

Ж. М. ЛОРЕЦЯН

## О ВОЗМОЖНОСТИ УКОРОЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШМИДТА

Обладая рядом серьезных достоинств, оптическая система Б. Шмидта [1] сыграла большую роль в развитии астроприборостроения. Однако эта система имеет существенный недостаток—оптическая длина системы в 2 раза превышает фокусное расстояние.

Вопросами теории системы Шмидта занимались Райт [2], Штрёмгер [3], Смили [4] и другие.

Целью настоящего исследования является изучение возможности укорочения системы Шмидта при изменении формы главного зеркала.

Для исследования была выбрана система с относительным отверстием  $A = 1 : 1$  и диаметром входного зрачка  $D_{\text{вх}} = 150$  мм. Производился тригонометрический расчет лучей через зоны —  $Y = 0, 0,6H, 0,86H$  и  $H$ , где  $H$ —половина диаметра входного зрачка.

Для исследования хроматических аберраций были взяты лучи с длинами волн  $C$  (656.5 нмк),  $F$  (486.1 нмк),  $h$  (404.7 нмк). Коррекционная пластина рассчитывалась относительно основного луча. Рассчитывались системы с зеркалами, являющимися поверхностями вращения сечений конуса и имеющие квадрат эксцентриситета ( $e^2$ ):  $+0.05, 0, -0.05, -0.1$ .

Расстояния между коррекционной пластиной и зеркалом ( $d$ ) были взяты следующие:  $d_{\text{кл}} = 300$  мм—классическая система,  $d_{1\text{ук}} = 275$  мм и  $d_{2\text{ук}} = 250$  мм—укороченные системы.

Входной зрачок во всех случаях совпадает с вершиной коррекционной пластины.

Камера Шмидта рассчитывалась по общим формулам для ретушированной поверхности по методу Д. Д. Максудова [5].

Окончательная оценка качества системы производилась по размеру кружка рассеяния, получаемой на фокальной поверхности. Путем подбора формы коррекционной пластины при всех вариантах кружков рассеяния на оси для главного луча не превышал в конечном счете 1 микрона. Все варианты системы рассчитывались для двух значений угла поля зрения:  $15^\circ$  и  $10^\circ$ .

Ниже изложены основные результаты исследования по изучению зависимости основных видов aberrаций от расстояния между пластинкой и зеркалом ( $d$ ), от формы зеркала ( $e^2$ ) и от угла поля зрения ( $2W$ ). Для краткости табличные цифровые данные опущены.

**Астигматизм.** Астигматизм систем определен астигматической разностью  $\Delta_{sm}$  (рис. 1).

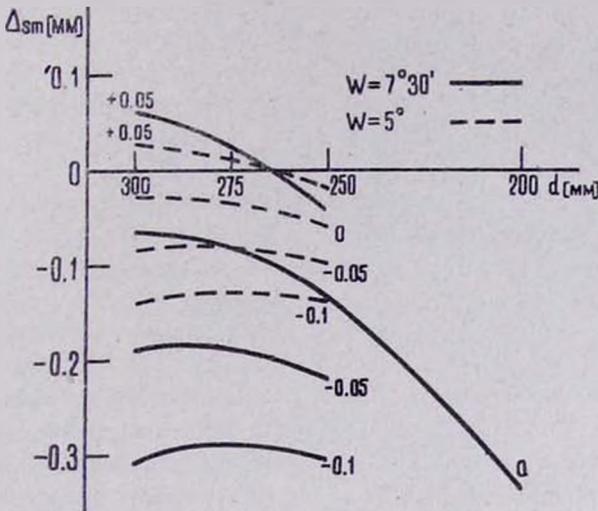


Рис. 1. Астигматизм  
 14. 1. Астигматизм

С укорочением длины системы при  $e^2 \leq 0$  величина  $\Delta_{sm}$  абсолютно растет в отрицательную сторону, а при  $e^2 > 0$  переходит от положительного значения в отрицательное. Для некоторых расстояний  $d_{ук}$  при  $e^2 > 0$  астигматизм системы равен нулю. При этом, чем больше величина  $e^2$ , тем меньше расстояние  $d_{ук}$ . При укорочении длины камеры Шмидта, для получения минимального астигматизма, желательно применять зеркала с  $e^2 > 0$ .

**Кривизна поля.** Кривизна поля характеризуется радиусом кривизны  $R_k$  или стрелкой прогиба  $x_k$  фокальной поверхности  $F$ .

Для проверки отступления поверхности  $F$  от сферы для всех вариантов систем рассчитывался радиус  $R_k$  для двух углов поля зрения:  $15^\circ$  и  $10^\circ$ . Величины  $R_k$  для двух данных углов в каждой системе очень близки друг к другу. Пятно рассеяния, образуемое на сферической фокальной поверхности из-за разности радиусов, не превышало 0.01 мм. Следовательно, во всех случаях фокальная поверхность  $F$  имеет форму, очень близкую к сфере.

Результаты исследования зависимости кривизны поля  $\mathcal{C}'_k$  от значений  $d$  и  $e^2$  представлены на рис. 2.

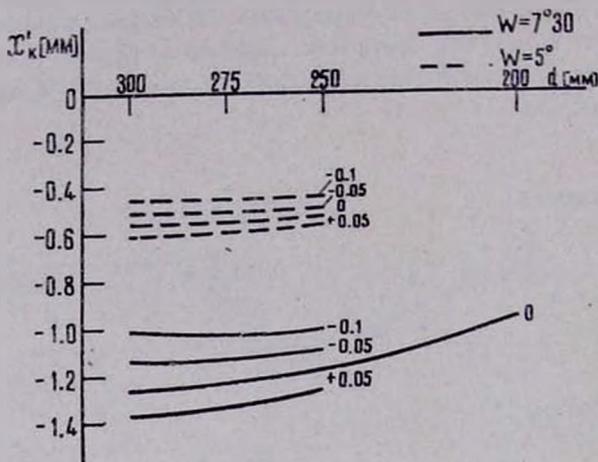


Рис. 2. Кривизна поля  
Դժ. 2. Դաշտի կորությունը

С укорочением длины системы кривизна поля уменьшается. При расположении коррекционной пластины близко к фокусу системы кривизна поля равна нулю. При укорочении камеры Шмидта для получения минимальной кривизны поля желательно применять зеркала с  $e^2 < 0$ .

**Кома.** По данным тригонометрического расчета широких наклонных пучков определена меридианальная кома ( $K_M$ ) для разных значений  $d$ ,  $e^2$  и  $2W$  (рис. 3).

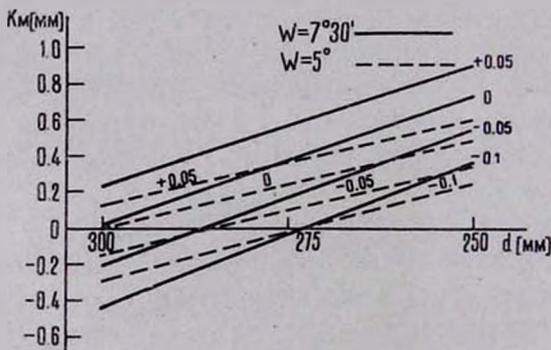


Рис. 3. Кома  
Դժ. 3. Կոմա

Результаты исследования следующие.

С уменьшением расстояния  $d$  при любых значениях  $e^2$  кома стремится к положительному значению. При определенных расстояниях

$d_{yk}$  системы с асферическими зеркалами с  $e^2 < 0$  будут иметь кому, равную нулю. Для получения минимальной комы при укорочении системы Шмидта желательно применять зеркала, имеющие форму сплюснутого сфероида ( $e^2 < 0$ ).

**Хроматическая aberrация.** Для изучения зависимости хроматической aberrации от  $d$  и  $e^2$  производился тригонометрический расчет для 3 лучей  $Yh, F, C$ .

Исследование дало следующие результаты.

Поперечный хроматизм на оси при укорочении системы на 17% (с 300 до 250 мм) остается практически неизменным. При изменении же формы зеркала ( $e^2$ ) эти aberrации несколько возрастают. Так например, для системы с  $e^2 = -0.1$  хроматическая aberrация на оси возрастает по сравнению с системой  $e^2 = 0$  на 5 + 10%.

Хроматизм увеличения при укорочении системы на 17% для данного  $e^2$  уменьшается, но незначительно ( $\approx 1.5\%$ ). При изменении  $e^2$  хроматизм увеличения остается практически неизменным. Разность хроматических aberrаций наклонных пучков для лучей  $C$  и  $h$  относительно основного луча  $F$  достигает в классической системе больших величин (100—130 мк), но она остается почти неизменной при изменении параметров  $e^2$  и  $d$ .

Из вышеуказанного следует, что хроматические aberrации при укорочении системы Шмидта изменяются незначительно по сравнению с классической системой.

**Дисторсия.** Определена абсолютная дисторсия  $\delta y'$  (рис. 4).

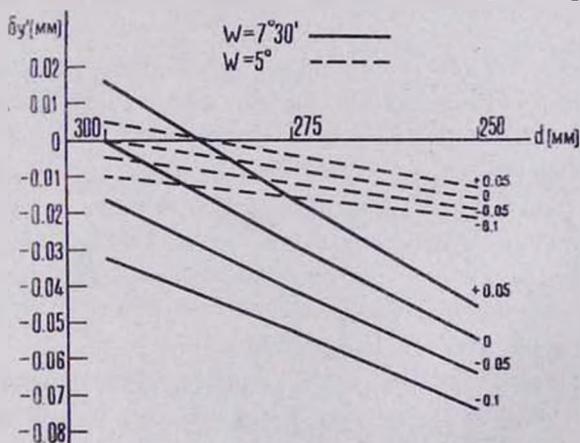


Рис. 4. Дисторсия  
 ы. 4. ышпшшш

С укорочением системы при любых значениях  $e^2$  дисторсия стремится к отрицательному значению. При  $e^2 > 0$  для некоторых значений расстояния  $d_{yk}$  дисторсия в системе будет отсутствовать. Это расстояние будет тем меньше, чем больше  $e^2$ .

*Асферизация.* Для уничтожения сферической аберрации на оси одна из сторон коррекционной пластины деформируется в асферическую поверхность высшего порядка. Уравнение этой поверхности имеет вид

$$x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + \dots$$

Асферичность пластины определялась как отступление асферической поверхности от огибающей выпуклой сферы.

Анализ изменения асферичности для разных вариантов дал следующие результаты:

1. При укорочении системы происходит незначительное увеличение асферичности. Так например, при укорочении системы на 17% ( $\Delta d = 50$  мм) асферичность увеличивается лишь на 1%.

2. Изменение формы зеркала приводит к более значительному изменению величины асферичности. При  $e^2 > 0$  происходит уменьшение величины асферичности, а при  $e^2 < 0$  — увеличение. Изменение  $e^2$  на 0.05 приводит к изменению асферичности в среднем на 5%.

Асферичность зеркала определялась по формуле Д. Д. Максудова [5] как наибольшее отклонение его поверхности от ближайшей сферы сравнения ( $\delta_m$ ). С увеличением  $e^2$  увеличивается и асферичность

В нашем случае имеем:

при	$e^2 = 0,$	$\delta_m = 0$
	$e^2 = 0.05,$	$\delta_m = 0.00295$
	$e^2 = 0.1,$	$\delta_m = 0.0059$

*Сферическая аберрация широких наклонных пучков.* Были рассчитаны величины несовпадения лучей широких наклонных меридианальных и сагиттальных пучков с главным лучом —  $\Delta y'_m$  и  $G'_s$ .

Ввиду громоздкости и сложности расчета широкого наклонного сагиттального пучка расчет его был произведен на электронно-вычислительной машине. Одновременно, с ее помощью были проверены расчеты осевого и широкого наклонного меридианального пучков. Значения  $\Delta y'_m$  и  $G'_s$  изображены графически для  $2W = 15^\circ$  на рис. 5.

Анализ данных показал следующее.

С укорочением системы происходит резкое изменение сферической аберрации наклонных пучков. Величина  $\Delta y'_m$  для всех значений  $e^2$  алгебраически возрастает. Чем короче система, тем больше  $\Delta y'_m$  для систем с  $e^2 \geq 0$ .

Системы с  $e^2 < 0$  при определенных расстояниях  $d_{yk}$  имеют значения  $\Delta y'_m$ , близкие к 0. А при дальнейшем укорочении длины системы  $\Delta y'_m$  растет в положительную сторону.

Величина  $G'_s$  при укорочении системы также возрастает, но сравнительно незначительно. Большие отклонения величины  $G'_s$  имеют системы с  $e^2 > 0$ . Следовательно, при укорочении камеры Шмидта для уменьшения сферических aberrаций широких меридианальных пучков

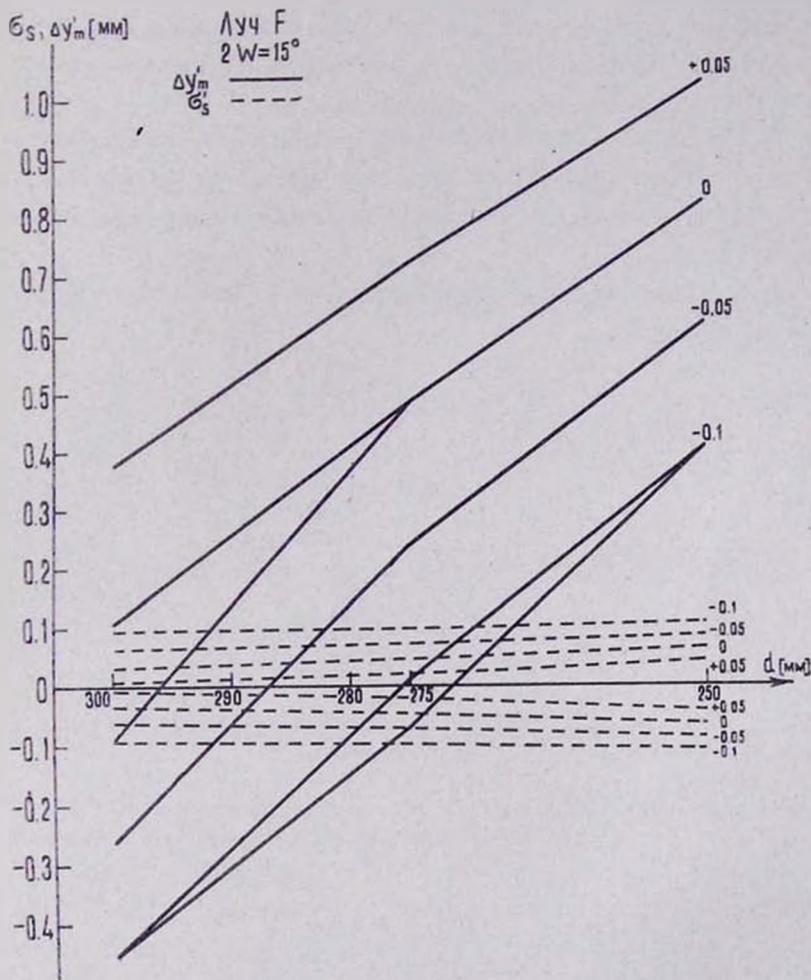


Рис. 5. Зависимость  $\Delta y'_m$  и  $G'_s$  от расстояния  $d$

Նկ. 5.  $\Delta y'_m$  և  $G'_s$  կախումը  $d$  տարածությունից

необходимо применять в системе зеркало с  $e^2 < 0$ , но при этом увеличивается сферическая aberrация широких сагиттальных пучков, которая при определенных значениях расстояния  $d_{yk}$  начинает превосходить сферическую aberrацию меридианального пучка.

*Анализ системы по пятну рассеяния.* За критерий оценки и сравнения систем примем величину пятна рассеяния, получаемую на фокальной поверхности.

Величина пятна рассеяния в меридианальной плоскости определяется из выражения

$$\delta y'_m = \Delta y'_{+m} - \Delta y'_{-m}. \quad (1)$$

Для пояснения обратимся к рисунку б, на котором изображено следующее:

$L_{+m}$ ,  $L_{-m}$  — точки пересечения лучей с фокальной поверхностью  $F$ ,

$L'_0$  — точка пересечения главного луча с поверхностью  $F$ ,

$\Delta y'_{+m}$  — максимальное верхнее отклонение точки пересечения луча пучка от точки  $L'_0$ ,

$\Delta y'_{-m}$  — максимальное нижнее отклонение точки пересечения луча пучка от точки  $L'_0$ .

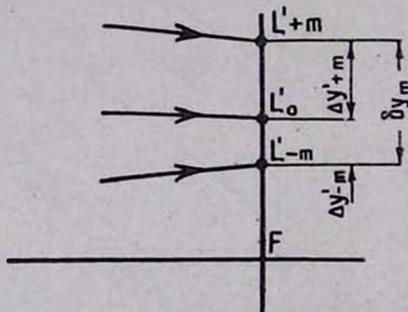


Рис. 6. Пятно рассеяния  
Դ՛կ. 6. Յր՛մնի բի՛ծ

Вычисленные значения  $\delta y'_m$  для разных значений  $W$ ,  $d$  и  $e^2$  даны в табл. 1.

Таблица 1

		Пятно рассеяния					
$W^c$	$d$ , мм	300		275		250	
	$e^2$	$\delta y'_m$	$\delta y'_s$	$\delta y'_m$	$\delta y'_s$	$\delta y'_m$	$\delta y'_s$
7°30'	+0.05	+0.3767	0.0076	0.7200	0.0420	1.0305	0.0858
	0	±0.1939	0.0670	0.4804	0.0914	0.8277	0.1306
	-0.05	-0.2607	0.1264	0.2403	0.1428	0.6198	0.1730
	-0.1	-0.4530	0.1856	±0.0874	0.1934	0.4091	0.2166
5°00'	+0.05	0.2160	0.0034	0.4500	0.0200	0.6623	0.0382
	0	±0.0856	0.0300	0.2961	0.0406	0.5321	0.0580
	-0.05	-0.1656	0.0560	0.1432	0.0630	0.3985	0.0770
	-0.1	-0.3016	0.0820	±0.0540	0.0856	0.2639	0.0960

Величины  $\delta y'_m$  представлены положительными и отрицательными знаками. Если пятно рассеяния располагается выше точки  $L_0$ , то  $\delta y'_m$  положительно и  $\delta y'_m = \Delta y'_{+m}$ ; если ниже — отрицательно и  $\delta y'_m = -\Delta y'_{-m}$ ; если точка  $L_0$  находится внутри пятна рассеяния, то перед величиной  $\delta y'_m$  ставится знак  $\pm$  и  $|\delta y'_m| = |\Delta y'_{+m}| + |\Delta y'_{-m}|$ . Определение знаков помогло графическому выявлению величины  $\delta y'_m$  при разных значениях  $W, d, e^2$  (рис. 5, 7, 8). Если точка  $L_0$  находится внутри пятна рассеяния ( $\pm \delta y'_m$ ), то на графиках даются величины  $\Delta y'_{+m}$  и  $\Delta y'_{-m}$ .

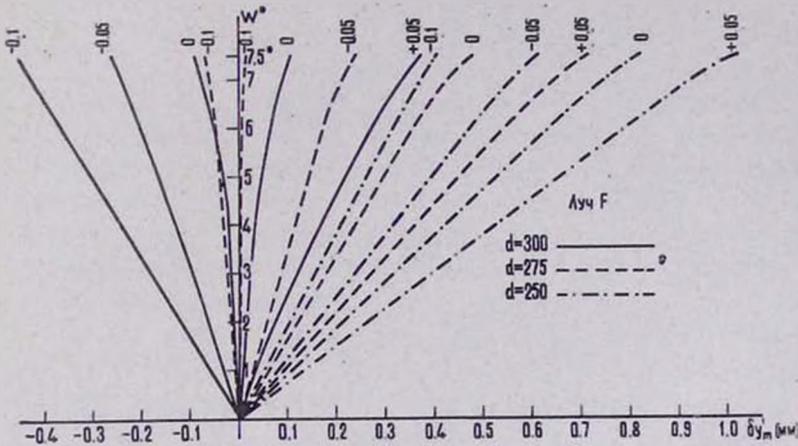


Рис. 7. Зависимость  $\delta y'_m$  от угла  $W$

Նկ. 7.  $\delta y'_m$  կախումըր  $W$  անկյունից

В сагиттальной плоскости пятно рассеяния равно

$$\delta y'_s = 2G'_s \tag{2}$$

Величины  $\delta y'_s$  даны в табл. 1 и на рис. 8.

Рассчитанные варианты систем со сферическими и асферическими зеркалами помогли нам выявить некоторые закономерности изменения оптических aberrаций при разных значениях  $e^2, d, 2W$ .

Наиболее совершенной в отношении aberrаций является классический вариант ( $e^2 = 0; d = 300$  мм), дающий отличное изображение на оси, ничтожно малую кому, нулевую дисторсию, но имеющий кривизну поля и остаточную aberrацию широкого наклонного пучка. Попытка укорочения классической системы только за счет приближения пластины к зеркалу дает отрицательный результат. Из-за потери симметрии лучей в пучке относительно главного луча резко увеличиваются остаточные aberrации широкого наклонного пучка. Так например, при укорочении системы с  $e^2 = 0$  лишь на 8% ( $d = 275$  мм) раз-

мер пятна рассеяния увеличивается более чем в 8 раз, а меридианальная кома — в 40 раз, появляется дисторсия.

Применение в укороченных системах асферического зеркала дает в некоторых случаях более положительный результат.

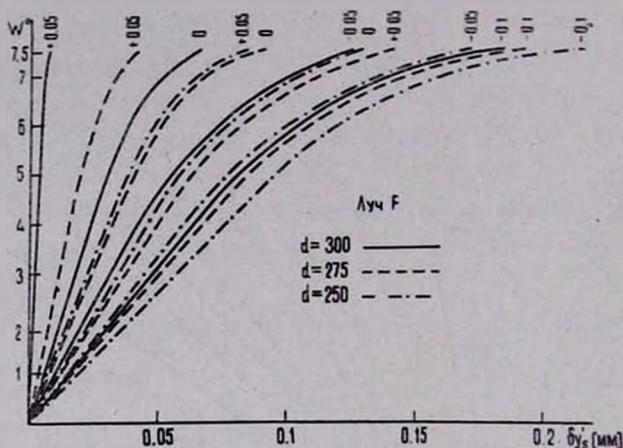


Рис. 8. Зависимость  $\Delta y'_s$  от угла  $W$

Նկ. 8.  $\Delta y'_s$  կախումը  $W$  անկյունից

Введение в систему зеркала с  $e^2 < 0$  по сравнению с другими вариантами укороченных систем выглядит более перспективным в смысле уменьшения пятна рассеяния. Из рис. 5 следует, что для каждого значения  $e^2 < 0$  имеется определенное расстояние  $d_{\min}$ , где пятно рассеяния имеет минимальное значение —  $\Delta y'_{\min}$ . Так, например, система с  $e^2 = -0.05$  при  $d_{\min} = 287$  мм имеет  $\Delta y'_m = 0$ ,  $\Delta y'_s = 0.1300$  мм, т. е.  $\Delta y'_{\min} = 0.1300$  мм. Из рис. 5 также видно, что дальнейшее укорочение системы за счет применения зеркал с меньшими значениями  $e^2$  ( $-0.2$ ;  $-0.3$  и т. д.) приводит к еще большему увеличению величины  $\Delta y'_{\min}$ . Следовательно, при данной светосиле и данном угле  $2W$  имеется предел возможности укорочения системы. Больше укорочение систем возможно при уменьшении поля зрения системы. Так например, для рассматриваемой выше системы ( $e^2 = -0.05$ ,  $d = 287$  мм) при угле  $2W = 10^\circ$  величина пятна рассеяния имеет следующие значения:  $\Delta y'_m = 0$ ,  $\Delta y'_s = 0.060$  мм, т. е.  $\Delta y'_{\min} = 0.060$  мм. Это показывает, что уменьшив угол  $2W$  на одну треть, мы снизили величину пятна рассеяния более чем в два раза. Практически возможно для каждого варианта подобрать такой угол  $2W$ , который дает допусковую величину пятна рассеяния  $-0.030$  мм. Для этого построены графики зависимости величин  $\Delta y'_m$  и  $\Delta y'_s$  от угла  $W$  для всех вариантов систем (рис. 7 и 8).

Из графиков видно, что для получения качественного изображения по полю необходимо для всех вариантов брать угол  $2W < 15^\circ$ . Так, для классической системы  $\delta y'_m = \pm 0.03$  мм при  $2W = 11.5^\circ$ , а  $\delta y'_s = 0.03$  мм при  $2W = 10^\circ$ . Т. е. практически допустимый угол поля зрения  $2W_s = 10^\circ$ . При укорочении системы на 17% ( $d_{yk} = 250$  мм) допустимые углы имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} e^2 = +0.05, & \quad 2W_s = 20', \\ e^2 = 0, & \quad 2W_s = 30', \\ e^2 = -0.05, & \quad 2W_s = 40', \\ e^2 = -0.1, & \quad 2W_s = 1^\circ 15'. \end{aligned}$$

Эти результаты говорят о том, что стремление к более эффективным укорочениям сводит на нет одно из важных достоинств камеры Шмидта — ее широкоугольность. Следовательно, система Шмидта при данном относительном отверстии имеет предел укорочения.

Анализ наших расчетов показал, что при укорочении системы Шмидта для получения минимального пятна рассеяния следует брать в системе зеркало с поверхностью сплюснутого сфероида ( $e^2 < 0$ ). Зеркало такой формы лучше, чем другое, компенсирует аберрации широких наклонных лучей, вышедших из коррекционной пластины укороченной системы. Зеркало с  $e^2 < 0$  в укороченных системах более благоприятствует уменьшению комы, но способствует росту астигматизма, дисторсии и величины асферизации коррекционной пластины. Следует отметить, что укорочением можно уменьшить или совершенно исключить один из основных недостатков системы Шмидта — кривизну поля. В укороченных системах возникает дополнительная технологическая задача по изготовлению сплюснутого сфероида, у которой величина отступления от сферы зависит от диаметра, относительного отверстия и эксцентриситета поверхности зеркала.

В заключение следует сказать, что вопрос исследования возможности укорочения системы Шмидта за счет применения асферического зеркала не исчерпан. Данное исследование выявило, что для широкоугольных и светосильных систем возможности укорочения малы. С уменьшением относительного отверстия (1:2; 1:3) возможны более значительные укорочения с допустимой величиной пятна рассеяния.

## ՇՄԻԴՏԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄԻ ԿԱՐՃԱՑՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

## Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հետազոտված է Շմիդտի կլասիկ սիստեմի կարճացման հնարավորությունը նրա հայելու ձևը փոխելու միջոցով: Նորմալ և կարճացրած սիստեմների որակի հետազոտման համար կատարված են բազմաթիվ եռանկյունաչափական հաշվումներ: Քննարկված են սֆերիկ, էլիպսոիդալ և տափակացված սֆերոիդալ ձևերի հայելիներով սիստեմներ:

Հաշվումների վերլուծումը ցույց է տալիս հետևյալը՝

ա) կարճացված սիստեմների համար հայելին պետք է ունենա ստափակացված սֆերոիդալ ձև:

բ) Աբերացիաների փոքրացման համար կարճացված սիստեմը պետք է ունենա ավելի փոքր անկյունային դաշտ, քան նույն լուսաուժ ունեցող կլասիկ Շմիդտի սիստեմը:

G. M. LORETSIAN

## ON THE POSSIBILITY OF SHORTENING OF THE OPTICAL SCHMIDT SYSTEM

## S u m m a r y

The possibility of shortening of the classical Schmidt system by changing of the form of its mirror has been investigated. Many trigonometric calculations have been made in order to investigate the qualities of normal and shortened systems. Systems with spherical, ellipsoidal and flattened spheroidal mirrors have been considered. The results of these calculations have showed:

a) for a shortened system the mirror should be a flattened spheroid.

b) in order to diminish the aberrations, the shortened system should have a smaller angular field than a classical Schmidt system of the same light-gathering power.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. B. Schmidt, Mitteilungen der Hamburger Sternwarte, 7, 36, 1932.
2. F. Wright, Theory and Design of Aplanatic Reflectors Employing a Correcting lens, Amateur Telescope, 401—409, 1937.
3. B. Stromgren, Das Schmidtische Spiegelteleskop, Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft, p. 70, 1935.
4. C. Smiley, The Schmidt camera, Popular Astronomy, 47, 4, 1940.
5. Д. Д. Максудов, Астрономическая оптика, 1946, М.—Л., ОГИЗ.