024$

-61,5 -66,0 -70,5	-0,054 -0,035 -0,016	-0,063 -0,056 -0,050	-0,003 -0,003 -0,003	-0,156 -0,095 -0,034	-0,190 -0,170 -0,151	-0,015 -0,015 -0,015	-0,284 -0,152 -0,017	-0,381 -0,339 -0,297	-0,044 -0,045 -0,045	$h=\pm 8,5$ 0,038
5,01	144,74	84,44 39,65 -224,79	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,135 0,023 0,011	0,162 0,056 0,066	0,214 0,119 0,158	0,312 0,230 0,306	0,479 0,416 0,542
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,110 -0,091 -0,073 -0,054 -0,036	-0,081 -0,075 -0,069 -0,063 -0,057	-0,003 -0,003 -0,003 -0,003 -0,003	-0,328 -0,271 -0,213 -0,154 -0,094	-0,247 -0,228 -0,209 -0,190 -0,170	-0,015 -0,016 -0,016 -0,016 -0,017	-0,647 -0,524 -0,399 -0,270 -0,138	-0,499 -0,459 -0,419 -0,378 -0,337	-0,044 -0,045 -0,046 -0,047 -0,048	$h=\pm 13,5$ 0,149  $h=\pm 8,5$ 0,052
5,08	144,48	81,24 38,90 -251,76	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,154 0,041 0,026	0,199 0,093 0,101	0,278 0,183 0,221	0,411 0,329 0,407	0,623 0,561 0,690
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,128 -0,110 -0,093 -0,075 -0,057	-0,087 -0,081 -0,076 -0,070 -0,064	-0,003 -0,003 -0,003 -0,003 -0,003	-0,383 -0,329 -0,273 -0,216 -0,158	-0,265 -0,247 -0,229 -0,211 -0,192	-0,016 -0,016 -0,017 -0,017 -0,018	-0,759 -0,641 -0,521 -0,397 -0,269	-0,536 -0,498 -0,460 -0,421 -0,381	-0,045 -0,047 -0,049 -0,050 -0,051	$h=\pm 13,5$ 0,141  $h=\pm 8,5$ 0,066
5,15	144,22	78,27 38,18 -286,22	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,170 0,056 0,041	0,229 0,125 0,132	0,330 0,237 0,274	0,493 0,414 0,493	0,746 0,685 0,820
-52,5 -57,0 -61,5 -66,0 -70,5	-0,146 -0,130 -0,114 -0,097 -0,080	-0,093 -0,088 -0,083 -0,077 -0,072	-0,003 -0,003 -0,003 -0,003 -0,004	-0,441 -0,389 -0,337 -0,283 -0,228	-0,284 -0,267 -0,250 -0,233 -0,215	-0,016 -0,017 -0,018 -0,018 -0,019	-0,875 -0,765 -0,650 -0,532 -0,409	-0,574 -0,539 -0,503 -0,465 -0,427	-0,047 -0,049 -0,051 -0,053 -0,054	$h=\pm 13,5$ 0,135  $h=\pm 8,5$ 0,080

$$f' = 150, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'									
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16					
4,73	145, 36	93, 88 42, 42 -180, 07	C	1, 5155	0, 076	0, 023	-0, 038	-0, 091	-0, 120					
			D	1, 5181	-0, 054	-0, 104	-0, 154	-0, 197	-0, 212					
			F	1, 5243	-0, 122	-0, 153	-0, 179	-0, 190	-0, 164					
β = 2°					β = 3°, 5					β = 5°				
S	s <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		
-52, 5 -57, 0 -61, 5 -66, 0 -70, 5	-0, 082 -0, 064 -0, 046 -0, 028 -0, 011	-0, 072 -0, 056 -0, 060 -0, 054 -0, 048	-0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003	-0, 246 -0, 189 -0, 132 -0, 075 -0, 019	-0, 219 -0, 200 -0, 182 -0, 163 -0, 145	-0, 014 -0, 014 -0, 015 -0, 015 -0, 015	-0, 482 -0, 361 -0, 240 -0, 118 0, 005	-0, 442 -0, 403 -0, 364 -0, 326 -0, 287	-0, 040 -0, 042 -0, 042 -0, 043 -0, 043					
4, 80	145, 10	89, 94 41, 57 -196, 81	C	1, 5155	0, 101	0, 073	0, 048	0, 040	0, 070					
			D	1, 5181	-0, 031	-0, 053	-0, 070	-0, 066	-0, 022					
			F	1, 5243	-0, 097	-0, 102	-0, 094	-0, 056	0, 030					
-52, 5 -57, 0 -61, 5 -66, 0 -70, 5	-0, 098 -0, 081 -0, 063 -0, 046 -0, 028	-0, 077 -0, 071 -0, 066 -0, 060 -0, 054	-0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003 -0, 003	-0, 295 -0, 239 -0, 184 -0, 129 -0, 073	-0, 235 -0, 217 -0, 199 -0, 181 -0, 163	-0, 014 -0, 015 -0, 015 -0, 016 -0, 016	-0, 581 -0, 464 -0, 345 -0, 225 -0, 104	-0, 475 -0, 438 -0, 400 -0, 361 -0, 323	-0, 042 -0, 044 -0, 045 -0, 045 -0, 046					
4, 87	144, 84	86, 32 40, 75 -217, 07	C	1, 5155	0, 124	0, 117	0, 122	0, 155	0, 236					
			D	1, 5181	-0, 009	-0, 009	0, 005	0, 050	0, 147					
			F	1, 5243	-0, 077	-0, 059	-0, 019	0, 061	0, 204					
-52, 5 -57, 0	-0, 115 -0, 098	-0, 083 -0, 077	-0, 003	-0, 346	-0, 252	-0, 015	-0, 686	-0, 510	-0, 044					
			-0, 003	-0, 293	-0, 235	-0, 016	-0, 574	-0, 474	-0, 046					

-61,5	-0,081	-0,072	-0,003	-0,240	-0,217	-0,016	-0,458	-0,437	-0,047
-66,0	-0,065	-0,066	-0,003	-0,186	-0,200	-0,017	-0,342	-0,400	-0,048
-70,5	-0,048	-0,061	-0,003	-0,132	-0,183	-0,017	-0,223	-0,363	-0,049
4,94	144,58	82,98 39,96 -242,08	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,142 0,009 -0,059	0,155 0,028 -0,022	0,187 0,070 0,047	0,256 0,151 0,165	0,383 0,296 0,356
-52,5	-0,133	-0,089	-0,003	-0,401	-0,270	-0,016	-0,796	-0,547	-0,046
-57,0	-0,117	-0,083	-0,003	-0,350	-0,254	-0,016	-0,689	-0,512	-0,048
-61,5	-0,101	-0,078	-0,003	-0,299	-0,237	-0,017	-0,579	-0,477	-0,049
-66,0	-0,084	-0,073	-0,003	-0,248	-0,221	-0,017	-0,467	-0,442	-0,051
-70,5	-0,069	-0,068	-0,003	-0,196	-0,104	-0,018	-0,352	-0,406	-0,052
5,01	144,32	79,88 39,21 -273,72	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,159 0,025 -0,046	0,188 0,061 0,010	0,242 0,126 0,104	0,346 0,238 0,252	0,509 0,422 0,487
-52,5	-0,152	-0,095	-0,003	-0,457	-0,289	-0,016	-0,912	-0,585	-0,048
-57,0	-0,137	-0,090	-0,003	-0,410	-0,274	-0,017	-0,811	-0,553	-0,049
-61,5	-0,122	-0,085	-0,003	-0,352	-0,258	-0,018	-0,707	-0,520	-0,052
-66,0	-0,106	-0,080	-0,003	-0,314	-0,242	-0,018	-0,600	-0,486	-0,054
-70,5	-0,091	-0,075	-0,004	-0,264	-0,226	-0,019	-0,490	-0,452	-0,055
5,08	144,07	77,01 38,47 -315,05	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,172 0,038 -0,032	0,213 0,087 0,036	0,288 0,171 0,149	0,412 0,309 0,325	0,614 0,528 0,596
-52,5	-0,171	-0,101	-0,003	-0,517	-0,309	-0,017	-1,033	-0,625	-0,049
-57,0	-0,157	-0,097	-0,003	-0,473	-0,295	-0,018	-0,939	-0,595	-0,052
-61,5	-0,143	-0,092	-0,003	-0,429	-0,280	-0,019	-0,842	-0,565	-0,054
-66,0	-0,129	-0,088	-0,004	-0,384	-0,266	-0,019	-0,741	-0,533	-0,057
-70,5	-0,115	-0,083	-0,004	-0,337	-0,251	-0,020	-0,638	-0,501	-0,058

$$f' = 150, 0; \quad \nu_2 = 33, 9; \quad \nu_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'									
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16					
4, 75	144, 55	83, 12	C	1, 5139	0, 018	-0, 008	-0, 030	-0, 038	-0, 012					
		41, 26	D	1, 5163	-0, 027	-0, 046	-0, 060	-0, 056	-0, 014					
		-246, 45	F	1, 5220	0, 111	0, 109	0, 121	0, 161	0, 249					
β = 2°					β = 3°, 5					β = 5°				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		
- 75, 0	-0, 090	-0, 074	-0, 004	-0, 260	-0, 224	-0, 020	-0, 482	-0, 448	-0, 057					
- 90, 0	-0, 047	-0, 060	-0, 004	-0, 119	-0, 180	-0, 021	-0, 158	-0, 350	-0, 060					
-105, 0	-0, 005	-0, 047	-0, 004	0, 026	-0, 135	-0, 021	0, 197	-0, 247	-0, 059					
-120, 0	0, 036	-0, 034	-0, 004	0, 176	-0, 090	-0, 022	0, 594	-0, 139	-0, 058					
-150, 0	0, 119	-0, 007	-0, 003	0, 512	0, 006	-0, 016	1, 593	0, 111	-0, 038					
4, 82	144, 29	80, 02	C	1, 5139	0, 033	0, 021	0, 020	0, 040	0, 100					
		40, 45	D	1, 5163	-0, 012	-0, 017	-0, 010	0, 023	0, 102					
		-279, 34	F	1, 5220	0, 123	0, 138	0, 174	0, 242	0, 368					
- 75, 0	-0, 114	-0, 082	-0, 004	-0, 333	-0, 249	-0, 021	-0, 630	-0, 497	-0, 060					
- 90, 0	-0, 074	-0, 069	-0, 004	-0, 199	-0, 207	-0, 023	-0, 318	-0, 404	-0, 065					
-105, 0	-0, 034	-0, 056	-0, 004	-0, 059	-0, 163	-0, 023	0, 028	-0, 304	-0, 066					
-120, 0	0, 007	-0, 043	-0, 004	0, 089	-0, 119	-0, 024	0, 416	-0, 203	-0, 077					
-150, 0	0, 090	-0, 017	-0, 004	0, 427	-0, 023	-0, 020	1, 440	0, 056	-0, 048					
4, 89	144, 03	77, 14	C	1, 5139	0, 046	0, 046	0, 060	0, 103	0, 183					
		39, 68	D	1, 5163	-0, 001	0, 008	0, 032	0, 088	0, 197					
		-322, 55	F	1, 5220	0, 134	0, 161	0, 214	0, 308	0, 466					
- 75, 0	-0, 139	-0, 091	-0, 004	-0, 411	-0, 275	-0, 022	-0, 788	-0, 550	-0, 064					
- 90, 0	-0, 102	-0, 079	-0, 004	-0, 287	-0, 236	-0, 024	-0, 495	-0, 463	-0, 070					



-105,0	-0,065	-0,066	-0,005	-0,155	-0,195	-0,026	-0,162	-0,368	-0,073
-120,0	-0,026	-0,054	-0,005	-0,012	-0,154	-0,029	0,225	-0,264	-0,073
-150,0	0,054	-0,029	-0,005	0,322	-0,059	-0,024	1,244	-0,013	-0,060
4,96	143,77	74,46 38,93 -381,83	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,055 0,008 0,140	0,064 0,025 0,177	0,092 0,063 0,245	0,153 0,138 0,359	0,268 0,271 0,542
-75,0	-0,166	-0,100	-0,004	-0,494	-0,302	-0,024	-0,956	-0,606	-0,068
-90,0	-0,134	-0,089	-0,005	-0,382	-0,267	-0,026	-0,686	-0,527	-0,076
-105,0	-0,100	-0,078	-0,005	-0,260	-0,230	-0,028	-0,375	-0,441	-0,083
-120,0	-0,063	-0,066	-0,005	-0,125	-0,191	-0,028	-0,001	-0,340	-0,081
-150,0	0,011	-0,043	-0,006	0,195	-0,102	-0,029	1,004	-0,097	-0,074
5,03	143,51	71,96 38,21 -468,18	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5270	0,062 0,014 0,144	0,076 0,037 0,188	0,114 0,085 0,265	0,188 0,172 0,392	0,323 0,325 0,597
-75,0	-0,196	-0,109	-0,005	-0,582	-0,332	-0,025	-1,135	-0,666	-0,072
-90,0	-0,168	-0,100	-0,005	-0,484	-0,302	-0,028	-0,894	-0,596	-0,082
-105,0	-0,138	-0,091	-0,006	-0,376	-0,270	-0,031	-0,606	-0,518	-0,089
-120,0	-0,107	-0,081	-0,006	-0,254	-0,234	-0,033	-0,255	-0,426	-0,092
-150,0	-0,039	-0,060	-0,007	0,047	-0,152	-0,034	0,721	-0,195	-0,088
5,10	143,25	69,62 37,51 -605,64	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,066 0,016 0,145	0,084 0,043 0,194	0,126 0,096 0,277	0,207 0,193 0,415	0,353 0,357 0,633
-75,0	-0,226	-0,120	-0,005	-0,676	-0,363	-0,026	-1,325	-0,729	-0,077
-90,0	-0,204	-0,112	-0,006	-0,594	-0,338	-0,030	-1,116	-0,671	-0,088
-105,0	-0,181	-0,106	-0,007	-0,501	-0,310	-0,033	-0,847	-0,593	-0,078
-120,0	-0,154	-0,097	-0,007	-0,394	-0,281	-0,036	-0,535	-0,521	-0,102
-150,0	-0,095	-0,079	-0,008	-0,121	-0,208	-0,040	-0,396	-0,307	-0,104

$f' = 150,0$ ;  $v_2 = 33,9$ ;  $v_3 = 64,1$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = 0,0000$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -105$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = ±13,5 0,159
					β = 3°, 5						
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16		
4, 67	144, 36	81, 25 41, 41 -271, 85	C	1, 5139	0, 031	-0, 005	-0, 042	-0, 067	-0, 066		
			D	1, 5163	-0, 036	-0, 065	-0, 092	-0, 106	-0, 091		
			F	1, 5220	0, 046	0, 033	0, 030	0, 048	0, 107		
			β = 5°								
4, 77	144, 10	78, 29 40, 60 -312, 56	C	1, 5139	0, 042	0, 019	0, 001	-0, 003	0, 029		
			D	1, 5163	-0, 024	-0, 040	-0, 050	-0, 041	0, 005		
			F	1, 5220	0, 056	0, 056	0, 074	0, 115	0, 204		
			h = ±8, 5 0, 065								
4, 84	143, 84	75, 53 39, 82 -367, 85	C	1, 5139	0, 051	0, 040	0, 032	0, 048	0, 102		
			D	1, 5163	-0, 015	-0, 022	-0, 019	0, 009	0, 080		
			F	1, 5220	0, 063	0, 075	0, 134	0, 166	0, 282		
			h = ±8, 5 0, 061								
4, 84	143, 84	75, 53 39, 82 -367, 85	C	1, 5139	0, 051	0, 040	0, 032	0, 048	0, 102		
			D	1, 5163	-0, 015	-0, 022	-0, 019	0, 009	0, 080		
			F	1, 5220	0, 063	0, 075	0, 134	0, 166	0, 282		
			h = ±13, 5 0, 193								

-105,0	-0,123	-0,086	-0,006	-0,337	-0,255	-0,029	-0,550	-0,493	-0,084	$h=\pm 8,5$ 0,057
-120,0	-0,095	-0,077	-0,006	-0,229	-0,223	-0,031	-0,247	-0,413	-0,087	
-150,0	-0,039	-0,060	-0,006	0,020	-0,156	-0,032	0,563	-0,221	-0,085	
4,91	143,58	72,96 39,06 -447,26	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,059 -0,008 0,066	0,052 -0,009 0,086	0,057 0,004 0,126	0,084 0,045 0,203	0,157 0,134 0,339	
-75,0	-0,206	-0,113	-0,005	-0,618	-0,343	-0,025	-1,213	-0,690	-0,074	$h=\pm 13,5$ 0,187
-90,0	-0,184	-0,106	-0,005	-0,538	-0,318	-0,029	-1,014	-0,633	-0,083	
-105,0	-0,163	-0,100	-0,007	-0,453	-0,294	-0,033	-0,780	-0,570	-0,092	
-120,0	-0,136	-0,090	-0,006	-0,356	-0,266	-0,034	-0,499	-0,499	-0,097	$h=\pm 8,5$ 0,053
-150,0	-0,088	-0,076	-0,007	-0,126	-0,205	-0,037	0,283	-0,318	-0,099	
4,98	143,32	70,55 38,34 -570,94	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,064 -0,005 0,068	0,060 -0,001 0,092	0,068 0,017 0,159	0,094 0,066 0,224	0,189 0,168 0,374	
-75,0	-0,237	-0,123	-0,005	-0,711	-0,374	-0,027	-1,402	-0,753	-0,078	$h=\pm 13,5$ 0,181
-90,0	-0,220	-0,118	-0,006	-0,647	-0,355	-0,031	-1,234	-0,707	-0,090	
-105,0	-0,204	-0,113	-0,007	-0,577	-0,335	-0,035	-1,032	-0,655	-0,101	
-120,0	-0,184	-0,106	-0,007	-0,496	-0,313	-0,038	-0,777	-0,593	-0,108	$h=\pm 8,5$ 0,049
-150,0	-0,144	-0,094	-0,008	-0,292	-0,261	-0,043	-0,040	-0,430	-0,115	
5,05	143,06	68,30 37,63 -750,30	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,065 -0,005 0,066	0,062 -0,001 0,091	0,072 0,020 0,140	0,110 0,073 0,231	0,201 0,180 0,388	
-75,0	-0,269	-0,134	-0,005	-0,809	-0,407	-0,028	-1,600	-0,819	-0,082	$h=\pm 13,5$ 0,173
-90,0	-0,258	-0,130	-0,006	-0,764	-0,394	-0,033	-1,470	-0,786	-0,096	
-105,0	-0,248	-0,128	-0,007	-0,712	-0,380	-0,039	-1,300	-0,744	-0,107	
-120,0	-0,234	-0,123	-0,008	-0,649	-0,364	-0,042	-1,082	-0,696	-0,114	$h=\pm 8,5$ 0,046
-150,0	-0,206	-0,115	-0,009	-0,480	-0,325	-0,049	-0,405	-0,555	-0,132	

$f' = 150,0$ ;  $v_s = 33,9$ ;  $v_g = 64,1$ ;  $d_1 = 2,5$ ;  $d_2 = 8,0$ ;  $c = -0,0005$ ; кома для  $\beta = 5^\circ$  и  $s = -105$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>8</sub>	$\Delta s'$					
					$\beta = 5^\circ$					
					$\beta = 3^\circ, 5$					
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	h
4,63	144,24	80,32 41,80 -291,09	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,038 -0,049 -0,023	-0,012 -0,091 -0,051	-0,066 -0,138 -0,076	-0,119 -0,180 -0,087	-0,153 -0,202 -0,070	
-75,0 -90,0 -105,0 -120,0 -150,0	-0,154 -0,127 -0,102 -0,078 -0,034	-0,096 -0,087 -0,079 -0,071 -0,058	-0,004 -0,005 -0,005 -0,005 -0,006	-0,459 -0,368 -0,278 -0,187 0,011	-0,290 -0,261 -0,234 -0,207 -0,154	-0,022 -0,025 -0,027 -0,028 -0,029	-0,898 -0,683 -0,452 -0,195 0,453	-0,583 -0,519 -0,454 -0,386 -0,235	-0,066 -0,072 -0,077 -0,080 -0,078	$h = \pm 13,5$ 0,168 $h = \pm 8,5$ 0,051
4,70	143,98	77,42 40,98 -338,37	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,049 -0,038 -0,016	0,010 -0,071 -0,030	-0,030 -0,103 -0,039	-0,063 -0,124 -0,030	-0,074 -0,120 0,015	
-75,0 -90,0 -105,0 -120,0 -150,0	-0,180 -0,157 -0,135 -0,106 -0,074	-0,104 -0,097 -0,089 -0,075 -0,071	-0,004 -0,005 -0,005 -0,002 -0,007	-0,540 -0,459 -0,378 -0,295 -0,106	-0,316 -0,291 -0,267 -0,244 -0,194	-0,024 -0,027 -0,030 -0,032 -0,034	-1,060 -0,867 -0,653 -0,409 0,229	-0,637 -0,580 -0,522 -0,459 -0,312	-0,069 -0,078 -0,084 -0,089 -0,091	$h = \pm 13,5$ 0,159 $h = \pm 8,5$ 0,047
4,77	143,72	74,72 40,18 -404,26	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,058 -0,031 -0,008	0,026 -0,056 -0,017	-0,005 -0,077 -0,013	-0,023 -0,083 0,012	-0,012 -0,058 0,079	
-75,0 -90,0	-0,208 -0,189	-0,114 -0,107	-0,005 -0,005	-0,625 -0,558	-0,345 -0,324	-0,025 -0,029	-1,234 -1,066	-0,695 -0,647	-0,073 -0,084	$h = \pm 13,5$ 0,150

-105,0	-0,171	-0,102	-0,006	-0,489	-0,304	-0,032	-0,875	-0,596	-0,092	$h=\pm 8,5$ 0,042
-120,0	-0,153	-0,095	-0,006	-0,414	-0,283	-0,034	-0,650	-0,540	-0,098	
-150,0	-0,120	-0,086	-0,008	-0,244	-0,240	-0,039	-0,038	-0,404	-0,106	
4,84	143,46	72,20 39,41 -502,46	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,061 -0,026 -0,008	0,036 -0,046 -0,009	0,014 -0,061 0,002	0,005 -0,057 0,039	0,029 -0,018 0,121	
-75,0	-0,238	-0,124	-0,005	-0,716	-0,375	-0,027	-1,418	-0,756	-0,078	$h=\pm 13,5$ 0,141
-90,0	-0,224	-0,119	-0,006	-0,664	-0,360	-0,031	-1,280	-0,719	-0,090	
-105,0	-0,212	-0,116	-0,007	-0,609	-0,344	-0,034	-1,118	-0,678	-0,100	
-120,0	-0,198	-0,111	-0,007	-0,549	-0,328	-0,038	-0,918	-0,631	-0,109	$h=\pm 8,5$ 0,039
-150,0	-0,173	-0,104	-0,008	-0,402	-0,293	-0,044	-0,346	-0,510	-0,121	
4,91	143,20	69,85 38,67 -664,46	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,065 -0,025 -0,008	0,040 -0,043 -0,007	0,019 -0,054 0,008	0,016 -0,045 0,050	0,047 0,002 0,142	
-75,0	-0,270	-0,134	-0,005	-0,812	-0,407	-0,028	-1,612	-0,821	-0,082	$h=\pm 13,5$ 0,132
-90,0	-0,262	-0,131	-0,006	-0,778	-0,398	-0,033	-1,509	-0,795	-0,096	
-105,0	-0,255	-0,130	-0,008	-0,738	-0,386	-0,035	-1,379	-0,765	-0,107	
-120,0	-0,247	-0,127	-0,008	-0,697	-0,378	-0,042	-1,213	-0,730	-0,120	$h=\pm 8,5$ 0,035
-150,0	-0,232	-0,124	-0,010	-0,581	-0,354	-0,050	-0,696	-0,631	-0,137	
4,98	142,94	67,64 37,96 -982,33	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,064 -0,027 0,012	0,038 -0,045 -0,012	0,017 -0,057 0,003	0,012 -0,048 0,047	0,046 0,001 0,143	
-75,0	-0,303	-0,145	-0,006	-0,913	-0,441	-0,030	-1,817	-0,890	-0,086	$h=\pm 13,5$ 0,124
-90,0	-0,302	-0,145	-0,007	-0,899	-0,438	-0,035	-1,753	-0,877	-0,102	
-105,0	-0,299	-0,143	-0,007	-0,879	-0,433	-0,038	-1,662	-0,861	-0,117	
-120,0	-0,300	-0,145	-0,009	-0,857	-0,432	-0,046	-1,534	-0,840	-0,132	$h=\pm 8,5$ 0,030
-150,0	-0,299	-0,146	-0,011	-0,780	-0,421	-0,056	-1,088	-0,766	-0,156	

$$f' = 150, 0; \quad \nu_2 = 33, 9; \quad \nu_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 5; \quad d_2 = 8, 0; \quad c = -0, 0010$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>3</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'				
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16
4, 57	144, 08	78, 99 42, 08 -320, 18	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 016 -0, 060 -0, 092	-0, 015 -0, 115 -0, 131	-0, 086 -0, 180 -0, 176	-0, 162 -0, 247 -0, 213	-0, 228 -0, 299 -0, 232
β = 2°					β = 3°, 5				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'
- 75, 0	-0, 186	-0, 106	-0, 004	-0, 559	-0, 322	-0, 024	-1, 105	-0, 650	-0, 070
- 90, 0	-0, 167	-0, 100	-0, 005	-0, 493	-0, 302	-0, 027	-0, 945	-0, 604	-0, 079
-105, 0	-0, 151	-0, 095	-0, 006	-0, 431	-0, 285	-0, 031	-0, 776	-0, 558	-0, 086
-120, 0	-0, 134	-0, 089	-0, 006	-0, 376	-0, 273	-0, 039	-0, 589	-0, 512	-0, 093
-150, 0	-0, 112	-0, 083	-0, 007	-0, 241	-0, 235	-0, 036	-0, 112	-0, 409	-0, 099
4, 65	143, 79	75, 80 41, 12 -388, 61	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 058 -0, 051 -0, 086	0, 006 -0, 097 -0, 115	-0, 056 -0, 148 -0, 144	-0, 113 -0, 156 -0, 163	-0, 155 -0, 227 -0, 157
4, 73	143, 49	72, 86 40, 21 -494, 79	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 063 -0, 047 -0, 082	0, 015 -0, 098 -0, 105	-0, 036 -0, 130 -0, 127	-0, 082 -0, 166 -0, 132	-0, 111 -0, 181 -0, 109
- 75, 0	-0, 218	-0, 117	-0, 005	-0, 656	-0, 354	-0, 026	-1, 501	-0, 715	-0, 074
- 90, 0	-0, 204	-0, 112	-0, 005	-0, 604	-0, 339	-0, 029	-1, 168	-0, 679	-0, 085
-105, 0	-0, 191	-0, 108	-0, 006	-0, 554	-0, 325	-0, 033	-1, 025	-0, 641	-0, 095
-120, 0	-0, 180	-0, 104	-0, 006	-0, 504	-0, 311	-0, 036	-0, 859	-0, 602	-0, 103
-150, 0	-0, 161	-0, 100	-0, 008	-0, 387	-0, 279	-0, 042	-0, 418	-0, 516	-0, 128
4, 73	143, 49	72, 86 40, 21 -494, 79	C D F	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 063 -0, 047 -0, 082	0, 015 -0, 098 -0, 105	-0, 036 -0, 130 -0, 127	-0, 082 -0, 166 -0, 132	-0, 111 -0, 181 -0, 109
- 75, 0	-0, 252	-0, 128	-0, 005	-0, 759	-0, 389	-0, 027	-1, 510	-0, 785	-0, 079
- 90, 0	-0, 243	-0, 125	-0, 006	-0, 725	-0, 379	-0, 032	-1, 413	-0, 760	-0, 092

-105,0	-0,238	-0,124	-0,007	-0,692	-0,371	-0,036	-1,301	-0,735	-0,104
-120,0	-0,230	-0,121	-0,007	-0,657	-0,363	-0,040	-1,165	-0,706	-0,115
-150,0	-0,224	-0,120	-0,009	-0,574	-0,347	-0,048	-0,763	-0,632	-0,132
4,81	143,19	70,13 39,33 -681,86	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,065 -0,047 -0,083	0,020 -0,098 -0,104	-0,029 -0,130 -0,121	-0,071 -0,166 -0,121	-0,091 -0,181 -0,087
-75,0	-0,288	-0,140	-0,005	-0,869	-0,426	-0,029	-1,733	-0,860	-0,084
-90,0	-0,286	-0,139	-0,006	-0,856	-0,423	-0,034	-1,676	-0,849	-0,099
-105,0	-0,286	-0,139	-0,007	-0,843	-0,421	-0,039	-0,616	-0,847	-0,124
-120,0	-0,287	-0,140	-0,008	-0,827	-0,419	-0,044	-1,505	-0,821	-0,128
-150,0	-0,293	-0,143	-0,010	-0,781	-0,417	-0,055	-1,170	-0,772	-0,152
4,89	142,90	67,60 38,49 -1099,2	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,064 -0,047 -0,088	0,017 -0,087 -0,111	-0,034 -0,129 -0,129	-0,080 -0,163 -0,130	-0,101 -0,169 -0,094
-75,0	-0,327	-0,153	-0,006	-0,986	-0,465	-0,031	-1,970	-0,939	-0,089
-90,0	-0,333	-0,155	-0,007	-0,996	-0,470	-0,037	-1,959	-0,944	-0,107
-105,0	-0,341	-0,159	-0,009	-1,006	-0,476	-0,043	-1,932	-0,946	-0,123
-120,0	-0,349	-0,161	-0,009	-1,014	-0,482	-0,049	-1,879	-0,948	-0,141
-150,0	-0,370	-0,169	-0,012	-1,015	-0,496	-0,062	-1,631	-0,920	-0,173
4,97	142,60	65,25 37,69 -2851,7	C D F	1,5139 1,5163 1,5220	0,059 -0,053 -0,097	0,006 -0,099 -0,125	-0,053 -0,148 -0,149	-0,106 -0,190 -0,157	-0,136 -0,204 -0,128
-75,0	-0,367	-0,166	-0,006	-1,110	-0,506	-0,032	-2,219	-1,023	-0,095
-90,0	-0,382	-0,171	-0,007	-1,146	-0,520	-0,040	-2,561	-1,045	-0,115
-105,0	-0,398	-0,177	-0,009	-1,181	-0,533	-0,046	-2,288	-1,067	-0,136
-120,0	-0,416	-0,183	-0,010	-1,218	-0,551	-0,054	-2,287	-1,086	-0,156
-150,0	-0,457	-0,198	-0,013	-1,275	-0,583	-0,070	-2,145	-1,107	-0,087

$f' = 150, 0$ ;  $v_2 = 33, 9$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 2, 5$ ;  $d_3 = 8, 0$ ;  $c = -0, 0015$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'									
					h = 6	h = 8, 5	h = 11	h = 13, 5	h = 16					
4, 55	143, 78	76, 13	C	1, 5139	0, 059	-0, 011	-0, 095	-0, 187	-0, 275					
		41, 87	D	1, 5163	-0, 068	-0, 132	-0, 210	-0, 293	-0, 369					
		-394, 46	F	1, 5220	-0, 158	-0, 206	-0, 265	-0, 322	-0, 364					
β = 2°					β = 3°, 5					β = 5°				
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'		
- 75, 0	-0, 235	-0, 122	-0, 005	-0, 708	-0, 372	-0, 026	-1, 412	-0, 751	-0, 076					
- 90, 0	-0, 226	-0, 119	-0, 006	-0, 676	-0, 362	-0, 030	-1, 323	-0, 727	-0, 088					
-105, 0	-0, 221	-0, 118	-0, 006	-0, 648	-0, 355	-0, 034	-1, 230	-0, 706	-0, 100					
-120, 0	-0, 218	-0, 117	-0, 007	-0, 622	-0, 348	-0, 037	-1, 124	-0, 685	-0, 110					
-150, 0	-0, 218	-0, 118	-0, 009	-0, 575	-0, 344	-0, 046	-0, 835	-0, 639	-0, 128					
4, 64	143, 45	72, 81	C	1, 5139	0, 065	0, 001	-0, 076	-0, 159	-0, 232					
		40, 81	D	1, 5163	-0, 063	-0, 122	-0, 192	-0, 264	-0, 325					
		-522, 58	F	1, 5220	-0, 156	-0, 199	-0, 247	-0, 292	-0, 318					
- 75, 0	-0, 273	-0, 135	-0, 005	-0, 826	-0, 411	-0, 028	-1, 651	-0, 831	-0, 082					
- 90, 0	-0, 272	-0, 134	-0, 006	-0, 814	-0, 408	-0, 033	-1, 602	-0, 821	-0, 096					
-105, 0	-0, 273	-0, 136	-0, 007	-0, 808	-0, 409	-0, 040	-1, 547	-0, 813	-0, 111					
-120, 0	-0, 273	-0, 134	-0, 007	-0, 799	-0, 408	-0, 043	-1, 476	-0, 804	-0, 124					
-150, 0	-0, 288	-0, 141	-0, 010	-0, 784	-0, 414	-0, 053	-1, 247	-0, 780	-0, 148					
4, 73	143, 11	69, 76	C	1, 5139	0, 066	0, 003	-0, 073	-0, 153	-0, 222					
		39, 80	D	1, 5163	-0, 063	-0, 121	-0, 189	-0, 259	-0, 314					
		-775, 69	F	1, 5220	-0, 158	-0, 200	-0, 247	-0, 287	-0, 306					
-75, 0	-0, 316	-0, 150	-0, 006	-0, 953	-0, 453	-0, 030	-1, 907	-0, 916	-0, 087					
-90, 0	-0, 321	-0, 151	-0, 007	-0, 964	-0, 458	-0, 036	-1, 905	-0, 922	-0, 104					



-105,0	-0,330	-0,154	-0,008	-0,980	-0,466	-0,042	-1,879	-0,914	-0,094
-120,0	-0,341	-0,158	-0,009	-0,996	-0,474	-0,048	-1,872	-0,938	-0,138
-150,0	-0,368	-0,168	-0,012	-1,027	-0,496	-0,060	-1,728	-0,944	-0,170
4,82	142,78	66,96 38,83 -1510,9	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,063 -0,068 -0,166	-0,005 -0,130 -0,211	-0,086 -0,203 -0,262	-0,172 -0,278 -0,307	-0,247 -0,339 -0,329
-75,0	-0,359	-0,163	-0,006	-1,088	-0,498	-0,032	-2,179	-1,008	-0,093
-90,0	-0,375	-0,169	-0,007	-1,127	-0,512	-0,039	-2,232	-1,033	-0,113
-105,0	-0,392	-0,174	-0,008	-1,169	-0,528	-0,045	-2,279	-1,059	-0,133
-120,0	-0,413	-0,182	-0,010	-1,215	-0,548	-0,054	-2,310	-1,086	-0,154
-150,0	-0,460	-0,199	-0,013	-1,304	-0,590	-0,069	-2,273	-1,130	-0,195
4,91	142,45	64,37 37,91 -31662,4	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,056 -0,077 -0,196	-0,022 -0,148 -0,263	-0,116 -0,234 -0,342	-0,215 -0,321 -0,419	-0,305 -0,397 -0,478
-75,0	-0,406	-0,179	-0,006	-1,231	-0,546	-0,034	-2,468	-1,105	-0,100
-90,0	-0,432	-0,188	-0,008	-1,301	-0,571	-0,042	-2,584	-1,151	-0,122
-105,0	-0,459	-0,196	-0,009	-1,376	-0,598	-0,050	-2,696	-1,200	-0,146
-120,0	-0,492	-0,208	-0,011	-1,455	-0,628	-0,059	-2,791	-1,250	-0,170
-150,0	-0,560	-0,231	-0,015	-1,625	-0,706	-0,078	-2,886	-1,342	-0,222
5,00	142,11	61,98 37,03 1662,1	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,043 -0,091 -0,178	-0,049 -0,176 -0,232	-0,161 -0,279 -0,294	-0,283 -0,389 -0,351	-0,398 -0,489 -0,386
-75,0	-0,456	-0,196	-0,007	-1,382	-0,596	-0,036	-2,774	-1,208	-0,106
-90,0	-0,494	-0,209	-0,009	-1,489	-0,634	-0,046	-2,960	-1,279	-0,133
-105,0	-0,534	-0,222	-0,010	-1,599	-0,673	-0,055	-3,142	-1,352	-0,159
-120,0	-0,578	-0,237	-0,012	-1,716	-0,716	-0,065	-3,313	-1,428	-0,188
-150,0	-0,676	-0,270	-0,016	-1,954	-0,809	-0,088	-3,564	-1,576	-0,251

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'					
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12	
6, 14	98, 92	114, 62	C	1, 5155	-0, 044	-0, 129	-0, 197	-0, 158	0, 106	
		24, 15	D	1, 5181	-0, 082	-0, 156	-0, 205	-0, 149	0, 145	
		- 57, 12	F	1, 5243	0, 033	-0, 008	-0, 016	0, 106	0, 513	
β = 2°										
β = 4°										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	
-15, 0	-0, 012	-0, 034	-0, 001	-0, 044	-0, 137	-0, 006	-0, 085	-0, 306	-0, 022	
-17, 0	0, 010	-0, 027	-0, 001	0, 044	-0, 108	-0, 006	0, 116	-0, 241	-0, 022	
-19, 0	0, 031	-0, 020	-0, 001	0, 131	-0, 080	-0, 006	0, 319	-0, 175	-0, 021	
-21, 0	0, 052	-0, 013	-0, 001	0, 218	-0, 051	-0, 006	0, 522	-0, 110	-0, 020	
-23, 0	0, 074	-0, 006	-0, 001	0, 305	-0, 023	-0, 006	0, 725	-0, 044	-0, 019	
6, 18	98, 81	109, 60	C	1, 5155	-0, 013	-0, 066	-0, 075	0, 037	0, 405	
		23, 91	D	1, 5181	-0, 054	-0, 089	-0, 084	0, 047	0, 453	
		- 58, 40	F	1, 5243	0, 065	0, 057	0, 112	0, 319	0, 827	
-15, 0	-0, 015	-0, 035	-0, 001	-0, 055	-0, 141	-0, 006	-0, 109	-0, 315	-0, 022	
-17, 0	0, 007	-0, 028	-0, 001	0, 033	-0, 112	-0, 006	0, 092	-0, 249	-0, 022	
-19, 0	0, 028	-0, 021	-0, 001	0, 120	-0, 083	-0, 006	0, 295	-0, 183	-0, 021	
-21, 0	0, 050	-0, 014	-0, 001	0, 208	-0, 054	-0, 006	0, 499	-0, 117	-0, 020	
-23, 0	0, 071	-0, 007	-0, 001	0, 296	-0, 026	-0, 006	0, 705	-0, 051	-0, 019	
6, 22	98, 70	104, 99	C	1, 5155	0, 011	0, 002	0, 044	0, 229	0, 700	
		23, 68	D	1, 5181	-0, 024	-0, 029	0, 033	0, 247	0, 749	
		- 59, 75	F	1, 5243	0, 095	0, 134	0, 235	0, 512	1, 082	
-15, 0	-0, 017	-0, 036	-0, 001	-0, 066	-0, 145	-0, 006	-0, 134	-0, 323	-0, 022	
-17, 0	0, 004	-0, 029	-0, 001	0, 022	-0, 116	-0, 006	0, 068	-0, 257	-0, 022	

-19,0	0,026	-0,022	-0,001	0,110	-0,087	-0,006	0,271	-0,191	-0,022
-21,0	0,047	-0,015	-0,001	0,198	-0,058	-0,006	0,476	-0,125	-0,021
-23,0	0,069	-0,008	-0,001	0,286	-0,029	-0,006	0,683	-0,059	-0,020
6,26	98,58	100,76 23,45 -61,16	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,040 0,004 0,121	0,061 0,038 0,186	0,158 0,150 0,350	0,417 0,437 0,710	0,993 1,047 1,430
-15,0	-0,020	-0,037	-0,001	-0,077	-0,149	-0,006	-0,159	-0,331	-0,022
-17,0	0,001	-0,030	-0,001	0,011	-0,120	-0,006	0,043	-0,266	-0,022
-19,0	0,023	-0,023	-0,001	0,099	-0,091	-0,006	0,246	-0,200	-0,022
-21,0	0,045	-0,016	-0,001	0,187	-0,062	-0,006	0,452	-0,133	-0,021
-23,0	0,066	-0,009	-0,001	0,276	-0,033	-0,006	0,661	-0,066	-0,020
6,20	98,47	96,86 23,22 -62,65	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,069 0,027 0,147	0,120 0,095 0,247	0,267 0,261 0,462	0,601 0,617 0,894	1,281 1,334 1,726
-15,0	-0,023	-0,038	-0,001	-0,088	-0,152	-0,006	-0,184	-0,340	-0,022
-17,0	-0,001	-0,031	-0,001	-0,001	-0,124	-0,007	0,017	-0,274	-0,022
-19,0	0,020	-0,024	-0,001	0,087	-0,094	-0,006	0,221	-0,208	-0,022
-21,0	0,042	-0,017	-0,001	0,176	-0,065	-0,006	0,428	-0,141	-0,021
-23,0	0,064	-0,010	-0,001	0,265	-0,036	-0,006	0,638	-0,074	-0,020
6,34	98,36	93,24 23,00 -64,21	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,088 0,053 0,173	0,178 0,154 0,308	0,376 0,370 0,576	0,780 0,800 1,081	1,558 1,618 2,020
-15,0	-0,026	-0,039	-0,001	-0,100	-0,156	-0,007	-0,210	-0,349	-0,022
-17,0	-0,004	-0,032	-0,001	-0,012	-0,127	-0,007	-0,008	-0,583	-0,022
-19,0	0,017	-0,025	-0,001	0,076	-0,098	-0,007	0,196	-0,217	-0,022
-21,0	0,039	-0,018	-0,001	0,165	-0,069	-0,006	0,403	-0,150	-0,022
-23,0	0,061	-0,010	-0,001	0,254	-0,040	-0,006	0,614	-0,082	-0,021

$f' = 100, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 58, 9$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = 0, 0000$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -19$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = 12								
					h = 4							h = 10							
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12										
6,04	98,74	108,31 24,39 — 59,42	C	1,6213	1,5155	—0,023	—0,098	—0,156	—0,119	0,118									
			D	1,6259	1,5181	—0,073	—0,142	—0,181	—0,129	0,143									
			F	1,6373	1,5243	0,009	—0,035	—0,032	0,085	0,450									
β = 2°																			
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δ y'	x <sub>s</sub>	Δ y'								
—15,0	—0,022	—0,038	—0,001	—0,084	—0,150	—0,007	—0,175	—0,335	—0,022	h = ±10									
—17,0	—0,001	—0,031	—0,001	0,000	—0,123	—0,007	0,017	—0,273	—0,022	0,528									
—19,0	0,019	—0,024	—0,001	0,084	—0,095	—0,007	0,210	—0,210	—0,022										
—21,0	0,040	—0,017	—0,001	0,168	—0,068	—0,006	0,403	—0,147	—0,022	h = ±6									
—23,0	0,060	—0,011	—0,001	0,250	—0,041	—0,006	0,598	—0,085	—0,020	0,134									
β = 4°																			
6,08	98,63	103,82 24,15 — 60,82	C	1,6213	1,5155	0,005	—0,037	—0,040	0,061	0,402									
			D	1,6259	1,5181	—0,045	—0,079	—0,066	0,062	0,426									
			F	1,6373	1,5243	0,038	0,031	0,086	0,276	0,740									
—15,0	—0,025	—0,039	—0,001	—0,095	—0,154	—0,007	—0,200	—0,344	—0,022	h = ±10									
										—17,0	—0,004	—0,032	—0,001	—0,126	—0,007	—0,008	—0,281	—0,023	0,527
										—19,0	0,017	—0,025	—0,001	0,072	—0,007	0,185	—0,218	—0,022	
—21,0	0,037	—0,018	—0,001	0,156	—0,071	—0,006	0,379	—0,155	—0,022	h = ±6									
—23,0	0,058	—0,011	—0,001	0,240	—0,044	—0,006	0,575	—0,093	—0,021	0,134									
6,12	98,51	99,68 23,91 —62,28	C	1,6213	1,5155	0,032	0,022	0,068	0,237	0,681									
			D	1,6259	1,5181	—0,020	—0,019	0,044	0,245	0,708									
			F	1,6373	1,5243	0,062	0,091	0,197	0,465	1,030									
—15,0	—0,027	—0,040	—0,001	—0,106	—0,158	—0,007	—0,225	—0,352	—0,023	h = ±10									
										—17,0	—0,007	—0,033	—0,033	—0,290	—0,023	0,526			

-19,0 -21,0 -23,0	0,014 0,034 0,055	-0,026 -0,019 -0,012	-0,001 -0,001 -0,001	0,061 0,145 0,229	-0,103 -0,075 -0,048	-0,007 -0,007 -0,006	0,160 0,355 0,552	-0,227 -0,164 -0,101	-0,023 -0,022 -0,021	$h=\pm 6$ 0,134
6,16	98,40	95,86 23,67 -63,83	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,053 0,005 0,086	0,079 0,087 0,151	0,174 0,151 0,307	0,419 0,419 0,642	0,952 0,985 1,309	
-15,0 -17,0 -19,0 -21,0 -23,0	-0,030 -0,010 0,011 0,032 0,052	-0,041 -0,034 -0,027 -0,020 -0,013	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,117 -0,034 0,050 0,134 0,218	-0,162 -0,134 -0,107 -0,079 -0,051	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,006	-0,251 -0,066 0,134 0,329 0,527	-0,361 -0,299 -0,236 -0,172 -0,109	-0,022 -0,023 -0,023 -0,022 -0,022	$h=\pm 10$ 0,525 $h=\pm 6$ 0,134
6,20	98,29	92,32 23,44 -65,45	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,088 0,030 0,112	0,136 0,098 0,209	0,280 0,257 0,415	0,592 0,593 0,820	1,218 1,254 1,586	
-15,0 -17,0 -19,0 -21,0 -23,0	-0,033 -0,013 0,008 0,029 0,049	-0,042 -0,035 -0,028 -0,021 -0,014	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,129 -0,046 0,038 0,122 0,207	-0,166 -0,138 -0,111 -0,083 -0,055	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,277 -0,086 0,107 0,303 0,502	-0,370 -0,307 -0,245 -0,181 -0,117	-0,023 -0,023 -0,023 -0,023 -0,022	$h=\pm 10$ 0,525 $h=\pm 6$ 0,134
6,24	98,18	89,03 23,22 -67,17	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,102 0,054 0,137	0,191 0,153 0,266	0,381 0,360 0,521	0,760 0,763 0,995	1,482 1,520 1,858	
-15,0 -17,0 -19,0 -21,0 -23,0	-0,036 -0,016 0,005 0,026 0,046	-0,043 -0,036 -0,028 -0,022 -0,015	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,141 -0,058 0,026 0,110 0,195	-0,170 -0,142 -0,115 -0,087 -0,059	-0,007 -0,007 -0,007 -0,007 -0,007	-0,304 -0,113 0,080 0,277 0,476	-0,379 -0,317 -0,254 -0,190 -0,126	-0,023 -0,023 -0,023 -0,023 -0,022	$h=\pm 10$ 0,524 $h=\pm 6$ 0,134

$f' = 100, 0$ ;  $\nu_2 = 39, 1$ ;  $\nu_3 = 58, 9$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ; КОМА для  $\beta = 6^\circ$  и  $\varepsilon = -19$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δ s'						h = 12
					β = 4°						
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12		
5,94	98,56	102,67 24,64 — 61,92	C	1,5155	—0,003	—0,071	—0,117	—0,089	0,129	h = ±10 0,501	
			D	1,5181	—0,063	—0,124	—0,158	—0,108	0,134		
			F	1,5243	—0,021	—0,059	—0,052	0,055	0,389		
β = 6°											
5,98	98,44	98,62 24,39 —63,45	C	1,5155	0,016	—0,017	—0,012	0,078	0,395	h = ±6 0,123	
			D	1,5181	—0,040	—0,067	—0,050	0,064	0,404		
			F	1,5243	—0,001	0,003	0,052	0,235	0,644		
6,02	98,33	94,87 24,14 —65,05	C	1,5155	0,046	0,042	0,089	0,254	0,654	h = ±10 0,497	
			D	1,5181	—0,016	—0,012	0,049	0,235	0,665		
			F	1,5243	0,027	0,059	0,160	0,406	0,926		
—15,0 —17,0 —19,0 —21,0 —23,0	—0,037 —0,018	—0,043 —0,036	—0,001	—0,146	—0,171	—0,007	—0,316	—0,382	—0,023	h = ±10 0,497	
			—0,001	—0,067	—0,145	—0,007	—0,134	—0,322	—0,024		

-19,0	0,002	-0,030	-0,001	0,013	-0,118	-0,007	0,049	-0,262	-0,024	$h=\pm 6$ -0,122
-21,0	0,021	-0,023	-0,001	0,092	-0,092	-0,007	0,234	-0,203	-0,023	
-23,0	0,041	-0,017	-0,001	0,172	-0,066	-0,007	0,420	-0,142	-0,023	
6,06	98,22	91,41 23,90 -66,74	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,070 0,008 0,052	0,097 0,005 0,115	0,190 0,152 0,264	0,420 0,402 0,577	0,910 0,923 1,190	
-15,0	-0,040	-0,044	-0,001	-0,158	-0,175	-0,007	-0,343	-0,391	-0,023	$h=\pm 10$ 0,496
-17,0	-0,021	-0,037	-0,001	-0,079	-0,149	-0,007	-0,161	-0,331	-0,024	
-19,0	-0,001	-0,031	-0,001	0,001	-0,123	-0,007	0,022	-0,272	-0,024	
-21,0	0,018	-0,024	-0,001	0,080	-0,096	-0,007	0,207	-0,212	-0,024	$h=\pm 6$ 0,122
-23,0	0,038	-0,018	-0,001	0,160	-0,070	-0,007	0,394	-0,151	-0,023	
6,10	98,11	88,18 23,67 -68,53	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,093 0,032 0,075	0,150 0,098 0,170	0,288 0,250 0,365	0,581 0,564 0,744	1,159 1,174 1,448	
-15,0	-0,043	-0,045	-0,001	-0,170	-0,179	-0,007	-0,370	-0,400	-0,023	$h=\pm 10$ 0,495
-17,0	-0,024	-0,038	-0,001	-0,091	-0,153	-0,007	-0,189	-0,341	-0,024	
-19,0	-0,004	-0,032	-0,001	-0,012	-0,127	-0,007	-0,006	-0,281	-0,024	
-21,0	0,015	-0,025	-0,001	0,068	-0,100	-0,007	0,179	-0,221	-0,024	$h=\pm 6$ 0,121
-23,0	0,035	-0,019	-0,001	0,148	-0,074	-0,007	0,367	-0,160	-0,024	
6,14	97,99	85,18 23,44 -70,42	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,115 0,054 0,098	0,202 0,150 0,224	0,384 0,348 0,464	0,739 0,724 0,906	1,404 1,420 1,699	
-15,0	-0,046	-0,046	-0,001	-0,182	-0,183	-0,007	-0,397	-0,409	-0,024	$h=\pm 10$ 0,493
-17,0	-0,027	-0,040	-0,001	-0,104	-0,157	-0,007	-0,217	-0,350	-0,024	
-19,0	-0,008	-0,033	-0,001	-0,025	-0,131	-0,007	-0,034	-0,290	-9,025	
-21,0	0,012	-0,027	-0,001	0,055	-0,105	-0,007	0,151	-0,220	-0,024	$h=\pm 6$ 0,121
-23,0	0,032	-0,020	-0,001	0,136	-0,078	-0,007	0,339	-0,170	-0,024	

$f''=100,0$ ;  $v_2=39,1$ ;  $v_3=58,9$ ;  $d_1=2,0$ ;  $d_2=6,0$ ;  $c=-0,0010$ ; кома для  $\beta=6^\circ$  и  $s=-19$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'																	
					h = 4			h = 6			h = 8		h = 10		h = 12							
β = 2°											β = 4°						β = 6°					
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'				
-15,0	-0,041	-0,044	-0,001	-0,162	-0,176	-0,007	-0,354	-0,393	-0,023	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-17,0	-0,022	-0,038	-0,001	-0,086	-0,151	-0,007	-0,180	-0,336	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-19,0	-0,004	-0,032	-0,001	-0,011	-0,126	-0,007	-0,006	-0,279	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-21,0	0,014	-0,025	-0,001	0,064	-0,101	-0,007	0,168	-0,223	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-23,0	0,033	-0,019	-0,001	0,139	-0,076	-0,007	0,343	-0,166	-0,023	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
5,88	98,26	93,91 24,63 -66,32	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,040 -0,036 -0,031	0,010 -0,038 -0,030	0,012 -0,045 0,022	0,103 0,066 0,186	0,384 0,374 0,573													
-15,0	-0,044	-0,045	-0,001	-0,174	-0,180	-0,007	-0,380	-0,402	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-17,0	-0,026	-0,039	-0,001	-0,096	-0,155	-0,007	-0,207	-0,345	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-19,0	-0,007	-0,033	-0,001	-0,023	-0,130	-0,007	-0,034	-0,288	-0,026	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-21,0	0,012	-0,026	-0,001	0,052	-0,105	-0,007	0,141	-0,232	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-23,0	0,030	-0,020	-0,001	0,128	-0,080	-0,007	0,317	-0,175	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
5,92	98,15	90,51 24,38 -68,09	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,063 -0,012 -0,006	0,062 -0,005 0,025	0,108 0,054 0,122	0,262 0,226 0,349	0,628 0,619 0,824													
-15,0	-0,047	-0,046	-0,001	-0,186	-0,184	-0,007	-0,407	-0,411	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				
-17,0	-0,029	-0,040	-0,001	-0,111	-0,159	-0,007	-0,235	-0,354	-0,024	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007				



-19,0	-0,010	-0,034	-0,001	-0,036	-0,134	-0,007	-0,062	-0,298	-0,025	$h=\pm 6$ 0,106
-21,0	0,008	-0,028	-0,001	0,040	-0,109	-0,007	0,113	-0,241	-0,025	
-23,0	0,027	-0,021	-0,001	0,115	-0,084	-0,007	0,289	-0,184	-0,024	
5,96	98,04	87,35 24,14 -69,95	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,086 0,010 0,016	0,113 0,046 0,078	0,202 0,148 0,218	0,416 0,382 0,509	0,865 0,859 1,068	
-15,0	-0,050	-0,047	-0,001	-0,198	-0,188	-0,007	-0,434	-0,420	-0,024	$h=\pm 10$ 0,455
-17,0	-0,032	-0,041	-0,001	-0,123	-0,163	-0,007	-0,263	-0,364	-0,025	
-19,0	-0,013	-0,035	-0,001	-0,048	-0,138	-0,007	-0,090	-0,307	-0,025	
-21,0	0,005	-0,029	-0,001	0,027	-0,113	-0,007	0,085	-0,251	-0,025	$h=\pm 6$ 0,102
-23,0	0,024	-0,022	-0,001	0,103	-0,089	-0,007	0,261	-0,194	-0,025	
6,00	97,92	84,40 23,90 -71,92	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,106 0,032 0,038	0,163 0,097 0,129	0,294 0,241 0,312	0,567 0,533 0,663	1,097 1,092 1,308	
-15,0	-0,053	-0,048	-0,001	-0,210	-0,192	-0,007	-0,462	-0,429	-0,024	$h=\pm 10$ 0,461
-17,0	-0,035	-0,042	-0,001	-0,136	-0,167	-0,007	-0,291	-0,373	-0,025	
-19,0	-0,016	-0,036	-0,001	-0,061	-0,143	-0,008	-0,119	-0,317	-0,025	
-21,0	0,002	-0,030	-0,001	0,014	-0,118	-0,008	0,056	-0,260	-0,025	$h=\pm 6$ 0,098
-23,0	0,020	-0,024	-0,001	0,090	-0,093	-0,007	0,232	-0,203	-0,025	
6,04	97,81	81,64 23,66 -74,01	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,128 0,053 0,060	0,212 0,146 0,179	0,383 0,331 0,404	0,714 0,682 0,814	1,324 1,321 1,542	
-15,0	-0,056	-0,049	-0,001	-0,223	-0,196	-0,007	-0,490	-0,439	-0,024	$h=\pm 10$ 0,466
-17,0	-0,038	-0,043	-0,001	-0,149	-0,172	-0,007	-0,320	-0,383	-0,025	
-19,0	-0,020	-0,037	-0,001	-0,074	-0,147	-0,008	-0,148	-0,327	-0,026	
-21,0	-0,001	-0,031	-0,001	0,001	-0,122	-0,008	0,026	-0,270	-0,026	$h=\pm 6$ 0,094
-23,0	0,017	-0,025	-0,001	0,076	-0,097	-0,008	0,203	-0,213	-0,025	

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s' 0	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'									
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12					
5,74	98,19	92,97 25,14 -67,65	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,035	-0,020	-0,060	-0,034	0,141					
					-0,054	-0,102	-0,131	-0,088	0,109					
					-0,087	-0,114	-0,109	-0,018	0,249					
β = 2°					β = 4°					β = 6°				
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'		
-15,0	-0,051	-0,047	-0,001	-0,201	-0,188	-0,007	-0,442	-0,421	-0,024					
-17,0	-0,033	-0,041	-0,001	-0,130	-0,165	-0,007	-0,278	-0,368	-0,025					
-19,0	-0,016	-0,035	-0,001	-0,058	-0,141	-0,007	-0,114	-0,314	-0,025					
-21,0	-0,002	-0,030	-0,001	0,013	-0,118	-0,008	0,051	-0,260	-0,025					
-23,0	0,019	-0,024	-0,001	0,084	-0,094	-0,007	0,216	-0,207	-0,025					
5,78	98,08	89,64	1,6213	1,5155	0,057	0,030	0,033	0,118	0,372					
		24,88	1,6259	1,5181	-0,032	-0,051	-0,037	0,064	0,342					
		-69,49	1,6373	1,5243	-0,064	-0,061	-0,013	0,138	0,487					
-15,0 -17,0 -19,0 -21,0 -23,0	-0,054 -0,036 -0,019 -0,001 0,016	-0,048 -0,042 -0,037 -0,031 -0,025	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,213 -0,142 -0,071 0,000 0,072	-0,193 -0,169 -0,145 -0,122 -0,098	-0,007 -0,007 -0,008 -0,008 -0,008	-0,469 -0,306 -0,143 0,022 0,188	-0,431 -0,377 -0,323 -0,270 -0,216	-0,024 -0,025 -0,026 -0,026 -0,025					
5,82	97,97	86,53	1,6213	1,5155	0,079	0,079	0,124	0,266	0,598					
		24,63	1,6259	1,5181	-0,010	-0,001	0,054	0,214	0,570					
		-71,43	1,6373	1,5243	-0,042	-0,011	0,080	0,289	0,720					
-15,0 -17,0	-0,057 -0,040	-0,049 -0,044	-0,001 -0,001	-0,226 -0,155	-0,197 -0,173	-0,007 -0,007	-0,497 -0,335	-0,440 -0,387	-0,024 -0,025					

-19,0	-0,022	-0,038	-0,001	-0,084	-0,150	-0,008	-0,172	-0,333	-0,026
-21,0	-0,005	-0,032	-0,001	-0,013	-0,126	-0,008	-0,007	-0,280	-0,026
-23,0	0,013	-0,0,6	-0,001	0,059	-0,103	-0,008	0,159	-0,526	-0,026
5,86	97,85	83,64 24,38 -73,50	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,100 0,011 -0,021	0,127 0,047 0,039	0,212 0,143 0,170	0,410 0,359 0,437	0,819 0,793 0,947
-15,0	-0,060	-0,050	-0,001	-0,238	-0,201	-0,007	-0,525	-0,449	-0,025
-17,0	-0,043	-0,045	-0,001	-0,168	-0,178	-0,008	-0,364	-0,396	-0,025
-19,0	-0,025	-0,039	-0,001	-0,097	-0,154	-0,008	-0,201	-0,343	-0,026
-21,0	-0,008	-0,033	-0,001	-0,026	-0,131	-0,008	-0,037	-0,290	-0,026
-23,0	0,010	-0,0,7	-0,001	0,045	-0,107	-0,008	0,129	-0,236	-0,026
5,90	97,74	80,93 24,13 -75,69	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,120 0,031 0,001	0,086 0,093 0,086	0,297 0,229 0,257	0,549 0,499 0,581	1,033 1,010 1,168
-15,0	-0,063	-0,051	-0,001	-0,251	-0,205	-0,007	-0,553	-0,459	-0,025
-17,0	-0,046	-0,046	-0,001	-0,181	-0,182	-0,008	-0,393	-0,406	-0,026
-19,0	-0,029	-0,040	-0,001	-0,111	-0,159	-0,008	-0,231	-0,353	-0,026
-21,0	-0,011	-0,034	-0,001	-0,040	-0,135	-0,008	-0,068	-0,300	-0,027
-23,0	0,006	-0,0,8	-0,001	0,031	-0,112	-0,008	0,099	-0,246	-0,027
5,94	97,63	78,39 23,89 -78,01	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5155 1,5181 1,5243	0,139 0,050 0,020	0,219 0,139 0,132	0,380 0,312 0,342	0,685 0,636 0,719	1,243 1,221 1,385
-15,0	-0,067	-0,053	-0,001	-0,263	-0,209	-0,007	-0,582	-0,468	-0,025
-17,0	-0,049	-0,047	-0,001	-0,194	-0,186	-0,008	-0,423	-0,416	-0,026
-19,0	-0,032	-0,041	-0,001	-0,124	-0,163	-0,008	-0,262	-0,363	-0,027
-21,0	-0,015	-0,035	-0,001	-0,054	-0,140	-0,008	-0,059	-0,310	-0,027
-23,0	0,003	-0,0,30	-0,001	0,017	-0,117	-0,008	0,067	-0,257	-0,027

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$					
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12	
5, 46	97, 57	79, 28 25, 76 -79, 74	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5139 1, 5163 1, 5220	-0, 002 -0, 030 0, 075	-0, 032 -0, 053 0, 072	-0, 044 -0, 054 0, 103	-0, 002 0, 002 0, 206	0, 154 0, 182 0, 448	
$\beta = 2^\circ$										
$\beta = 4^\circ$										
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	
-25, 0	-0, 008	-0, 033	-0, 001	-0, 025	-0, 130	-0, 009	-0, 031	-0, 286	-0, 030	
-27, 0	0, 007	-0, 028	-0, 001	0, 034	-0, 110	-0, 009	0, 108	-0, 242	-0, 030	
-29, 0	0, 021	-0, 023	-0, 001	0, 094	-0, 091	-0, 009	0, 248	-0, 197	-0, 030	
-31, 0	0, 036	-0, 018	-0, 001	0, 153	-0, 071	-0, 008	0, 389	-0, 152	-0, 028	
-33, 0	0, 050	-0, 014	-0, 001	0, 213	-0, 052	-0, 008	0, 532	-0, 106	-0, 028	
$\beta = 6^\circ$										
5, 50	97, 46	76, 84 25, 49 -82, 34	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 016 -0, 012 0, 092	0, 008 0, 012 0, 114	0, 029 0, 019 0, 178	0, 117 0, 124 0, 328	0, 334 0, 364 0, 634	
-25, 0	-0, 012	-0, 034	-0, 001	-0, 040	-0, 135	-0, 009	-0, 065	-0, 298	-0, 040	
-27, 0	0, 003	-0, 029	-0, 001	0, 019	-0, 115	-0, 009	0, 074	-0, 253	-0, 030	
-29, 0	0, 017	-0, 024	-0, 001	0, 079	-0, 096	-0, 009	0, 214	-0, 208	-0, 030	
-31, 0	0, 032	-0, 020	-0, 001	0, 138	-0, 076	-0, 009	0, 356	-0, 163	-0, 029	
-33, 0	0, 046	-0, 015	-0, 001	0, 198	-0, 057	-0, 008	0, 500	-0, 117	-0, 028	
5, 54	97, 35	74, 55 25, 22 -85, 12	C 1, 6213 D 1, 6259 F 1, 6373	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 033 0, 005 0, 110	0, 047 0, 027 0, 154	0, 100 0, 092 0, 251	0, 232 0, 239 0, 446	0, 510 0, 541 0, 815	
-25, 0	-0, 016	-0, 035	-0, 001	-0, 056	-0, 140	-0, 009	-0, 100	-0, 310	-0, 031	
-27, 0	-0, 001	-0, 030	-0, 001	0, 003	-0, 120	-0, 009	0, 038	-0, 265	-0, 031	

-29,0	0,013	-0,026	-0,001	0,063	-0,101	-0,009	0,179	-0,220	-0,030
-31,0	0,028	-0,021	-0,001	0,123	-0,081	-0,009	0,321	-0,174	-0,030
-33,0	0,042	-0,016	-0,001	0,183	-0,062	-0,009	0,466	-0,129	-0,029
5,58	97,23	72,39 24,96 -88,10	C	1,6213	0,049	0,085	0,168	0,343	0,679
			D	1,6259	0,021	0,064	0,160	0,351	0,712
			F	1,6373	0,126	0,191	0,321	0,561	0,991
-25,0	-0,020	-0,037	-0,001	-0,072	-0,145	-0,009	-0,136	-0,322	-0,031
-27,0	-0,005	-0,032	-0,001	-0,013	-0,126	-0,009	0,002	-0,277	-0,031
-29,0	0,009	-0,027	-0,001	0,046	-0,106	-0,009	0,142	-0,232	-0,031
-31,0	0,024	-0,022	-0,001	0,106	-0,087	-0,009	0,285	-0,186	-0,031
-33,0	0,038	-0,017	-0,001	0,167	-0,067	-0,009	0,430	-0,140	-0,030
5,62	97,12	70,35 24,70 -91,31	C	1,6213	0,065	0,120	0,234	0,451	0,844
			D	1,6259	0,037	0,100	0,226	0,460	0,877
			F	1,6373	0,141	0,228	0,388	0,672	1,160
-25,0	-0,024	-0,038	-0,001	-0,088	-0,151	-0,010	-0,173	-0,334	-0,032
-27,0	-0,009	-0,033	-0,001	-0,026	-0,131	-0,010	-0,035	-0,289	-0,032
-29,0	0,005	-0,028	-0,001	0,030	-0,112	-0,010	0,105	-0,244	-0,032
-31,0	0,019	-0,024	-0,001	0,089	-0,092	-0,009	0,248	-0,199	-0,031
-33,0	0,034	-0,019	-0,001	0,150	-0,073	-0,009	0,393	-0,153	-0,031
5,66	97,01	68,43 24,45 -94,77	C	1,6213	0,079	0,155	0,297	0,554	1,002
			D	1,6259	0,052	0,135	0,290	0,563	1,038
			F	1,6373	0,156	0,262	0,453	0,779	1,324
-25,0	-0,028	-0,039	-0,001	-0,106	-0,156	-0,010	-0,211	-0,346	-0,032
-27,0	-0,014	-0,035	-0,001	-0,047	-0,137	-0,010	-0,074	-0,302	-0,033
-29,0	0,001	-0,030	-0,001	0,012	-0,118	-0,010	0,066	-0,257	-0,033
-31,0	0,015	-0,025	-0,001	0,072	-0,098	-0,010	0,209	-0,212	-0,032
-33,0	0,030	-0,020	-0,001	0,132	-0,079	-0,010	0,354	-0,166	-0,032

$f' = 100,0$ ;  $v_2 = 39,1$ ;  $v_3 = 64,1$ ;  $d_1 = 2,0$ ;  $d_2 = 6,0$ ;  $c = 0,0000$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -29$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>3</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$				
					$\beta = 6^\circ$				
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12
5,36	97,45	77,42	C	1,6213	0,007	-0,031	-0,057	-0,080	0,074
		26,10	D	1,6259	-0,035	-0,066	-0,083	-0,050	0,085
		-82,84	F	1,6373	0,031	0,020	0,033	0,106	0,299
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$
-25,0	-0,019	-0,036	-0,001	-0,072	-0,145	-0,009	-0,138	-0,321	-0,031
-27,0	-0,006	-0,032	-0,001	-0,016	-0,126	-0,009	-0,008	-0,279	-0,031
-29,0	0,008	-0,027	-0,001	0,040	-0,108	-0,009	0,123	-0,237	-0,031
-31,0	0,021	-0,023	-0,001	0,095	-0,090	-0,009	0,254	-0,194	-0,031
-33,0	0,035	-0,019	-0,001	0,151	-0,072	-0,009	0,388	-0,152	-0,030
5,40	97,34	75,09	C	1,6213	0,024	0,007	0,012	0,073	0,244
		25,82	D	1,6259	-0,018	-0,028	-0,013	0,064	0,256
		-85,66	F	1,6373	0,048	0,058	0,104	0,222	0,473
-25,0	-0,03	-0,038	-0,001	-0,087	-0,150	-0,009	-0,174	-0,332	-0,032
-27,0	-0,010	-0,033	-0,001	-0,032	-0,132	-0,009	-0,044	-0,291	-0,032
-29,0	0,004	-0,029	-0,001	0,024	-0,113	-0,009	0,087	-0,249	-0,032
-31,0	0,017	-0,024	-0,001	0,079	-0,095	-0,009	0,219	-0,206	-0,031
-33,0	0,031	-0,020	-0,001	0,135	-0,076	-0,009	0,353	-0,164	-0,031
5,44	97,23	72,90	C	1,6213	0,040	0,044	0,079	0,180	0,408
		25,54	D	1,6259	-0,003	0,009	0,055	0,172	0,421
		-88,68	F	1,6373	0,064	0,096	0,171	0,333	0,643
-25,0	-0,027	-0,039	-0,001	-0,104	-0,155	-0,010	-0,210	-0,345	-0,032
-27,0	-0,014	-0,035	-0,001	-0,049	-0,137	-0,010	-0,081	-0,303	-0,032

-29,0	0,000	-0,030	-0,001	0,007	-0,119	-0,010	0,050	-0,261	-0,032	$h=\pm 6$ 0,056
-31,0	0,013	-0,026	-0,001	0,063	-0,101	-0,010	0,182	-0,219	-0,032	
-33,0	0,027	-0,021	-0,001	0,119	-0,082	-0,009	0,316	-0,176	-0,032	
5,48	97,11	70,84	C 1,6213	1,5139	0,054	0,078	0,144	0,285	0,508	
		25,27	D 1,6259	1,5163	0,013	0,044	0,119	0,276	0,580	
		-91,94	F 1,6373	1,5220	0,080	0,131	0,238	0,440	0,806	
-25,0	-0,032	-0,041	-0,001	-0,121	-0,161	-0,010	-0,248	-0,357	-0,033	$h=\pm 10$ 0,265
-27,0	-0,018	-0,036	-0,001	-0,066	-0,143	-0,010	-0,119	-0,316	-0,033	
-29,0	-0,005	-0,032	-0,001	-0,010	-0,125	-0,010	0,011	-0,274	-0,033	
-31,0	0,009	-0,027	-0,001	0,046	-0,106	-0,010	0,144	-0,231	-0,033	$h=\pm 6$ 0,055
-33,0	0,022	-0,023	-0,001	0,102	-0,088	-0,010	0,278	-0,189	-0,033	
5,52	97,00	68,89	C 1,6213	1,5139	0,070	0,112	0,204	0,385	0,721	
		25,01	D 1,6259	1,5163	0,028	0,077	0,181	0,377	0,734	
		-95,44	F 1,6373	1,5220	0,095	0,166	0,301	0,543	0,964	
-25,0	-0,036	-0,042	-0,001	-0,138	-0,167	-0,010	-0,286	-0,370	-0,033	$h=\pm 10$ 0,247
-27,0	-0,023	-0,038	-0,001	-0,083	-0,149	-0,010	-0,158	-0,329	-0,034	
-29,0	-0,009	-0,033	-0,001	-0,028	-0,131	0,010	-0,028	-0,287	-0,034	
-31,0	0,004	-0,029	-0,001	0,028	-0,112	-0,010	0,104	-0,245	-0,034	$h=\pm 6$ 0,054
-33,0	0,018	-0,024	-0,001	0,084	-0,094	-0,010	0,239	-0,202	-0,033	
5,56	96,89	67,04	C 1,6213	1,5139	0,079	0,144	0,262	0,496	0,867	
		24,75	D 1,6259	1,5163	0,042	0,110	0,240	0,475	0,883	
		-99,24	F 1,6373	1,5220	0,109	0,200	0,355	0,647	1,115	
-25,0	-0,040	-0,043	-0,001	-0,155	-0,173	-0,010	-0,325	-0,383	-0,034	$h=\pm 10$ 0,259
-27,0	-0,027	-0,039	-0,001	-0,101	-0,155	-0,010	-0,198	-0,342	-0,034	
-29,0	-0,014	-0,035	-0,001	-0,046	-0,137	-0,010	-0,069	-0,300	-0,034	
-31,0	0,000	-0,030	-0,001	0,009	-0,119	-0,010	0,063	-0,258	-0,034	$h=\pm 6$ 0,052
-33,0	0,013	-0,026	-0,001	0,065	-0,100	-0,010	0,197	-0,216	-0,034	

$f' = 100, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ;  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -29$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'					
					β = 4°					
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12	
5, 26	97, 33	75, 64	C 1, 6213	1, 5139	0, 015	-0, 030	-0, 069	-0, 076	-0, 007	h = ±10 0, 362
		26, 44	D 1, 6259	1, 5163	-0, 040	-0, 079	-0, 109	-0, 101	-0, 008	
		-86, 21	F 1, 6373	1, 5220	-0, 011	-0, 033	-0, 036	0, 011	0, 156	
		β = 6°								
5, 30	97, 22	73, 42	C 1, 6213	1, 5139	0, 029	0, 019	-0, 007	0, 027	0, 130	h = ±6 0, 152
		26, 15	D 1, 6259	1, 5163	-0, 024	-0, 044	-0, 044	0, 005	0, 153	
		-89, 27	F 1, 6373	1, 5220	0, 004	0, 004	0, 031	0, 118	0, 319	
		β = 4°								
5, 34	97, 11	71, 33	C 1, 6213	1, 5139	0, 046	0, 039	0, 067	0, 139	0, 313	h = ±10 0, 358
		25, 87	D 1, 6259	1, 5163	-0, 009	-0, 009	0, 019	0, 106	0, 306	
		-92, 57	F 1, 6373	1, 5220	0, 020	0, 039	0, 094	0, 221	0, 477	
		β = 6°								
5, 38	97, 00	69, 00	C 1, 6213	1, 5139	0, 039	0, 010	0, 057	0, 127	0, 303	h = ±10 0, 358
		24, 75	D 1, 6259	1, 5163	-0, 008	-0, 008	0, 018	0, 103	0, 303	
		-91, 25	F 1, 6373	1, 5220	0, 019	0, 008	0, 093	0, 218	0, 472	
		β = 4°								



-29,0	-0,014	-0,035	-0,001	-0,048	-0,137	-0,010	-0,078	-0,202	-0,034	$h=\pm 6$ 0,152
-31,0	-0,001	-0,030	-0,001	0,004	-0,120	-0,010	0,045	-0,262	-0,034	
-33,0	0,011	-0,026	-0,001	0,056	-0,103	-0,010	0,169	-0,223	-0,034	
5,38	96,99	69,35 25,59 -96,13	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,060 0,005 0,034	0,073 0,024 0,072	0,116 0,079 0,156	0,230 0,204 0,321	0,460 0,454 0,629	
-25,0	-0,044	-0,044	-0,001	-0,168	-0,176	-0,010	-0,358	-0,392	-0,034	$h=\pm 10$ 0,356
-27,0	-0,031	-0,040	-0,001	-0,117	-0,160	-0,010	-0,238	-0,354	-0,034	
-29,0	-0,018	-0,036	-0,001	-0,066	-0,143	-0,010	-0,118	-0,315	-0,035	
-31,0	-0,006	-0,032	-0,001	-0,015	-0,126	-0,010	0,004	-0,276	-0,035	$h=\pm 6$ 0,152
-33,0	0,006	-0,028	-0,001	0,037	-0,109	-0,010	0,128	-0,236	-0,035	
5,42	96,88	67,48 25,32 -99,98	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,070 0,019 0,048	0,103 0,055 0,104	0,175 0,137 0,214	0,322 0,298 0,416	0,601 0,597 0,774	
-25,0	-0,048	-0,046	-0,001	-0,186	-0,182	-0,010	-0,397	-0,405	-0,034	$h=\pm 10$ 0,354
-27,0	-0,036	-0,042	-0,001	-0,136	-0,166	-0,010	-0,279	-0,367	-0,035	
-29,0	-0,023	-0,038	-0,001	-0,085	-0,149	-0,011	-0,159	-0,329	-0,036	
-31,0	-0,011	-0,034	-0,001	-0,033	-0,132	-0,011	-0,038	-0,290	-0,036	$h=\pm 6$ 0,152
-33,0	0,002	-0,029	-0,001	0,018	-0,115	-0,011	0,086	-0,250	-0,036	
5,46	96,77	65,70 25,06 -104,16	C 1,6213 D 1,6259 F 1,6373	1,5139 1,5163 1,5220	0,086 0,031 0,060	0,134 0,085 0,134	0,230 0,192 0,270	0,411 0,388 0,509	0,737 0,734 0,915	
-25,0	-0,052	-0,047	-0,001	-0,204	-0,188	-0,010	-0,438	-0,419	-0,035	$h=\pm 10$ 0,352
-27,0	-0,040	-0,043	-0,001	-0,154	-0,172	-0,011	-0,321	-0,381	-0,036	
-29,0	-0,028	-0,039	-0,001	-0,104	-0,155	-0,011	-0,202	-0,343	-0,036	
-31,0	-0,016	-0,035	-0,001	-0,053	-0,139	-0,011	-0,081	-0,304	-0,037	$h=\pm 6$ 0,152
-33,0	-0,003	-0,031	-0,001	-0,001	-0,122	-0,011	0,042	-0,265	-0,037	

$f' = 100, 0$ ;  $v_2 = 39, 1$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = -0, 0010$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -29$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'						h=±10 0,262 h=±6 0,028					
					β=4°											
					h=4	h=6	h=8	h=10	h=12							
5,16	97,21	73,95	C 1,6213	1,5139	0,024	-0,018	-0,074	-0,107	-0,075	h=±10 0,261 h=±6 0,028						
		26,79	D 1,6259	1,5163	-0,045	-0,092	-0,135	-0,150	-0,095							
		-89,87	F 1,6373	1,5220	-0,053	-0,084	-0,103	-0,084	0,018							
β=2°																
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	h=±10 0,262 h=±6 0,028						
											β=6°					
5,20	97,10	71,82	C 1,6213	1,5139	0,040	0,001	-0,020	-0,013	0,080	h=±10 0,261 h=±6 0,028						
		26,49	D 1,6259	1,5163	-0,031	-0,058	-0,074	-0,052	0,055							
		-93,21	F 1,6373	1,5220	-0,039	-0,051	-0,041	0,017	0,171							
-25,0 -27,0 -29,0 -31,0 -33,0	-0,046 -0,035 -0,023 -0,011 0,000	-0,045	-0,001	-0,180	-0,180	-0,010	-0,387	-0,401	-0,034	h=±10 0,261 h=±6 0,028						
		-0,041	-0,001	-0,133	-0,164	-0,010	-0,275	-0,364	-0,034							
		-0,037	-0,001	-0,084	-0,148	-0,010	-0,163	-0,328	-0,035							
5,24	96,99	-0,034	-0,001	-0,037	-0,133	-0,010	-0,050	-0,292	-0,035	h=±10 0,261 h=±6 0,028						
		-0,030	-0,001	0,011	-0,117	-0,010	0,065	-0,255	-0,035							
-25,0 -27,0	-0,051 -0,039	69,82	C 1,6213	1,5139	0,059	0,038	0,039	0,084	0,221	h=±10 0,260						
		26,20	D 1,6259	1,5163	-0,017	-0,026	-0,016	0,043	0,197							
		-96,82	F 1,6373	1,5220	-0,025	-0,017	0,018	0,114	0,316							
-25,0 -27,0	-0,051 -0,039	-0,047	-0,001	-0,198	-0,186	-0,010	-0,426	-0,414	-0,035	h=±10 0,260						
		-0,043	-0,001	-0,150	-0,170	-0,010	-0,315	-0,378	-0,036							

-29,0	-0,027	-0,039	-0,001	-0,103	-0,155	-0,011	-0,204	-0,342	-0,036	$h=\pm 6$ 0,028
-31,0	-0,016	-0,035	-0,001	-0,035	-0,139	-0,011	-0,091	-0,305	-0,036	
-33,0	-0,004	-0,031	-0,001	-0,007	-0,123	-0,011	0,023	-0,269	-0,037	
5,28	96,87	67,92 25,92 -100,73	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,068 -0,003 -0,012	0,067 0,005 0,013	0,093 0,040 0,075	0,176 0,134 0,206	0,358 0,334 0,457	
-25,0	-0,055	-0,048	-0,001	-0,216	-0,192	-0,010	-0,466	-0,427	-0,035	$h=\pm 10$ 0,259
-27,0	-0,044	-0,044	-0,001	-0,169	-0,176	-0,011	-0,356	-0,391	-0,036	
-29,0	-0,032	-0,041	-0,001	-0,122	-0,161	-0,011	-0,245	-0,356	-0,037	
-31,0	-0,021	-0,037	-0,001	-0,074	-0,145	-0,011	-0,133	-0,320	-0,037	$h=\pm 6$ 0,027
-33,0	-0,009	-0,033	-0,001	-0,026	-0,030	-0,011	-0,020	-0,283	-0,037	
5,32	96,76	66,12 25,64 -104,98	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,079 0,009 0,000	0,097 0,034 0,043	0,147 0,094 0,137	0,261 0,221 0,294	0,489 0,466 0,592	
-25,0	-0,060	-0,050	-0,001	-0,234	-0,198	-0,011	-0,507	-0,441	-0,036	$h=\pm 10$ 0,258
-27,0	-0,048	-0,046	-0,001	-0,188	-0,183	-0,011	-0,399	-0,405	-0,037	
-29,0	-0,037	-0,042	-0,001	-0,141	-0,167	-0,011	-0,289	-0,370	-0,038	
-31,0	-0,026	-0,038	-0,001	-0,094	-0,152	-0,011	-0,177	-0,334	-0,038	$h=\pm 6$ 0,027
-33,0	-0,014	-0,035	-0,031	-0,046	-0,136	-0,011	-0,064	-0,298	-0,038	
5,36	96,65	64,42 25,37 -109,62	C D F	1,6213 1,6259 1,6373	0,098 0,021 0,013	0,130 0,061 0,071	0,194 0,144 0,181	0,347 0,304 0,379	0,656 0,592 0,720	
-25,0	-0,064	-0,051	-0,001	-0,253	-0,204	-0,011	-0,549	-0,454	-0,036	$h=\pm 10$ 0,257
-27,0	-0,053	-0,048	-0,001	-0,207	-0,189	-0,011	-0,442	-0,420	-0,037	
-29,0	-0,042	-0,044	-0,001	-0,161	-0,174	-0,011	-0,333	-0,385	-0,038	
-31,0	-0,031	-0,040	-0,001	-0,114	-0,158	-0,012	-0,222	-0,349	-0,039	$h=\pm 6$ 0,027
-33,0	-0,019	-0,036	-0,001	-0,067	-0,143	-0,012	-0,110	-0,314	-0,039	

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 39, 1; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'														
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12										
5,06	97,09	72,33	C 1,6213	1,5139	0,032	-0,027	-0,092	-0,139	-0,134										
		27,15	D 1,6259	1,5163	-0,050	-0,104	-0,160	-0,198	-0,178										
		-93,86	F 1,6373	1,5220	-0,096	-0,135	-0,170	-0,175	-0,113										
β = 2°					β = 4°														
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'										
	-25,0	-0,053	-0,047	-0,001	-0,209	-0,189	-0,010	-0,452	-0,421	-0,035									
	-27,0	-0,042	-0,044	-0,001	-0,164	-0,174	-0,011	-0,348	-0,387	-0,036									
	-29,0	-0,031	-0,040	-0,001	-0,119	-0,159	-0,011	-0,244	-0,353	-0,036									
	-31,0	-0,021	-0,037	-0,001	-0,075	-0,145	-0,011	-0,139	-0,320	-0,037									
-33,0	-0,010	-0,033	-0,001	-0,031	-0,130	-0,011	-0,035	-0,286	-0,037										
5,10	96,98	70,29	C 1,6213	1,5139	0,045	0,004	-0,035	-0,047	0,004										
		26,84	D 1,6259	1,5163	-0,037	-0,073	-0,104	-0,106	-0,040										
		-97,53	F 1,6373	1,5220	-0,082	-0,103	-0,113	-0,082	0,028										
-25,0 -27,0 -29,0 -31,0 -33,0	-0,058 -0,047 -0,036 -0,025 -0,015	-0,049 -0,045 -0,042 -0,038 -0,035	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,226 -0,182 -0,138 -0,094 -0,049	-0,195 -0,180 -0,166 -0,151 -0,137	-0,011 -0,011 -0,011 -0,011 -0,011	-0,491 -0,388 -0,285 -0,181 -0,077	-0,434 -0,401 -0,367 -0,334 -0,300	-0,036 -0,036 -0,037 -0,038 -0,038										
										5,14	96,87	68,37	C 1,6213	1,5139	0,059	0,034	0,020	0,040	0,135
												26,55	D 1,6259	1,5163	-0,024	-0,044	-0,050	-0,018	0,092
												-101,50	F 1,6373	1,5220	-0,069	-0,073	-0,057	0,008	0,162
										-25,0 -27,0	-0,062 -0,052	-0,050 -0,047	-0,001 -0,001	-0,244 -0,201	-0,201 -0,186	-0,011 -0,011	-0,532 -0,430	-0,448 -0,414	-0,036 -0,037

-29,0	-0,041	-0,043	-0,001	-0,157	-0,172	-0,011	-0,328	-0,381	-0,038
-31,0	-0,030	-0,040	-0,001	-0,113	-0,158	-0,011	-0,224	-0,348	-0,038
-33,0	-0,020	-0,036	-0,001	-0,069	-0,143	-0,012	-0,120	-0,315	-0,039
5,18	96,75	66,55 26,26 -105,81	C	1,6213	0,072	0,062	0,071	0,123	0,261
			D	1,5163	-0,012	-0,015	0,002	0,066	0,219
			F	1,5220	-0,057	-0,044	-0,004	0,093	0,292
-25,0	-0,067	-0,052	-0,001	-0,263	-0,207	-0,011	-0,573	-0,461	-0,037
-27,0	-0,056	-0,048	-0,001	-0,220	-0,193	-0,011	-0,473	-0,429	-0,038
-29,0	-0,046	-0,045	-0,001	-0,176	-0,178	-0,011	-0,371	-0,396	-0,039
-31,0	-0,035	-0,041	-0,001	-0,133	-0,164	-0,012	-0,269	-0,363	-0,039
-33,0	-0,025	-0,038	-0,001	-0,089	-0,150	-0,012	-0,165	-0,330	-0,040
5,22	96,64	64,83 25,97 -110,53	C	1,5139	0,082	0,088	0,120	0,202	0,381
			D	1,5163	0,001	0,012	0,051	0,146	0,339
			F	1,5220	-0,046	-0,017	0,066	0,174	0,416
-25,0	-0,072	-0,054	-0,001	-0,282	-0,213	-0,011	-0,616	-0,475	-0,037
-27,0	-0,061	-0,050	-0,001	-0,239	-0,199	-0,011	-0,516	-0,443	-0,038
-29,0	-0,051	-0,047	-0,001	-0,196	-0,185	-0,012	-0,416	-0,411	-0,039
-31,0	-0,040	-0,043	-0,001	-0,153	-0,171	-0,012	-0,315	-0,378	-0,040
-33,0	-0,030	-0,040	-0,002	-0,110	-0,156	-0,012	-0,212	-0,345	-0,041
5,26	96,53	63,19 25,70 -115,69	C	1,5139	0,095	0,114	0,166	0,277	0,494
			D	1,5163	0,011	0,037	0,098	0,222	0,455
			F	1,5220	-0,040	0,004	0,097	0,258	0,533
-25,0	-0,076	-0,055	-0,001	-0,301	-0,220	-0,011	-0,659	-0,490	-0,038
-27,0	-0,066	-0,052	-0,001	-0,259	-0,206	-0,012	-0,561	-0,458	-0,039
-29,0	-0,056	-0,048	-0,001	-0,217	-0,192	-0,012	-0,462	-0,426	-0,040
-31,0	-0,046	-0,045	-0,002	-0,175	-0,178	-0,012	-0,362	-0,394	-0,041
-33,0	-0,035	-0,042	-0,002	-0,132	-0,164	-0,012	-0,260	-0,362	-0,042

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'									
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12					
4, 97	97, 04	69, 80	C	1, 5155	0, 003	-0, 042	-0, 079	-0, 094	-0, 040					
		27, 62	D	1, 5181	-0, 034	-0, 069	-0, 097	-0, 094	-0, 025					
		-93, 87	F	1, 5243	0, 069	0, 054	0, 057	0, 095	0, 218					
β = 2°					β = 4°					β = 6°				
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'					
-35, 0	0, 009	-0, 027	-0, 001	0, 048	-0, 106	-0, 011	0, 150	-0, 230	-0, 036					
-38, 0	0, 026	-0, 021	-0, 001	0, 118	-0, 083	-0, 011	0, 320	-0, 176	-0, 035					
-41, 0	0, 043	-0, 016	-0, 001	0, 189	-0, 060	-0, 010	0, 494	-0, 123	-0, 034					
-44, 0	0, 060	-0, 010	-0, 001	0, 260	-0, 037	-0, 010	0, 671	-0, 068	-0, 032					
-47, 0	0, 076	-0, 005	-0, 001	0, 331	-0, 014	-0, 009	0, 851	-0, 013	-0, 030					
5, 03	96, 87	67, 00	C	1, 5155	0, 023	0, 004	0, 013	0, 050	0, 163					
		27, 15	D	1, 5181	-0, 015	-0, 022	-0, 011	0, 043	0, 184					
		-99, 48	F	1, 5243	0, 091	0, 101	0, 137	0, 234	0, 435					
-35, 0	0, 002	-0, 029	-0, 001	0, 019	-0, 116	-0, 011	0, 086	-0, 251	-0, 037					
-38, 0	0, 019	-0, 024	-0, 001	0, 090	-0, 092	-0, 011	0, 258	-0, 197	-0, 037					
-41, 0	0, 036	-0, 018	-0, 001	0, 161	-0, 069	-0, 011	0, 432	-0, 143	-0, 036					
-44, 0	0, 053	-0, 013	-0, 001	0, 233	-0, 046	-0, 010	0, 611	-0, 088	-0, 034					
-47, 0	0, 070	-0, 007	-0, 001	0, 306	-0, 023	-0, 010	0, 795	-0, 032	-0, 032					
5, 09	96, 70	64, 41	C	1, 5155	0, 039	0, 051	0, 091	0, 175	0, 366					
		26, 70	D	1, 5181	0, 005	0, 021	0, 068	0, 173	0, 378					
		-105, 83	F	1, 5243	0, 106	0, 142	0, 232	0, 372	0, 632					
-35, 0	-0, 006	-0, 032	-0, 001	-0, 011	-0, 126	-0, 012	0, 018	-0, 274	-0, 039					
-38, 0	0, 011	-0, 026	-0, 001	0, 059	-0, 103	-0, 011	0, 190	-0, 220	-0, 038					

-41,0	0,028	-0,021	-0,001	0,131	-0,080	-0,011	0,366	-0,165	-0,038
-44,0	0,045	-0,015	-0,001	0,203	-0,056	-0,011	0,546	-0,110	-0,036
-47,0	0,062	-0,010	-0,001	0,276	-0,033	-0,010	0,732	-0,053	-0,034
5,15	96,53	62,01 26,26 -113,06	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,056 0,023 0,119	0,084 0,061 0,186	0,158 0,141 0,302	0,293 0,293 0,491	0,542 0,561 0,817
-35,0	-0,014	-0,035	-0,002	-0,044	-0,136	-0,012	-0,053	-0,298	-0,040
-38,0	0,003	-0,029	-0,002	0,026	-0,114	-0,012	0,117	-0,244	-0,040
-41,0	0,020	-0,024	-0,001	0,098	-0,090	-0,012	0,293	-0,189	-0,040
-44,0	0,037	-0,018	-0,001	0,170	-0,067	-0,012	0,474	-0,134	-0,038
-47,0	0,034	-0,012	-0,001	0,244	-0,044	-0,011	0,662	-0,077	-0,036
5,21	96,36	59,78 25,84 -121,40	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,072 0,038 0,142	0,130 0,098 0,221	0,226 0,209 0,368	0,399 0,403 0,602	0,714 0,729 0,992
-35,0	-0,022	-0,038	-0,002	-0,078	-0,148	-0,012	-0,129	-0,323	-0,042
-38,0	-0,006	-0,032	-0,002	-0,008	-0,125	-0,012	0,040	-0,270	-0,042
-41,0	0,011	-0,026	-0,002	0,063	-0,102	-0,012	0,215	-0,215	-0,042
-44,0	0,028	-0,021	-0,002	0,135	-0,079	-0,012	0,396	-0,160	-0,041
-47,0	0,045	-0,015	-0,002	0,209	-0,055	-0,012	0,585	-0,103	-0,039
5,27	96,19	57,72 25,42 -131,09	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,088 0,053 0,157	0,161 0,132 0,258	0,288 0,272 0,429	0,504 0,504 0,708	0,863 0,885 1,154
-35,0	-0,031	-0,040	-0,002	-0,113	-0,160	-0,013	-0,208	-0,349	-0,044
-38,0	-0,015	-0,035	-0,002	-0,045	-0,137	-0,013	-0,042	-0,297	-0,044
-41,0	0,002	-0,030	-0,002	0,025	-0,115	-0,013	0,132	-0,243	-0,044
-44,0	0,018	-0,024	-0,002	0,097	-0,092	-0,013	0,312	-0,188	-0,043
-47,0	0,035	-0,018	-0,002	0,170	-0,068	-0,013	0,500	-0,131	-0,042

$f_0' = 100,0$ ;  $v_2 = 33,9$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 2,0$ ;  $d_2 = 6,0$ ;  $c = 0,0000$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -41$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'						h	Δy'
					β = 4°							
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12			
4,90	96,92	68,31 27,85 -98,18	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	0,010 -0,037 0,030	-0,034 -0,076 0,009	-0,077 -0,110 0,001	-0,101 -0,120 0,026	-0,069 -0,072 0,123	h = ±10 0,251 h = ±6 0,026		
4,96	96,75	65,62 27,37 -104,35	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	-0,010 0,056 -0,081 0,187 0,253	-0,125 -0,103 -0,081 -0,061 -0,040	-0,011 -0,011 -0,011 -0,011 -0,010	0,000 -0,030 0,081	0,023 0,007 0,157	h = ±10 0,259 h = ±6 0,042		
5,02	96,58	63,13 26,91 -111,38	C D F	1,5155 1,5181 1,5243	-0,040 0,025 0,091 0,158 0,224	-0,135 -0,113 -0,092 -0,071 -0,049	-0,012 -0,012 -0,012 -0,011 -0,011	0,050 0,043 0,156	0,146 0,127 0,278	h = ±10 0,267		
-35,0 -38,0 -41,0 -44,0 -47,0	-0,005 0,011 0,026 0,042 0,057	-0,032 -0,026 -0,021 -0,016 -0,011	-0,001 -0,001 -0,001 -0,001 -0,001	-0,001 0,025 0,091 0,158 0,224	-0,012 -0,012 -0,012 -0,011 -0,011	0,029 -0,018 0,049	0,009 -0,032 0,054	0,000 -0,030 0,081	0,023 0,007 0,157	h = ±10 0,259 h = ±6 0,042		
-35,0 -38,0 -41,0 -44,0 -47,0	-0,021 -0,005	-0,037 -0,032	-0,002 -0,002	-0,072 -0,007	-0,145 -0,124	-0,012 -0,012	-0,012 -0,012	-0,122 0,036	-0,041 -0,041	h = ±10 0,267		



-41,0	0,011	-0,027	-0,002	0,059	-0,103	-0,012	0,197	-0,219	-0,041	$h=\pm 6$ 0,058
-44,0	0,026	-0,021	-0,002	0,125	-0,081	-0,012	0,362	-0,168	-0,040	
-47,0	0,042	-0,016	-0,001	0,192	-0,060	-0,012	0,532	-0,116	-0,039	
5,08	96,41	60,83 26,47 -119,45	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,064 0,016 0,082	0,087 0,046 0,131	0,142 0,110 0,225	0,255 0,237 0,391	0,467 0,468 0,678	
-35,0	-0,029	-0,040	-0,002	-0,106	-0,157	-0,013	-0,197	-0,344	-0,043	$h=\pm 10$ 0,275
-38,0	-0,014	-0,035	-0,002	-0,042	-0,136	-0,013	-0,041	-0,295	-0,043	
-41,0	0,002	-0,029	-0,002	0,024	-0,115	-0,013	0,119	-0,245	-0,043	
-44,0	0,017	-0,024	-0,002	0,090	-0,093	-0,013	0,284	-0,194	-0,042	$h=\pm 6$ 0,074
-47,0	0,033	-0,019	-0,002	0,157	-0,072	-0,013	0,455	-0,141	-0,041	
5,14	96,24	58,69 26,03 -128,81	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,078 0,030 0,095	0,128 0,079 0,151	0,203 0,173 0,287	0,354 0,339 0,494	0,623 0,622 0,836	
-35,0	-0,038	-0,043	-0,002	-0,142	-0,168	-0,013	-0,276	-0,370	-0,044	$h=\pm 10$ 0,283
-38,0	-0,023	-0,038	-0,002	-0,078	-0,148	-0,013	-0,123	-0,322	-0,045	
-41,0	-0,008	-0,035	-0,002	-0,014	-0,127	-0,014	0,036	-0,272	-0,045	
-44,0	0,008	-0,028	-0,002	0,052	-0,106	-0,014	0,200	-0,222	-0,045	$h=\pm 6$ 0,090
-47,0	0,023	-0,022	-0,002	0,119	-0,084	-0,013	0,371	-0,170	-0,044	
5,20	96,07	56,69 25,62 -139,81	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,088 0,043 0,091	0,149 0,110 0,195	0,325 0,229 0,344	0,448 0,431 0,588	0,757 0,764 0,981	
-35,0	-0,047	-0,046	-0,002	-0,179	-0,181	-0,014	-0,360	-0,398	-0,046	$h=\pm 10$ 0,294
-38,0	-0,033	-0,041	-0,002	-0,117	-0,161	-0,014	-0,209	-0,350	-0,047	
-41,0	-0,018	-0,036	-0,002	-0,054	-0,140	-0,014	-0,052	-0,302	-0,048	
-44,0	-0,003	-0,031	-0,002	0,011	-0,119	-0,014	0,110	-0,252	-0,047	$h=\pm 6$ 0,105
-47,0	0,013	-0,026	-0,002	0,077	-0,098	-0,014	0,280	-0,200	-0,047	

$f' = 100, 0$ ;  $v_2 = 33, 9$ ;  $v_3 = 58, 9$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = -0, 0005$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -41$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'						h = 12
					β = 6°						
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12		
4, 85	96, 74	66, 00	C	1, 5155	0, 028	-0, 020	-0, 051	-0, 072	-0, 042	h = ±10 0, 218	
		27, 92	D	1, 5181	-0, 034	-0, 069	-0, 099	-0, 107	-0, 060		
		-105, 10	F	1, 5243	-0, 004	-0, 022	-0, 030	-0, 004	-0, 090		
β = 2°											
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	β = 6°	x <sub>s</sub>	Δy'
4, 92	96, 54	63, 08	C	1, 5155	0, 047	0, 049	0, 053	0, 062	0, 163	h = ±6 0, 010	
		27, 36	D	1, 5181	-0, 014	-0, 023	-0, 016	0, 027	0, 142		
		-113, 51	F	1, 5243	0, 015	0, 023	0, 055	0, 134	0, 296		
-35, 0 -38, 0 -41, 0 -44, 0 -47, 0	-0, 031 -0, 017 -0, 002 0, 012 0, 026	0, 040	-0, 002	-0, 116	-0, 159	-0, 013	-0, 223	-0, 351	-0, 043	h = ±10 0, 218	
		-0, 036	-0, 002	-0, 056	-0, 140	-0, 013	-0, 079	-0, 305	-0, 043		
		-0, 031	-0, 002	0, 004	-0, 120	-0, 013	0, 068	-0, 259	-0, 043		
-44, 0 -47, 0	0, 012 0, 026	-0, 026	-0, 002	0, 065	-0, 101	-0, 013	0, 219	-0, 212	-0, 043	h = ±6 0, 026	
		-0, 021	-0, 002	0, 126	-0, 081	-0, 013	0, 373	-0, 165	-0, 042		
4, 99	96, 34	60, 42	C	1, 5155	0, 065	0, 075	0, 106	0, 183	0, 343	h = ±10 0, 219	
		26, 82	D	1, 5181	0, 004	0, 018	0, 058	0, 149	0, 326		
		-123, 44	F	1, 5243	0, 033	0, 065	0, 132	0, 258	0, 486		
-35, 0 -38, 0	-0, 041 -0, 027	-0, 044	-0, 002	-0, 156	-0, 173	-0, 013	-0, 314	-0, 381	-0, 045	h = ±10 0, 219	
		-0, 039	-0, 002	-0, 097	-0, 154	-0, 014	-0, 171	-0, 336	-0, 045		

-41,0	-0,013	-0,034	-0,002	-0,038	-0,134	-0,014	-0,026	-0,290	-0,046	$h=\pm 6$ 0,042
-44,0	0,001	-0,030	-0,002	0,022	-0,115	-0,014	0,124	-0,244	-0,046	
-47,0	0,015	-0,025	-0,002	0,102	-0,077	-0,014	0,278	-0,197	-0,045	
5,06	96,15	57,96 26,31 -135,32	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,083 0,020 0,048	0,110 0,055 0,102	0,178 0,126 0,200	0,290 0,258 0,370	0,508 0,493 0,657	
-35,0	-0,552	-0,047	-0,002	-0,199	-0,187	-0,014	-0,409	-0,412	-0,047	$h=\pm 10$ 0,220
-38,0	-0,038	-0,043	-0,002	-0,142	-0,168	-0,014	-0,270	-0,368	-0,048	
-41,0	-0,025	-0,038	-0,002	-0,083	-0,149	-0,014	-0,127	-0,324	-0,048	
-44,0	-0,011	-0,034	-0,002	-0,024	-0,130	-0,014	0,021	-0,278	-0,049	$h=\pm 6$ 0,058
-47,0	0,003	-0,029	-0,002	0,036	-0,111	-0,014	0,174	-0,232	-0,048	
5,13	95,95	55,70 25,81 -149,80	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,096 0,034 0,061	0,143 0,087 0,133	0,231 0,186 0,260	0,388 0,354 0,469	0,656 0,643 0,810	
-35,0	-0,064	-0,051	-0,002	-0,244	-0,202	-0,014	-0,510	-0,446	-0,049	$h=\pm 10$ 0,221
-38,0	-0,050	-0,047	-0,002	-0,189	-0,184	-0,015	-0,375	-0,403	-0,050	
-41,0	-0,037	-0,042	-0,002	-0,132	-0,166	-0,015	-0,235	-0,360	-0,051	
-44,0	-0,023	-0,038	-0,002	-0,074	-0,147	-0,015	-0,090	-0,315	-0,052	$h=\pm 6$ 0,075
-47,0	-0,010	-0,033	-0,002	-0,015	-0,128	-0,016	0,061	-0,269	-0,052	
5,20	95,75	53,61 25,33 -187,83	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,108 0,046 0,072	0,171 0,116 0,161	0,283 0,237 0,312	0,473 0,441 0,556	0,786 0,774 0,945	
-35,0	-0,075	-0,055	-0,002	-0,292	-0,218	-0,015	-0,616	-0,481	-0,051	$h=\pm 10$ 0,221
-38,0	-0,063	-0,051	-0,002	-0,239	-0,200	-0,016	-0,486	-0,440	-0,053	
-41,0	-0,050	-0,046	-0,002	-0,184	-0,183	-0,016	-0,351	-0,398	-0,054	
-44,0	-0,037	-0,042	-0,002	-0,128	-0,165	-0,016	-0,210	-0,355	-0,055	$h=\pm 6$ 0,093
-47,0	-0,024	-0,038	-0,002	-0,071	-0,146	-0,017	-0,062	-0,310	-0,055	

$f' = 100,0$ ;  $v_2 = 33,9$ ;  $v_3 = 58,9$ ;  $d_1 = 2,0$ ;  $d_2 = 6,0$ ;  $c = -0,0010$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -41$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$				
					$\beta = 6^\circ$				
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12
4,80	96,56	63,84 27,99 -113,09	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,042 -0,032 -0,040	0,004 -0,065 -0,057	-0,033 -0,094 -0,064	-0,052 -0,102 -0,040	-0,025 -0,060 0,044
$\beta = 2^\circ$									
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$
-35,0	-0,039	-0,043	-0,002	-0,146	-0,169	-0,013	-0,269	-0,373	-0,044
-38,0	-0,025	-0,038	-0,002	-0,091	-0,151	-0,013	-0,164	-0,331	-0,045
-41,0	-0,012	-0,034	-0,002	-0,036	-0,133	-0,013	-0,030	-0,289	-0,045
-44,0	0,001	-0,030	-0,002	0,019	-0,115	-0,013	0,107	-0,247	-0,045
-47,0	0,014	-0,025	-0,002	0,074	-0,098	-0,013	0,244	-0,204	-0,044
4,87	96,37	61,11 27,43 -122,93	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,060 -0,014 -0,022	0,045 -0,024 -0,016	0,041 -0,020 0,012	0,067 0,018 0,081	0,155 0,120 0,229
-35,0	-0,049	-0,046	-0,002	-0,187	-0,182	-0,014	-0,387	-0,403	-0,046
-38,0	-0,036	-0,042	-0,002	-0,133	-0,165	-0,014	-0,257	-0,362	-0,047
-41,0	-0,023	-0,038	-0,002	-0,078	-0,147	-0,014	-0,124	-0,320	-0,047
-44,0	-0,010	-0,033	-0,002	-0,024	-0,130	-0,014	0,012	-0,278	-0,048
-47,0	0,003	-0,029	-0,002	0,031	-0,112	-0,014	0,150	-0,236	-0,047
4,94	96,17	58,60 26,89 -134,71	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,076 0,002 -0,008	0,082 0,013 0,020	0,107 0,046 0,078	0,174 0,125 0,191	0,317 0,283 0,396
-35,0	-0,060	-0,050	-0,002	-0,230	-0,197	-0,014	-0,483	-0,435	-0,048
-38,0	-0,047	-0,046	-0,002	-0,177	-0,180	-0,014	-0,356	-0,395	-0,049
									$h = \pm 10$ 0,156

-41,0	-0,034	-0,041	-0,002	-0,124	-0,162	-0,015	-0,226	-0,354	-0,050	$h=\pm 6$ 0,046
-44,0	-0,022	-0,037	-0,002	-0,071	-0,145	-0,015	-0,092	-0,313	-0,051	
-47,0	-0,009	-0,033	-0,002	-0,016	-0,128	-0,015	0,046	-0,271	-0,051	
5,01	95,97	56,29 26,37 -149,05	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,091 0,015 0,006	0,114 0,044 0,052	0,166 0,105 0,138	0,269 0,221 0,288	0,460 0,429 0,545	
-35,0	-0,071	-0,053	-0,002	-0,275	-0,212	-0,015	-0,584	-0,469	-0,050	$h=\pm 10$ 0,142
-38,0	-0,059	-0,049	-0,002	-0,225	-0,195	-0,015	-0,430	-0,430	-0,051	
-41,0	-0,047	-0,045	-0,002	-0,173	-0,179	-0,016	-0,335	-0,391	-0,053	
-44,0	-0,034	-0,041	-0,002	-0,121	-0,162	-0,016	-0,201	-0,350	-0,054	$h=\pm 6$ 0,026
-47,0	-0,022	-0,037	-0,002	-0,068	-0,145	-0,016	-0,069	-0,309	-0,054	
5,08	95,77	54,16 25,87 -166,88	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,102 0,028 0,017	0,142 0,072 0,079	0,216 0,156 0,188	0,351 0,304 0,373	0,587 0,556 0,676	
-35,0	-0,083	-0,057	-0,002	-0,323	-0,228	-0,015	-0,650	-0,504	-0,052	$h=\pm 10$ 0,128
-38,0	-0,072	-0,054	-0,002	-0,275	-0,212	-0,016	-0,573	-0,467	-0,054	
-41,0	-0,060	-0,050	-0,002	-0,226	-0,196	-0,016	-0,451	-0,429	-0,056	
-44,0	-0,048	-0,046	-0,002	-0,176	-0,180	-0,017	-0,324	-0,390	-0,057	$h=\pm 6$ 0,006
-47,0	-0,036	-0,042	-0,002	-0,124	-0,163	-0,017	-0,192	-0,350	-0,058	
5,15	95,57	52,18 25,39 -189,67	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5155 1,5181 1,5243	0,115 0,038 0,048	0,166 0,095 0,125	0,261 0,198 0,256	0,424 0,374 0,472	0,697 0,666 0,818	
-35,0	-0,096	-0,062	-0,002	-0,373	-0,244	-0,016	-0,801	-0,541	-0,054	$h=\pm 10$ 0,114
-38,0	-0,085	-0,058	-0,002	-0,328	-0,229	-0,017	-0,690	-0,506	-0,056	
-41,0	-0,074	-0,054	-0,002	-0,281	-0,214	-0,017	-0,574	-0,470	-0,058	
-44,0	-0,063	-0,051	-0,002	-0,233	-0,199	-0,018	-0,453	-0,433	-0,060	$h=\pm 6$ -0,014
-47,0	-0,051	-0,047	-0,002	-0,184	-0,183	-0,018	-0,326	-0,395	-0,061	

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 58, 9; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'						
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12		
4,73	96,44	62,59 28,22 -119,47	C	1,5155	0,052	0,009	-0,038	-0,073	-0,069		
			D	1,5181	-0,036	-0,074	-0,114	-0,138	-0,121		
			F	1,5243	-0,081	-0,107	-0,125	-0,119	-0,063		
			β = 4°							β = 6°	
4,80	96,25	59,96 27,65 -130,54	C	1,5155	0,068	0,046	0,029	0,035	0,094		
			D	1,5181	-0,020	-0,038	-0,037	-0,029	0,046		
			F	1,5243	-0,066	-0,069	-0,056	-0,008	0,105		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94	C	1,5155	0,082	0,079	0,089	0,132	0,240		
			D	1,5181	-0,006	-0,005	0,013	0,068	0,190		
			F	1,5243	-0,052	-0,036	0,005	0,091	0,255		
			β = 4°							β = 6°	
4,87	96,05	57,55 27,10 -143,94									

- 41,0	-0,052	-	0,047	-0,002	-0,198	-0,186	-0,016	-0,396	-0,409	-0,053
- 44,0	-0,041	-	0,044	-0,002	-0,150	-0,171	-0,016	-0,278	-0,372	-0,054
- 47,0	-0,030	-	0,040	-0,002	-0,103	-0,156	-0,016	-0,157	-0,335	-0,055
4,94	95,85									
			55,32	1,6421	1,5155	0,095	0,107	0,141	0,217	0,368
			26,58	1,6475	1,5181	0,007	0,023	0,065	0,153	0,319
			-160,48	1,6612	1,5243	-0,041	-0,008	0,057	0,178	0,388
- 35,0	-0,087	-	0,058	-0,002	-0,339	-0,232	-0,016	-0,729	-0,516	-0,052
- 38,0	-0,076	-	0,055	-0,002	-0,293	-0,218	-0,016	-0,622	-0,482	-0,054
- 41,0	-0,065	-	0,052	-0,002	-0,240	-0,203	-0,017	-0,511	-0,447	-0,056
- 44,0	-0,055	-	0,048	-0,002	-0,204	-0,189	-0,017	-0,397	-0,412	-0,058
- 47,0	-0,044	-	0,044	-0,002	-0,158	-0,174	-0,018	-0,279	-0,376	-0,059
5,01	95,65									
			53,26	1,6421	1,5155	0,106	0,131	0,184	0,288	0,477
			26,07	1,6475	1,5181	0,017	0,048	0,109	0,225	0,430
			-181,41	1,6612	1,5243	-0,032	0,015	0,101	0,251	0,502
- 35,0	-0,099	-	0,063	-0,002	-0,388	-0,249	-0,016	-0,840	-0,552	-0,054
- 38,0	-0,089	-	0,059	-0,002	-0,346	-0,235	-0,017	-0,738	-0,520	-0,057
- 41,0	-0,079	-	0,056	-0,002	-0,304	-0,222	-0,018	-0,633	-0,488	-0,059
- 44,0	-0,069	-	0,053	-0,002	-0,261	-0,208	-0,018	-0,523	-0,454	-0,061
- 47,0	-0,059	-	0,049	-0,002	-0,217	-0,194	-0,019	-0,410	-0,420	-0,062
5,08	95,45									
			51,34	1,6421	1,5155	0,115	0,151	0,221	0,348	0,570
			25,58	1,6475	1,5181	0,026	0,067	0,145	0,285	0,523
			-208,74	1,6612	1,5243	-0,025	0,034	0,137	0,312	0,598
- 35,0	-0,112	-	0,067	-0,002	-0,440	-0,266	-0,017	-0,955	-0,591	-0,057
- 38,0	-0,103	-	0,064	-0,002	-0,401	-0,253	-0,018	-0,860	-0,561	-0,060
- 41,0	-0,094	-	0,061	-0,002	-0,362	-0,241	-0,018	-0,761	-0,530	-0,062
- 44,0	-0,084	-	0,058	-0,002	-0,322	-0,228	-0,019	-0,658	-0,499	-0,064
- 47,0	-0,075	-	0,055	-0,002	-0,280	-0,215	-0,020	-0,550	-0,466	-0,066

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = 0, 0005$$

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'									
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12					
4,75	95,82	55,41	C	1,5139	0,006	-0,010	-0,025	0,048	0,032					
		27,44	D	1,5163	-0,018	-0,033	-0,041	-0,024	0,043					
		-163,37	F	1,5220	0,070	0,071	0,085	0,134	0,243					
β = 2°														
β = 4°														
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	β = 6°					
									x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'
-50,0	-0,058	-	-0,002	-0,214	-0,192	-0,019	-0,407	-0,417	-0,065					
-60,0	-0,030	-	-0,002	-0,087	-0,152	-0,020	-0,060	-0,317	-0,067					
-70,0	-0,002	-	-0,003	0,045	-0,113	-0,021	0,337	-0,209	-0,066					
-80,0	0,025	-	-0,002	0,188	-0,071	-0,019	0,807	-0,089	-0,061					
-100,0	0,080	-	-0,006	0,514	0,018	-0,015	2,105	0,206	-0,030					
4,82	95,62	53,34	C	1,5139	0,023	0,006	0,018	0,048	0,134					
		26,90	D	1,5163	-0,008	-0,011	0,000	0,042	0,144					
		-185,13	F	1,5220	0,080	0,093	0,128	0,204	0,349					
-50,0	-0,074	-	-0,002	-0,277	-0,213	-0,020	-0,546	-0,464	-0,069					
		-	-0,002	-0,156	-0,176	-0,022	-0,212	-0,368	-0,073					
		-	-0,037	-0,028	-0,137	-0,023	0,180	-0,262	-0,073					
		-	0,029	0,112	-0,097	-0,023	0,652	-0,143	-0,069					
		-	0,010	0,444	-0,006	-0,019	1,982	0,157	-0,042					
4,89	95,43	51,42	C	1,5139	0,032	0,033	0,050	0,102	0,217					
		26,38	D	1,5163	0,000	0,007	0,033	0,096	0,227					
		-213,71	F	1,5220	0,086	0,110	0,161	0,258	0,435					
-50,0	-0,091	-	-0,003	-0,345	-0,236	-0,022	-0,096	-0,514	-0,073					
		-	-0,003	-0,232	-0,201	-0,024	-0,378	-0,424	-0,079					



- 70,0	-0,042	-	0,044	-0,003	-0,111	-0,165	-0,025	0,002	-0,322	-0,081
- 80,0	-0,014	-	0,034	-0,002	0,026	-0,125	-0,025	0,471	-0,205	-0,077
-100,0	0,037	-	0,019	-0,003	0,354	-0,037	-0,023	1,817	0,095	-0,056
4,96	95,23									
			49,64	1,6421	1,5139	0,038	0,046	0,074	0,143	0,282
			25,88	1,6475	1,5163	0,005	0,020	0,058	0,138	0,292
			-252,91	1,6612	1,5220	0,090	0,123	0,186	0,301	0,503
- 50,0	-0,109	-	0,066	-0,003	-0,417	-0,260	-0,023	-0,856	-0,568	-0,078
- 60,0	-0,088	-	0,059	-0,003	-0,314	-0,228	-0,026	-0,559	-0,484	-0,086
- 70,0	-0,065	-	0,052	-0,004	-0,206	-0,194	-0,027	-0,196	-0,389	-0,089
- 80,0	-0,041	-	0,044	-0,003	-0,072	-0,158	-0,029	0,260	0,278	-0,090
-100,0	0,009	-	0,028	-0,004	0,246	-0,074	-0,028	1,610	0,019	-0,071
5,03	95,03									
			47,97	1,6421	1,5139	0,042	0,056	0,092	0,171	0,328
			25,40	1,6475	1,5163	0,009	0,028	0,075	0,168	0,341
			-310,02	1,6612	1,5220	0,093	0,130	0,202	0,331	0,552
- 50,0	-0,129	-	0,072	-0,003	-0,494	-0,285	-0,025	-1,026	-0,624	-0,082
- 60,0	-0,110	-	0,066	-0,003	-0,403	-0,258	-0,028	-0,756	-0,550	-0,093
- 70,0	-0,090	-	0,060	-0,004	-0,301	-0,228	-0,030	-0,415	-0,464	-0,100
- 80,0	-0,070	-	0,053	-0,004	-0,183	-0,195	-0,032	0,024	-0,358	-0,101
-100,0	-0,031	-	0,046	-0,004	0,120	-0,116	-0,032	1,361	-0,071	-0,087
5,10	94,83									
			46,41	1,6421	1,5139	0,044	0,060	0,101	0,189	0,357
			24,94	1,6475	1,5163	0,010	0,033	0,085	0,185	0,371
			-400,94	1,6612	1,5220	0,092	0,133	0,211	0,348	0,586
- 50,0	-0,149	-	0,079	-0,003	-0,575	-0,312	-0,026	-1,207	-0,685	-0,088
- 60,0	-0,134	-	0,074	-0,004	-0,499	-0,290	-0,030	-0,966	-0,621	-0,099
- 70,0	-0,118	-	0,069	-0,004	-0,409	-0,264	-0,032	-0,654	-0,544	-0,110
- 80,0	-0,101	-	0,064	-0,005	-0,305	-0,236	-0,036	-0,237	-0,448	-0,112
-100,0	-0,062	-	0,052	-0,005	-0,024	-0,165	-0,038	1,072	-0,174	-0,105

$f' = 100, 0$ ;  $v_2 = 33, 9$ ;  $v_3 = 64, 1$ ;  $d_1 = 2, 0$ ;  $d_2 = 6, 0$ ;  $c = 0, 0000$ ; кома для  $\beta = 6^\circ$  и  $s = -70$ .

Q	s <sub>0</sub> '	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'							
					h = 4°				β = 6°			
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12			
4, 70	95, 68	54, 17 27, 54 -180, 18	C	1, 5139	0, 021	-0, 007	-0, 034	-0, 046	-0, 020			
			D	1, 5163	-0, 023	-0, 047	-0, 066	-0, 067	-0, 027			
			F	1, 5220	0, 028	0, 020	0, 021	0, 050	0, 129			
β = 2°					β = 4°							
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'			
- 50, 0	-0, 082	- 0, 057	-0, 003	-0, 311	-0, 224	-0, 021	-0, 631	-0, 490	-0, 070			
- 60, 0	-0, 059	- 0, 049	-0, 003	-0, 207	-0, 192	-0, 023	-0, 343	-0, 407	-0, 076			
- 70, 0	-0, 037	- 0, 042	-0, 003	-0, 100	-0, 159	-0, 024	-0, 014	-0, 318	-0, 078			
- 80, 0	-0, 017	- 0, 036	-0, 004	0, 014	-0, 127	-0, 025	0, 376	-0, 222	-0, 078			
-100, 0	0, 026	- 0, 022	-0, 003	0, 279	-0, 056	-0, 022	1, 468	0, 022	-0, 057			
4, 77	95, 48	52, 19 27, 00 -207, 10	C	1, 5139	0, 030	0, 011	-0, 001	0, 008	0, 063			
			D	1, 5163	-0, 015	-0, 028	-0, 033	0, 013	0, 056			
			F	1, 5220	0, 032	0, 035	0, 052	0, 104	0, 213			
- 50, 0	-0, 099	- 0, 062	-0, 003	-0, 378	-0, 246	-0, 022	-0, 780	-0, 539	h = ±10			
- 60, 0	-0, 078	- 0, 056	-0, 003	-0, 282	-0, 217	-0, 024	-0, 508	-0, 462	0, 097			
- 70, 0	-0, 058	- 0, 049	-0, 003	-0, 181	-0, 186	-0, 026	-0, 190	-0, 378	h = ±6			
- 80, 0	-0, 047	- 0, 052	-0, 003	-0, 071	-0, 155	-0, 028	0, 199	-0, 281	0, 084			
-100, 0	0, 003	- 0, 030	-0, 004	0, 191	-0, 086	-0, 026	1, 301	-0, 040	0, 103			
4, 84	95, 28	50, 35 26, 47 -243, 67	C	1, 5139	0, 036	0, 025	0, 024	0, 051	0, 128			
			D	1, 5163	-0, 010	-0, 015	-0, 007	0, 029	0, 122			
			F	1, 5220	0, 039	0, 049	0, 080	0, 148	0, 284			
- 50, 0	-0, 117	- 0, 068	-0, 003	-0, 449	-0, 270	-0, 024	-0, 939	-0, 592	h = ±10			
- 60, 0	-0, 099	- 0, 063	-0, 003	-0, 364	-0, 244	-0, 026	-0, 738	-0, 574	0, 079			

-70,0	-0,081	-0,057	-0,004	-0,272	-0,217	-0,029	-0,414	-0,470	-0,094	$h=\pm 6$ -0,123
-80,0	-0,062	-0,050	-0,004	-0,168	-0,188	-0,030	-0,011	-0,354	-0,096	
-100,0	-0,025	-0,039	-0,004	0,084	-0,122	-0,031	1,087	-0,121	-0,085	
4,91	95,08	48,64 25,97 -296,19	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,041 -0,006 0,042	0,035 -0,005 0,058	0,042 0,011 0,097	0,083 0,060 0,179	0,176 0,170 0,334	
-50,0	-0,136	-	-0,003	-0,526	-0,295	-0,025	-1,108	-0,649	-0,084	$h=\pm 10$ 0,061
-60,0	-0,121	-	-0,004	-0,452	-0,273	-0,028	-0,882	-0,588	-0,095	
-70,0	-0,106	-	-0,004	-0,370	-0,250	-0,031	-0,604	-0,518	-0,105	
-80,0	-0,090	-	-0,004	-0,277	-0,224	-0,034	-0,245	-0,433	-0,107	$h=\pm 6$ -0,143
-100,0	-0,057	-	-0,005	-0,040	-0,165	-0,036	-0,842	-0,205	-0,102	
4,98	94,88	47,04 25,48 -378,00	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,040 -0,004 0,042	0,038 0,000 0,062	0,049 0,020 0,107	0,095 0,078 0,198	0,202 0,201 0,366	
-50,0	-0,156	-	-0,003	-0,606	-0,322	-0,026	-1,287	-0,709	-0,089	$h=\pm 10$ 0,043
-60,0	-0,145	-	-0,004	-0,546	-0,305	-0,031	-1,091	-0,658	-0,102	
-70,0	-0,133	-	-0,004	-0,478	-0,286	-0,034	-0,851	-0,609	-0,107	
-80,0	-0,121	-	-0,005	-0,397	-0,265	-0,037	-0,505	-0,522	-0,120	$h=\pm 6$ -0,163
-100,0	-0,094	-	-0,005	-0,184	-0,214	-0,041	0,552	-0,308	-0,121	
5,05	94,69	45,54 25,02 -523,07	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,044 -0,004 0,040	0,042 -0,016 0,061	0,055 0,022 0,108	0,103 0,084 0,203	0,218 0,214 0,381	
-50,0	-0,178	-	-0,004	-0,692	-0,351	-0,028	-1,476	-0,772	-0,094	$h=\pm 10$ 0,028
-60,0	-0,170	-	-0,004	-0,648	-0,339	-0,033	-1,314	-0,733	-0,109	
-70,0	-0,161	-	-0,003	-0,593	-0,323	-0,034	-1,094	-0,684	-0,121	
-80,0	-0,154	-	-0,005	-0,529	-0,309	-0,041	-0,790	-0,620	-0,132	$h=\pm 6$ -0,183
-100,0	-0,136	-	-0,006	-0,299	-0,245	-0,047	-0,221	-0,425	-0,139	

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0005$$

Q	s' 0	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$					
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12	
4, 63	95, 59	53, 55 27, 80 -192, 90	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 026 -0, 032 -0, 018	-0, 014 -0, 066 -0, 039	-0, 056 -0, 104 -0, 056	-0, 101 -0, 131 -0, 056	-0, 103 -0, 126 -0, 015	
					$\beta = 4^\circ$					
					$\beta = 6^\circ$					
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	
- 50, 0	-0, 101	- 0, 063	-0, 003	-0, 389	-0, 249	-0, 022	-0, 814	-0, 548	-0, 075	
- 60, 0	-0, 083	- 0, 057	-0, 003	-0, 307	-0, 224	-0, 025	-0, 581	-0, 482	-0, 082	
- 70, 0	-0, 067	- 0, 052	-0, 003	-0, 223	-0, 199	-0, 026	-0, 315	-0, 412	-0, 087	
- 80, 0	-0, 052	- 0, 048	-0, 004	-0, 136	-0, 175	-0, 030	0, 017	-0, 320	-0, 088	
-100, 0	-0, 022	- 0, 038	-0, 004	-0, 065	-0, 123	-0, 028	0, 881	-0, 146	-0, 080	
4, 70	95, 39	51, 61 27, 25 -224, 18	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 032 -0, 026 -0, 013	0, 002 -0, 051 -0, 025	-0, 024 -0, 075 -0, 028	-0, 048 -0, 084 -0, 008	-0, 032 -0, 054 0, 058	
- 50, 0	-0, 119	- 0, 069	-0, 003	-0, 459	-0, 272	-0, 024	-0, 969	-0, 600	-0, 079	
- 60, 0	-0, 103	- 0, 064	-0, 003	-0, 386	-0, 250	-0, 026	-0, 755	-0, 540	-0, 088	
- 70, 0	-0, 089	- 0, 059	-0, 004	-0, 309	-0, 228	-0, 029	-0, 504	-0, 476	-0, 095	
- 80, 0	-0, 075	- 0, 055	-0, 004	-0, 228	-0, 205	-0, 031	-0, 199	-0, 403	-0, 099	
-100, 0	-0, 048	- 0, 047	-0, 004	-0, 035	-0, 157	-0, 033	-0, 684	-0, 217	-0, 094	
4, 77	95, 19	49, 81 26, 71 -267, 76	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 039 -0, 020 -0, 001	-0, 004 -0, 040 -0, 014	-0, 008 -0, 055 -0, 007	-0, 013 -0, 050 0, 027	0, 021 0, 000 0, 115	
- 50, 0	-0, 137	- 0, 075	-0, 003	-0, 533	-0, 297	-0, 025	-1, 134	-0, 655	-0, 084	
- 60, 0	-0, 125	- 0, 071	-0, 004	-0, 471	-0, 279	-0, 028	-0, 943	-0, 604	-0, 095	

-70,0	-0,113	-	0,067	-0,004	-0,405	-0,261	-0,032	-0,713	-0,546	-0,104
-80,0	-0,100	-	0,063	-0,004	-0,332	-0,240	-0,034	-0,424	-0,480	-0,110
-100,0	-0,079	-	0,057	-0,005	-0,153	-0,197	-0,038	0,445	-0,302	-0,111
4,84	94,99	48,14 26,20 -332,71	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,041 -0,019 -0,008	0,021 -0,033 -0,009	0,007 -0,042 0,004	0,009 -0,027 0,049	0,056 0,036 0,152
-50,0	-0,157	-	0,082	-0,003	-0,612	-0,324	-0,026	-1,309	-0,714	-0,089
-60,0	-0,148	-	0,079	-0,004	-0,563	-0,309	-0,030	-1,147	-0,672	-0,102
-70,0	-0,139	-	0,076	-0,004	-0,510	-0,295	-0,034	-0,943	-0,624	-0,114
-80,0	-0,131	-	0,074	-0,005	-0,448	-0,279	-0,037	-0,675	-0,566	-0,122
-100,0	-0,114	-	0,069	-0,006	-0,289	-0,243	-0,043	0,166	-0,401	-0,128
4,91	94,80	46,57 25,71 -439,77	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,041 -0,017 -0,009	-0,015 -0,031 -0,008	0,010 -0,037 0,009	0,016 -0,018 0,060	0,072 0,054 0,173
-50,0	-0,178	-	0,089	-0,003	-0,695	-0,351	-0,028	-1,493	-0,776	-0,094
-60,0	-0,173	-	0,087	-0,004	-0,662	-0,342	-0,033	-1,364	-0,745	-0,109
-70,0	-0,168	-	0,086	-0,005	-0,623	-0,333	-0,037	-1,191	-0,708	-0,124
-80,0	-0,163	-	0,084	-0,005	-0,575	-0,322	-0,041	-0,951	-0,660	-0,135
-100,0	-0,154	-	0,082	-0,006	-0,399	-0,273	-0,049	-0,154	-0,513	-0,147
4,98	94,60	45,10 25,23 -650,09	C D F	1,6421 1,6475 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,043 -0,018 -0,012	0,023 -0,033 -0,012	0,008 -0,039 0,005	0,017 -0,019 0,057	0,075 0,055 0,175
-50,0	-0,201	-	0,096	-0,004	-0,783	-0,381	-0,029	-1,688	-0,841	-0,099
-60,0	-0,199	-	0,096	-0,004	-0,766	-0,377	-0,035	-1,596	-0,823	-0,117
-70,0	-0,199	-	0,096	-0,005	-0,744	-0,374	-0,040	-1,457	-0,798	-0,132
-80,0	-0,198	-	0,096	-0,006	-0,714	-0,369	-0,046	-1,253	-0,763	-0,148
-100,0	-0,198	-	0,097	-0,007	-0,614	-0,353	-0,055	-0,513	-0,639	-0,168

$$f' = 100, 0; \quad v_2 = 33, 9; \quad v_3 = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0010$$

Q	s'°	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\Delta s'$				
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12
4, 57	95, 47	52, 66 27, 98 -212, 15	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5520	0, 032 -0, 040 -0, 063	-0, 017 -0, 085 -0, 095	-0, 076 -0, 138 -0, 139	-0, 135 -0, 186 -0, 156	-0, 173 -0, 214 -0, 148
$\beta = 2^\circ$									
$\beta = 4^\circ$									
s	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	$\Delta y'$
- 50, 0	-0, 123	-0, 070	-0, 003	-0, 477	-0, 278	-0, 024	-1, 016	-0, 613	-0, 080
- 60, 0	-0, 100	-0, 066	-0, 003	-0, 417	-0, 260	-0, 027	-0, 839	-0, 564	-0, 090
- 70, 0	-0, 099	-0, 063	-0, 004	-0, 357	-0, 243	-0, 030	-0, 639	-0, 514	-0, 097
- 80, 0	-0, 091	-0, 061	-0, 005	-0, 298	-0, 228	-0, 036	-0, 399	-0, 459	-0, 104
-100, 0	-0, 074	-0, 055	-0, 005	-0, 160	-0, 195	-0, 035	-0, 283	-0, 322	-0, 105
4, 65	95, 24	50, 53 27, 34 -257, 41	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 038 -0, 034 -0, 059	-0, 004 -0, 071 -0, 083	-0, 051 -0, 112 -0, 106	-0, 093 -0, 145 -0, 112	-0, 110 -0, 150 -0, 082
- 50, 0	-0, 144	-0, 077	-0, 003	-0, 560	-0, 306	-0, 025	-1, 203	-0, 676	-0, 085
- 60, 0	-0, 135	-0, 075	-0, 004	-0, 513	-0, 292	-0, 029	-1, 052	-0, 636	-0, 097
- 70, 0	-0, 126	-0, 072	-0, 004	-0, 465	-0, 279	-0, 033	-0, 874	-0, 593	-0, 107
- 80, 0	-0, 119	-0, 069	-0, 004	-0, 413	-0, 265	-0, 034	-0, 652	-0, 545	-0, 116
-100, 0	-0, 108	-0, 066	-0, 005	-0, 292	-0, 239	-0, 040	-0, 014	-0, 417	-0, 123
4, 73	95, 02	48, 57 26, 73 -327, 64	C 1, 6421 D 1, 6475 F 1, 6612	1, 5139 1, 5163 1, 5220	0, 042 -0, 031 -0, 057	0, 006 -0, 063 -0, 077	-0, 036 -0, 098 -0, 091	-0, 068 -0, 119 -0, 085	-0, 070 -0, 109 -0, 039
- 50, 0	-0, 166	-0, 085	-0, 003	-0, 650	-0, 336	-0, 027	-1, 402	-0, 742	-0, 091
- 60, 0	-0, 161	-0, 083	-0, 004	-0, 618	-0, 327	-0, 031	-1, 284	-0, 714	-0, 105

- 70,0	-0,156	-0,082	-0,004	-0,583	-0,318	-0,035	-1,137	-0,684	-0,119
- 80,0	-0,153	-0,081	-0,005	-0,545	-0,310	-0,040	-0,939	-0,643	-0,129
-100,0	-0,148	-0,080	-0,006	-0,446	-0,292	-0,046	-0,308	-0,530	-0,143
4,81	94,79	46,75 26,15 -451,37	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,044 -0,020 -0,058	0,008 -0,061 -0,076	-0,031 -0,092 -0,087	-0,058 -0,110 -0,076	-0,052 -0,091 -0,019
- 50,0	-0,190	-0,093	-0,004	-0,746	-0,368	-0,029	-1,614	-0,814	-0,096
- 60,0	-0,189	-0,092	-0,004	-0,730	-0,364	-0,034	-1,534	-0,798	-0,114
- 70,0	-0,190	-0,093	-0,005	-0,714	-0,362	-0,040	-1,413	-0,771	-0,118
- 80,0	-0,190	-0,093	-0,006	-0,692	-0,359	-0,044	-1,258	-0,751	-0,144
-100,0	-0,194	-0,095	-0,007	-0,625	-0,352	-0,053	-0,682	-0,661	-0,165
4,89	94,56	45,07 25,59 -727,39	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,043 -0,031 -0,063	0,005 -0,065 -0,081	-0,036 -0,098 -0,093	-0,065 -0,116 -0,082	-0,058 -0,096 -0,023
- 50,0	-0,216	-0,102	-0,004	-0,848	-0,401	-0,030	-1,840	-0,889	-0,102
- 60,0	-0,220	-0,103	-0,005	-0,852	-0,405	-0,036	-1,802	-0,889	-0,122
- 70,0	-0,225	-0,104	-0,005	-0,855	-0,409	-0,043	-1,731	-0,883	-0,140
- 80,0	-0,231	-0,107	-0,006	-0,854	-0,414	-0,048	-1,611	-0,872	-0,159
-100,0	-0,246	-0,112	-0,008	-0,826	-0,420	-0,060	-1,108	-0,810	-0,189
4,97	94,34	43,50 25,05 -1886,54	C 1,6421 D 1,6475 F 1,6612	1,5139 1,5163 1,5220	0,040 -0,036 -0,069	-0,003 -0,073 -0,092	-0,051 -0,113 -0,110	-0,087 -0,138 -0,104	-0,086 -0,123 -0,050
- 50,0	-0,243	-0,110	-0,004	-0,955	-0,437	-0,032	-2,077	-0,969	-0,108
- 60,0	-0,253	-0,114	-0,005	-0,982	-0,448	-0,039	-2,088	-0,986	-0,131
- 70,0	-0,264	-0,118	-0,006	-1,008	-0,460	-0,046	-2,068	-0,998	-0,154
- 80,0	-0,276	-0,122	-0,007	-1,030	-0,473	-0,053	-1,995	-1,004	-0,176
-100,0	-0,304	-0,132	-0,009	-1,052	-0,497	-0,068	-1,582	-0,976	-0,216

$$f' = 100, 0; \quad v_s = 33, 9; \quad v_s = 64, 1; \quad d_1 = 2, 0; \quad d_2 = 6, 0; \quad c = -0, 0015$$

Q	s'	r	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	Δs'				
					h = 4	h = 6	h = 8	h = 10	h = 12
4, 55	95, 24	50, 75 27, 84 -261, 29	C	1, 5139	0, 040	-0, 015	-0, 087	-0, 160	-0, 220
			D	1, 5163	-0, 045	-0, 098	-0, 161	-0, 226	-0, 276
			F	1, 5220	-0, 107	-0, 148	-0, 194	-0, 236	-0, 253
β = 2°									
S	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'	x <sub>t</sub>	x <sub>s</sub>	Δy'
- 50, 0	-0, 155	- 0, 081	-0, 003	-0, 607	-0, 320	-0, 026	-1, 314	-0, 711	-0, 087
- 60, 0	-0, 150	- 0, 079	-0, 004	-0, 576	-0, 312	-0, 030	-1, 207	-0, 684	-0, 101
- 70, 0	-0, 146	- 0, 078	-0, 004	-0, 548	-0, 305	-0, 034	-1, 084	-0, 658	-0, 113
- 80, 0	-0, 144	- 0, 077	-0, 004	-0, 520	-0, 300	-0, 038	-0, 930	-0, 628	-0, 124
-100, 0	-0, 144	- 0, 078	-0, 006	-0, 456	-0, 290	-0, 045	-0, 453	-0, 550	-0, 139
4, 64	94, 98	48, 54	C	1, 5139	0, 045	-0, 008	-0, 072	-0, 136	-0, 182
		27, 13	D	1, 5163	-0, 042	-0, 090	-0, 154	-0, 202	-0, 237
		-346, 03	F	1, 5220	-0, 106	-0, 141	-0, 181	-0, 210	-0, 212
- 50, 0	-0, 181	0, 090	-0, 003	-0, 710	-0, 355	-0, 028	-1, 542	-0, 787	-0, 094
			-0, 004	-0, 696	-0, 352	-0, 033	-1, 472	-0, 773	-0, 110
			-0, 005	-0, 684	-0, 351	-0, 038	-1, 383	-0, 758	-0, 125
			-0, 005	-0, 672	-0, 350	-0, 042	-1, 260	-0, 741	-0, 139
- 80, 0	-0, 182	- 0, 090	-0, 005	-0, 636	-0, 351	-0, 051	-0, 832	-0, 682	-0, 162
-100, 0	-0, 191	- 0, 094	-0, 007						
4, 73	94, 73	46, 50	C	1, 5139	0, 046	-0, 007	-0, 07C	-0, 132	-0, 172
		26, 45	D	1, 5163	-0, 042	-0, 090	-0, 146	-0, 198	-0, 227
		-513, 44	F	1, 5220	-0, 109	-0, 143	-0, 180	-0, 206	-0, 200
- 50, 0	-0, 209	- 0, 099	-0, 004	-0, 819	-0, 392	-0, 030	-1, 784	-0, 869	-0, 100



-70,0	-0,219	-	0,103	-0,006	-0,836	-0,402	-0,043	-1,716	-0,872	-0,141
-80,0	-0,226	-	0,105	-0,006	-0,843	-0,408	-0,047	-1,633	-0,868	-0,156
-100,0	-0,244	-	0,112	-0,008	-0,846	-0,422	-0,059	-1,276	-0,837	-0,188
4,82	94,48									
			44,64	1,6421	1,5139	0,043	-0,013	-0,081	-0,147	-0,190
			25,81	1,6475	1,5163	-0,045	-0,096	-0,157	-0,213	-0,245
			-999,75	1,6612	1,5220	-0,114	-0,152	-0,192	-0,222	-0,218
-50,0	-0,238	-	0,108	-0,004	-0,936	-0,431	-0,032	-2,044	-0,956	-0,107
-60,0	-0,248	-	0,112	-0,005	-0,967	-0,443	-0,038	-2,071	-0,976	-0,130
-70,0	-0,260	-	0,116	-0,005	-0,999	-0,455	-0,044	-2,078	-0,994	-0,152
-80,0	-0,274	-	0,121	-0,006	-1,032	-0,471	-0,052	-2,047	-1,009	-0,174
-100,0	-0,306	-	0,133	-0,008	-1,085	-0,503	-0,067	-1,784	-1,014	-0,217
4,91	94,22									
			42,91	1,6421	1,5139	0,036	-0,028	-0,106	-0,184	-0,244
			25,20	1,6475	1,5163	-0,050	-0,110	-0,181	-0,249	-0,398
			-2094,29	1,6612	1,5220	-0,126	-0,170	-0,220	-0,261	-0,267
-50,0	-0,269	-	0,119	-0,004	-1,061	-0,472	-0,034	-2,319	-1,049	-0,114
-60,0	-0,287	-	0,125	-0,005	-1,118	-0,493	-0,042	-2,405	-1,089	-0,140
-70,0	-0,306	-	0,131	-0,006	-1,179	-0,517	-0,050	-2,471	-1,129	-0,167
-80,0	-0,327	-	0,138	-0,007	-1,240	-0,541	-0,058	-2,500	-1,165	-0,194
-100,0	-0,385	-	0,166	-0,010	-1,348	-0,590	-0,077	-2,353	-1,212	-0,248
5,00	93,96									
			41,32	1,6421	1,5139	0,029	-0,046	-0,140	-0,238	-0,316
			24,61	1,6475	1,5163	-0,061	-0,131	-0,218	-0,305	-0,370
			-10990,0	1,6612	1,5220	-0,136	-0,192	-0,257	-0,314	-0,341
-50,0	-0,303	-	0,130	-0,004	-1,192	-0,516	-0,036	-2,610	-1,147	-0,122
-60,0	-0,327	-	0,138	-0,006	-1,280	-0,547	-0,044	-2,761	-1,211	-0,152
-70,0	-0,359	-	0,152	-0,007	-1,372	-0,582	-0,054	-2,894	-1,274	-0,182
-80,0	-0,384	-	0,158	-0,008	-1,466	-0,618	-0,064	-2,948	-1,335	-0,215
-100,0	-0,449	-	0,180	-0,011	-1,645	-0,692	-0,086	-2,984	-1,434	-0,281

# Глава XVIII НАБОР ОКУЛЯРОВ

## § 64. Окуляр Кельнера (рис. 168)

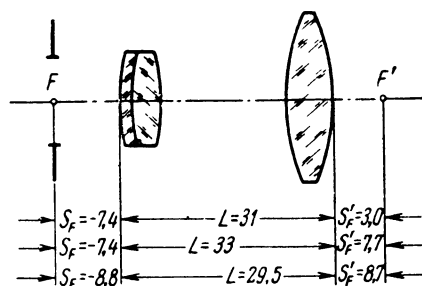


Рис. 168

1.  $f' = 24,99$ ;  $s_F = 7,43$ ;  $s_{F'} = 9,02$

$r$	$d$	$n$	$v$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
95,53							
13,54	1,5	1,6199	36,3	Ф - 13	14,0	2,5	-0,39
-18,05	5,5	1,5399	59,7	БК - 6		2,0	-0,25
31,09	18,0	1	—	—		1,5	-0,15
-66,18	6,0	1,5163	64,1	К - 8	24,5	1,0	-0,10

Сводка остаточных аберраций; точка вне оси;  $m_1 = 0$

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$
-23°24'00"	-10,70	4°00'	155,0	2,08	-0,99	10,32	-0,497
-16 29 00	-12,11	2 48	155,0	0,48	-0,56	7,22	-0,175
-24 34 38	- 7,24	1 15	500,0	1,53	-1,11	10,75	-0,68
-17 23 01	- 8,92	53	500,0	0,62	-0,56	7,59	-0,228
25 26 20	- 4,40	1 15	-500,0	0,70	-0,44	-11,07	0,813
17 56 54	- 6,27	53	-500,0	0,49	-0,64	- 7,82	0,270

$$2. f' = 25,01; \quad s_F = 7,43; \quad s'_F = 7,73$$

$r$	$d$	$n$	$\nu$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
95,53	1,5	1,6199	36,3	Ф-13	14,0	2,5	-0,36
13,54	7,5	1,5399	59,7	БК-6		2,0	-0,22
-18,05	18,0	1	—	—	24,5	1,5	-0,14
31,09	6,0	1,5163	64,1	К-8		1,0	-0,06
-66,18							

Сводка остаточных аберраций; точка вне оси;  $m_1 = 0$

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$
-23°31'00"	-9,36	4°00'	155,0	1,33	-1,14	10,32	-0,559
-16 30 10	-10,80	2 48	155,0	0,26	-0,66	7,22	-0,192
-24 37 29	-5,97	1 15	500,0	1,07	-1,22	10,75	-0,70
-17 23 38	-7,67	53	500,0	0,44	-0,61	7,59	-0,239
25 27 00	-3,163	-1 15	-500,0	0,38	-1,52	-11,07	0,828
17 57 01	-4,998	-53	-500,0	0,35	-0,68	-7,82	0,277

$$3. f' = 24,83; \quad s_F = 8,76; \quad s'_F = 8,66$$

$r$	$d$	$n$	$\nu$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
95,53	1,5	1,6199	36,3	Ф-13	14,0	2,5	-0,41
13,54	5,5	1,5399	59,7	БК-6		2,0	-0,25
-18,05	16,6	1	—	—	24,5	1,5	-0,14
61,18	6,0	1,5163	64,1	К-8		1,0	-0,06
-31,09							

Сводка остаточных аберраций; точка вне оси;  $m_1 = 0$

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$
-23°50'	-11,70	4°00'	155,0	0,15	-1,63	10,22	-0,826
-16 41	-12,06	2 48	155,0	-0,51	-0,87	7,15	-0,289
-25°00'58"	-8,64	1 15	500,0	-0,23	-1,73	10,72	-0,96
-17 39 4	-9,08	53	500,0	-0,33	-0,87	7,57	-0,328
-26 7 28	-5,67	-1 15	-500,0	-0,67	-1,87	-11,10	+1,077
-18 16 12	-6,61	-53	-500,0	-0,34	-0,91	-7,84	+0,354

# § 65. Окуляр Эрфле (рис. 169)

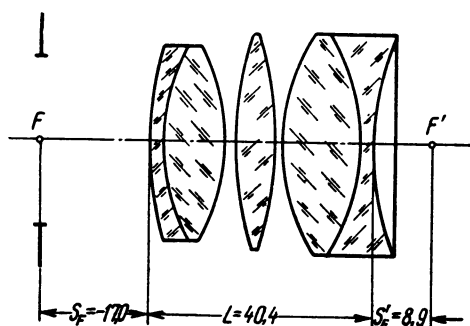


Рис. 169

$$f' = 25,0; \quad s_F = -17,0; \quad s'_F = 8,9$$

$r$	$d$	$n$	$v$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
170,23	1,8	1,6199	36,3	Ф-13	32,5	2,5	-0,16
34,42	13,8	1,5163	64,1	К-8		2,0	-0,10
— 29,41	0,25	1				1,5	-0,06
70,78	7,6	1,5163	64,1	К-8	36,5		
— 70,78	0,25	1					-0,03
31,89	15,0	1,5163	64,1	К-8	36,5		
— 31,89	1,7	1,6199	36,3	Ф-13			
56,01							

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$	$\Delta \theta_0$	$y'_{F-y'_C}$
—33°17'	—21,50	8°42'	108,94	6,97	—1,35	15,30	—1,115	— 6,79	—0,061
—29 49	—21,23	7 35	108,94	2,35	—1,18	13,32	—1,007	— 7,02	—0,089
—19 54	—22,11	4 58	108,94	0,18	—0,61	8,70	—0,351	— 3,88	—0,086
—37 05	—14,20	1 55	500,00	9,08	—0,66	16,43	2,46	—13,03	—0,082
—32 38	—14,99	1 40	500,00	4,67	—0,67	14,29	1,72	—10,74	—0,093
—21 20	—16,83	1 5	500,00	1,12	—0,38	9,29	0,48	— 4,93	—0,083

# § 66. Симметричные окуляры (рис. 170)

1

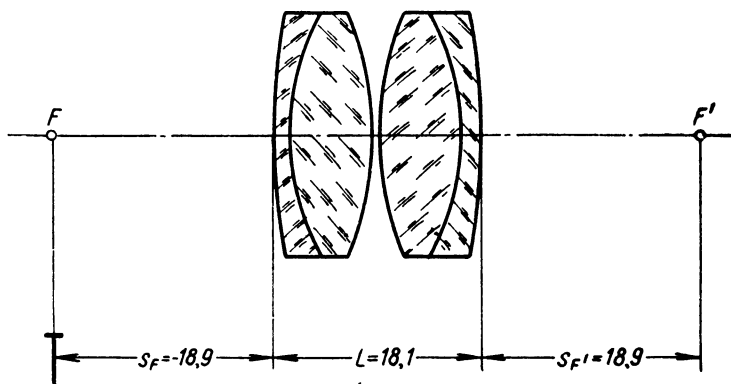


Рис. 170

I тип

$$f' = 25,0; \quad s' = -s = 18,9$$

$r_1$	$d$	$n$	$\nu$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
68,66	1,5	1,6164	36,6	Ф-2	22,0	2,5	-0,14
21,01	7,5	1,5163	64,1	К-8		2,0	-0,09
-30,58	0,1	1				1,5	-0,05
30,58	7,5	1,5163	64,1	К-8	22,0	1,0	-0,01
-21,01	1,5	1,6164	36,6	Ф-2			
-68,66							

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$	$\Delta^0/0$	$y_{F'} - y'_C$
-19°19'	-24,20	5°24'	107,8	1,89	-0,39	8,414	-0,349	-3,98	-0,016
-13 43	-24,96	3 50	107,8	0,40	-0,27	5,957	-0,144	-2,36	-0,028
-22 55	-17,82	1 10	500,0	1,85	-0,60	9,80	-0,76	-7,22	
-16 14	-18,96	50	500,0	0,54	-0,38	7,00	-0,274	-3,77	
-24 59	-15,05	-1 10	-500,0	1,69	-0,74	-10,57	1,07	9,21	
-17 35	-16,36	-50	-500,0	0,57	-0,42	-7,55	0,367	4,64	

И т и п  
 $f' = 25,0$        $s' = -s = 18,9$

$r_1$	$d$	$n$	$v$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
75,01	1,5	1,6164	36,6	Ф-2	22	2,5	-0,15
23,03	7,5	1,5163	64,1	К-8		2,0	-0,10
-30,14	0,1	1				1,5	-0,05
30,14	7,5	1,5163	64,1	К-8	22,0	1,0	-0,01
-23,03	1,5	1,6164	36,6	Ф-2			
-75,01							

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$	$\Delta^0/0$	$y'_F - y'_C$
-19°04'	-24,12	5°24'	105,9	0,83	-0,56	8,226	-0,424	-4,90	-0,055
-13 52	-25,02	3 57	105,9	0,12	-0,35	6,000	-0,173	-2,80	-0,037
-23 04	-17,65	1 10	500,0	1,13	-0,72	9,80	-0,85	-8,00	
-16 16	-18,93	50	500,0	0,33	-0,41	7,00	-0,30	-4,07	
-25 08	-14,92	-1 10	-500,0	1,02	-0,90	-10,56	1,159	9,88	
-17 37	-16,33	50	-500,0	0,34	-0,48	-7,55	0,389	4,90	

III т и п  
 $f' = 25,0$ ;       $s'_F = -s_F = 18,9$

$r_1$	$d$	$n$	$v$	Марка стекла	$\varnothing_{\text{св}}$	$h$	$\Delta s'$
74,65	1,5	1,6164	36,6	Ф-2	22,0	2,5	-0,15
24,59	7,5	1,5163	64,1	К-8		2,0	-0,10
-30,60	0,1	1				1,5	-0,06
30,60	7,5	1,5163	64,1	К-8	22,0	1,0	-0,01
-24,59	1,5	1,6164	36,6	Ф-2			
-74,65							

$\beta_1$	$s_1$	$\beta'$	$s'$	$x_t$	$x_s$	$y'$	$\Delta y'$	$\Delta^0/0$	$y'_F - y'_C$
-19°01'	-23,99	5°24'	104,93	0,18	-0,70	8,138	-0,483	-5,60	-0,049
-13 46	-25,00	3 57	104,93	-0,12	-0,41	5,936	-0,189	-3,09	-0,045
-23 12	-17,52	1 10	500,00	0,58	-0,86	9,80	-0,92	-8,59	
-16 18	-18,86	50	500,00	0,13	-0,46	7,00	-0,32	-4,31	
-25 15	-14,84	-1 10	-500,00	0,53	-1,03	-10,56	1,22	10,36	
-17 39	-16,29	50	-500,00	0,15	-0,53	-7,55	0,41	5,10	

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Бардин и В. А. Смирнов. Конструирование оптических приборов. Л., Изд. КУБУЧ, 1936.
2. Б. Н. Бегунов. Геометрическая оптика. Изд. МГУ. 1961.
3. М. Я. Крюгер и Б. М. Кулижнов. Конструирование оптико-механических приборов. Машгиз. 1948.
4. Оптика в военном деле. Т. I и II под редакцией С. И. Вавилова. М.-Л., Изд. АН СССР, 1945—1948.
5. М. М. Русинов. Оптика приборов для записи колебаний. Оборонгиз. 1939.
6. М. М. Русинов. Техническая оптика. М.-Л., Машгиз. 1961.
7. М. М. Русинов. Фотограмметрическая оптика. М., Геодезиздат, 1962.
8. Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем. Л.-М., ОНТИ НКПТ, 1937.
9. Г. Г. Слюсарев. Геометрическая оптика. Изд. АН СССР, 1946.
10. К. Н. Смирнов. Конструкции и детали астрономгеодезических приборов. М. Изд. ВИА РККА им. Куйбышева, 1937.
11. А. И. Тудоровский. Теория оптических приборов. Т. I и II. М.-Л., Изд. АН СССР, 1952.
12. R. Tiedeken. Lehrbuch für den Optik-Konstrukteur. Band I. VEB Verlag technik. Berlin. 1962.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

#### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

##### Глава I. Основания теории солинейного средства

§ 1. Основные положения. Правила знаков . . . . .	5
§ 2. Линейное увеличение. Главные плоскости. Фокусные расстояния. Формула Ньютона . . . . .	6
§ 3. Формула отрезков от главных точек. Угловое и продольное увеличение	10
§ 4. Сложная система. Телескопическая система . . . . .	14

##### Глава II. Оптика нулевых лучей (оптика Гаусса)

§ 5. Инвариант Аббе. Инвариант Лагранжа — Гельмгольца . . . . .	20
§ 6. Простая линза в воздухе. Система из двух линз . . . . .	23
§ 7. Инварианты вдоль лучей . . . . .	25

##### Глава III. Глаз

§ 8. Устройство глаза. Аккомодация. Разрешающая сила глаза . . . . .	31
--	----

##### Глава IV. Общие сведения из теории оптических приборов

§ 9. Зрачки и люки. Виньетирование . . . . .	34
§ 10. Видимое увеличение . . . . .	42
§ 11. Световой баланс оптической системы . . . . .	44
§ 12. Потери света в оптических системах. Формулы Френеля. Просвет- ление оптики. Закон Ламберта . . . . .	54

##### Глава V. Учение об аберрациях

§ 13. Общие соображения. Принцип Ферма . . . . .	60
§ 14. Переход от волновых аберраций к лучевым . . . . .	63
§ 15. Сферическая аберрация . . . . .	69
§ 16. Кома. Условие синусов Аббе . . . . .	70
§ 17. Астигматизм и кривизна изображения . . . . .	72
§ 18. Дисторсия . . . . .	74
§ 19. Дисперсия стекла. Хроматизм . . . . .	76
§ 20. Дифракция. Дифракционная разрешающая сила . . . . .	82



## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

### ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### Глава VI. Основы габаритного расчета

§ 21. Задача габаритного расчета . . . . .	85
§ 22. Элементарный габаритный расчет на основании теории солиней- ного сродства . . . . .	86
§ 23. Уточненный габаритный расчет . . . . .	95
§ 24. Суммирование аберраций . . . . .	98

#### Глава VII. Габаритный расчет главнейших телескопических систем

§ 25. Труба Кеплера . . . . .	114
§ 26. Труба Галилея . . . . .	116
§ 27. Телескопическая система с одной оборачивающей системой . . . .	119
§ 28. Перископ . . . . .	126
§ 29. Габаритная схема оптики стереокомпаратора с параллельным ходом переменной длины . . . . .	129

#### Глава VIII. Системы переменного увеличения

§ 30. Задачи, преследуемые изменениями увеличений . . . . .	138
§ 31. Системы переменного увеличения со сменными элементами . . . .	139
§ 32. Системы переменного увеличения с передвижными линзами . . . .	149
§ 33. Панкратические системы . . . . .	152

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

### РАСЧЕТ ПРИЗМ

#### Глава IX. Элементы отражательных призм

§ 34. Задачи, решаемые при помощи призм . . . . .	163
§ 35. Работа одного плоского зеркала . . . . .	163
§ 36. Отражение от системы двух зеркал . . . . .	166
§ 37. Отражение от системы трех зеркал . . . . .	169
§ 38. Вращение изображения . . . . .	170

#### Глава X. Плоско-параллельная пластинка

§ 39. Общие свойства плоско-параллельной пластинки . . . . .	172
§ 40. Наклонная плоско-параллельная пластинка . . . . .	176

#### Глава XI. Преломляющие призмы

§ 41. Преломление пучка на наклонной плоскости . . . . .	178
§ 42. Преломляющий клин в воздухе . . . . .	178

#### Глава XII. Основные методы и приемы, применяемые при расчете призм

§ 43. Развертка систем плоских зеркал . . . . .	182
§ 44. Приведение к воздуху . . . . .	184

#### Глава XIII. Конструкции простых призм

§ 45. Некоторые конструктивные приемы . . . . .	185
§ 46. Простейшие призмы . . . . .	187
§ 47. Оборачивающие призмы и оборачивающие системы призм . . . .	194
§ 48. Призмы, развертывающиеся в наклонную плоско-параллельную пла- стинку, и призмы с разделением хода лучей . . . . .	205

#### Глава XIV. Вращающиеся призмы

§ 49. Работа вращающегося зеркала . . . . .	212
§ 50. Работа компенсирующей призмы или вращающегося зеркала в сходящемся пучке лучей . . . . .	221

§ 51. Работа качающейся призмы . . . . .	223
§ 52. Оптические шарниры . . . . .	227

#### Глава XV. Различные конструктивные схемы, решаемые при помощи призм

§ 53. Призмы многократного отражения . . . . .	234
§ 54. Устройства для совмещения изображений . . . . .	235
§ 55. Устройства для изменения глазного базиса . . . . .	242
§ 56. Причины возникновения паразитных изображений . . . . .	243

#### Глава XVI. О допусках на оптические детали и метод «деформирующих» элементов

§ 57. Общие приемы расчета допусков . . . . .	248
§ 58. Деформирующие элементы, дающие поперечное параллельное смещение . . . . .	254
§ 59. Деформирующие элементы, дающие изменение направления оси последующей системы . . . . .	257
§ 60. Вращение пары зеркал . . . . .	259
§ 61. Вращение системы зеркал вокруг оси, лежащей в плоскости главного сечения . . . . .	260
§ 62. Силовой деформирующий элемент . . . . .	262

### ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

### ПРИЛОЖЕНИЯ

#### Глава XVII. Набор склеенных объективов

§ 63. Общие соображения . . . . .	265
-----------------------------------	-----

#### Глава XVIII. Набор окуляров

§ 64. Окуляр Кельнера . . . . .	392
§ 65. Окуляр Эрфле . . . . .	394
§ 66. Симметричные окуляры . . . . .	395
Литература . . . . .	397

Михаил Михайлович Русинов

#### ГАБАРИТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Редактор Е. Г. Яхонтов                      Редактор издательства В. И. Васильева  
Технический редактор В. В. Романова                      Корректор Э. А. Кузнецова

Сдано в набор 16/IV 1963 г.	Подписано к печати 4/X 1963 г.
Формат бумаги 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Бум. л. 12,5 + 1 вкл.
Печ. л. 25 + 1 вкл.	Уч.-зд. л. 24,84
Т—13312                      Тираж 4000 экз.	Зак. № 245                      Цена 1 р. 34 к.

Типография фабрики № 5 ГУГК

### Замеченные опечатки

Страница	Столбец	Строка	Напечатано	Должно быть
274	3 слева	13 сверху	202,63	207,63
291	3 слева	8 снизу	126 37	126,37
297	1 справа	2 сверху	0,082	0,088
297	1 справа	4 сверху	0,214	0,234
297	1 справа	6 сверху	0,079	0,088
297	1 справа	8 сверху	0,210	0,236
297	1 справа	10 сверху	0,077	0,088
297	1 справа	3 снизу	0,206	0,236
297	1 справа	1 снизу	0,075	0,088
307	2 слева	3 сверху	—0,761	— 0,161
309	1 справа	1 снизу	0,005	—0,005
310	2 справа	2 снизу	—1,789	—0,789
311	3 слева	14 сверху	—4252,81	—42528,1
311	3 слева	6 снизу	—22332,9	—2233,29
343	5 слева	14 сверху	1,5270	1,5220
344	4 справа	6 снизу	—0,802	0,802
355	6 слева	8 снизу	0,102	0,122
365	7 слева	11 снизу	0,010	—0,010
371	3 справа	14 снизу	0,066	0,046
376	2 справа	6 сверху	—0,090	0,090
376	4 справа	14 сверху	0,053	0,056
388	3 справа	6 снизу	—0,014	0,014
391	5 слева	4 снизу	1,280	—1,280
391	3 слева	14 сверху	—2094,29	—20942,91
391	3 слева	6 снизу	—10990,0	1099,00

М. М. Русинов. Габаритные расчеты оптических систем.

1 р. 34 к.