

## О РАСЧЕТЕ МЕНИСКОВЫХ СИСТЕМ

*Т. С. Белороссова, Д. Д. Максудов, Н. В. Мерман, М. А. Соснина*

В статье рассматриваются методы определения конструктивных элементов менисковых систем на основании таблиц и графиков, полученных при помощи точного тригонометрического расчета. Границы изменения параметров, на которых основаны графики, определены реальными конструктивными требованиями. Рассмотрены три типа менисковых систем: система «мениск—зеркало», система Кассегрен I и система Кассегрен II. Расчеты реальных систем показали высокую точность определения конструктивных элементов. Материалы статьи могут быть использованы для быстрого расчета хорошо скорректированных менисковых телескопов.

Менисковые системы Д. Д. Максудова в различных модификациях пользуются большой популярностью среди оптиков и астрономов, поэтому нет нужды еще раз описывать их достоинства и значение. Методы расчета менисковых систем неоднократно описывались в литературе: известны как эмпирические формулы Максудова [1, 2], так и методы, основанные на теории абберации 3-го порядка [3]. Поэтому не будем еще раз описывать методику выбора первоначального варианта менисковой системы. Но как эмпирические формулы, так и теория аббераций 3-го порядка дают лишь приближенные значения конструктивных элементов искомой системы и зачастую требуют большого тригонометрического расчета, особенно в случае светосильных систем. Тем не менее не только в астрономии, но и в ряде других областей науки и техники возникает необходимость в быстром расчете менисковых систем с достаточно хо-

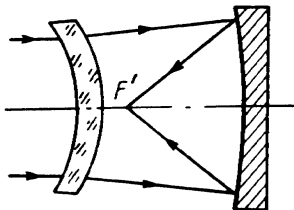


Рис. 1. Система «мениск + сферическое зеркало».

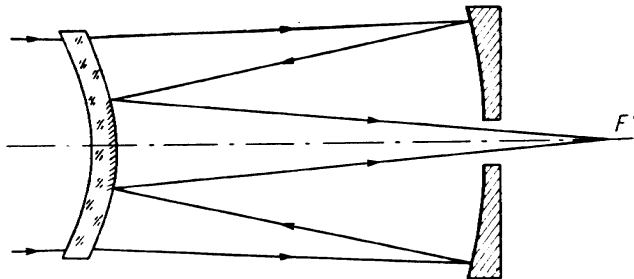


Рис. 2. Система «менисковый Кассегрен».

рошим исправлением аббераций. Поэтому автор менисковых систем Д. Д. Максудов в 1963 г. запланировал и начал расчет большого числа менисковых систем, основные характеристики которых менялись в широком диапазоне при абсолютно идентичном исправлении аббераций. Наиболее употребляемыми менисковыми системами являются системы типа «мениск + сферическое зеркало» (рис. 1) и «менисковый Кассегрен» (рис. 2). Системы «менисковый Кассегрен» в свою очередь можно разделить на два класса: Кассегрен I с наалюминированным вторичным зеркалом и Кассегрен II, в котором вторичное зеркало нашлифовано или наклеено на вторую поверхность мениска, что усложняет технологию изготовления системы, но значительно увеличивает ее поле зрения.

Расчеты велись в строгом однообразии: все варианты были рассчитаны для  $D$ , равного 100 мм, принятого за единицу масштаба, для мениска взято стекло К-8. В качестве основного параметра, характеризующего относительное отверстие и длину инструмента, было взято значение первого радиуса кривизны мениска  $R_1$ .

Так как толщина мениска коренным образом влияет на абберации и параметры системы, вычисления были выполнены для трех толщин мениска. В случае систем «менисковый Кассегрен» были рассмотрены также три значения положения фокуса относительно вершины главного зеркала.

Все диапазоны изменения указанных величин были выбраны наиболее рациональным путем, чтобы можно было обеспечить практически требуемые варианты. Особое значение придавалось единообразию исправления аббераций. При этом создавалась возможность интерполяции и экстраполяции пара-

метров систем в широких пределах и точною и системы, найденные таким образом, не требовали дополнительных тригонометрических расчетов.

Всего было рассчитано 84 системы указанных трех типов, результаты расчета приведены в виде таблиц и графиков, которые являются рабочим материалом при подборе требуемой системы. Необходимо отметить, что при интерполяции таблиц и графиков конструктор не нуждается ни в какой дополнительной работе, в то время как при экстраполяции необходимо продолжить графики до требуемого значения  $R_1$ ; при этом могут потребоваться дополнительные тригонометрические расчеты и небольшая «доводка» полученных конструктивных элементов.

## 1. Система «мениск—вогнутое зеркало»

Эта система является основной менисковой системой благодаря тому, что допускает высокое относительное отверстие. На основе этой системы создано большинство современных крупных светосильных телескопов («Менисковый Шмидт», «супер-Шмидт» и др.). Здесь мы ограничимся рассмотрением системы в чистом виде, без всяких модификаций, так как в ряде случаев, несмотря на простоту конструкции, она способна при достаточной светосиле давать изображение отличного качества. Подобная система обладает тремя свободными параметрами, следовательно, можно исправить три аберрации. Мы поставили своей целью исправить сферическую аберрацию и кому при устранении хроматизма положения. При этом кривизну поля и дисторсию можно исправить введением модифицированной линзы Пиацци-Смита, расположенной вблизи фокуса системы. Хроматизм увеличения при необходимости может быть значительно уменьшен добавлением второго мениска [4], либо помещением в пучок лучей, выходящий из мениска, особой коррекционной линзы. (Такая линза применена в лунно-планетном телескопе  $D=700$  мм, изготавлиющемся в ГАО АН СССР).

Аберрацией, лимитирующей поле зрения, остается астигматизм. В дальнейшем будет показано, как путем асферизации зеркала можно устранить и эту аберрацию.

Исследование системы «мениск—вогнутое зеркало» было начато с определения диапазона изменения первого радиуса мениска, который в конечном итоге характеризует относительное отверстие системы. При диаметре системы  $D=1$  были взяты следующие значения  $-\bar{R}_1$ : 0.8, 1.0, 1.2 и 1.4 (буквы с чертой наверху означают, что эти величины выражены в единицах диаметра). Во всех случаях мениск был ахроматизован для лучей  $C$  и  $h$  для зоны  $H_1=0.707H$ , где  $H=0.5D$ , а сферическая аберрация и кома исправлены для внешней зоны  $H$ .

Для полного единообразия всех расчетов нулевым исправлением продольных аберраций считалось доведение их до сотых долей микрона, и комы — до 0.00005%. С первого взгляда такая точность могла бы показаться излишней, но при составлении точных графиков она оказалась необходимой. Расчеты были выполнены для трех толщин мениска:  $\bar{d}_1=0.10, 0.1414$  и  $0.20$ .

Таблица 1

	0.8			1.0			1.2			1.4		
$\bar{d}_1$ . . .	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20
$\Delta R d$ . . .	0.616990	0.618338	0.620345	0.599300	0.600799	0.602950	0.590140	0.591549	0.593555	0.584680	0.585983	0.587785
$-\bar{R}_2$ . . .	0.861699	0.887433	0.924069	1.059930	1.084953	1.120590	1.259014	1.283645	1.318711	1.458468	1.482858	1.517557
$-\bar{R}_3$ . . .	3.18769	2.95218	2.76441	4.50830	4.13372	3.82360	5.88294	5.36477	4.92806	8.31459	7.64665	6.07830
$\bar{d}_2$ . . .	1.91261	1.63058	1.37703	2.84571	2.42617	2.05235	3.84394	3.28172	2.78261	4.90604	4.19477	3.56472
$f' = V$ . . .	1.519356	1.386770	1.274319	2.164542	1.960432	1.784581	2.839303	2.561663	2.320543	3.544049	3.189969	2.881237
$\bar{D}_{\max}$ . . .	0.18582	0.14792	0.12162	0.89698	0.69163	0.54692	3.00678	2.27718	1.76268	8.07661	6.04749	4.62450
$\bar{L}$ . . .	2.1881	1.9475	1.7525	3.0797	2.7015	2.3863	4.0531	3.5323	3.0917	5.0984	4.4285	3.8571
$\bar{H}_3$ . . .	0.55589	0.57158	0.59163	0.54200	0.55404	0.56961	0.53460	0.54458	0.55753	0.52985	0.53847	0.54968
$w_k$ . . .	3°.3	3°.0	2°.7	7°.6	6°.6	5°.6	14°.4	13°.2	11°.2	23°.1	22°.5	19°.9
$w_{кр}$ . . .	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4	1°.4
$w_{аст}$ . . .	7°.6	7°.1	6°.6	8°.3	7°.6	7°.0	8°.9	8°.1	7°.4	9°.4	8°.6	7°.8
$-\Delta l'$ . . .	0.0002488	0.0002448	0.0002404	0.0003579	0.0003515	0.0003440	0.0004615	0.0004546	0.0004445	0.0005603	0.0005536	0.0005423
$\bar{\Delta} S_{0.707}$ . . .	0.001655	0.001732	0.001778	0.0006957	0.0007402	0.0007756	0.0003571	0.0003839	0.0004069	0.0002072	0.0002241	0.0002391

Результаты расчета этих систем приведены в табл. 1, где в зависимости от параметров  $\bar{R}_1$  и  $\bar{d}_1$  даны следующие величины:  $\frac{\Delta R}{d_1} = \frac{R_1 - R_2}{d_1}$  — величина, характеризующая ахроматизацию системы;  $\bar{R}_2$  — второй радиус кривизны мениска;  $\bar{R}_3$  — радиус кривизны главного зеркала;  $\bar{d}_2$  — расстояние между мениском и зеркалом;  $f'$  — фокусное расстояние;  $V = \frac{1}{A}$ , где  $A$  — относительное отверстие;  $\bar{L}$  — длина инструмента;  $w_k$  — поле зрения, допустимое остаточной комой;  $w_{кр}$  — поле зрения, допустимое кривизной поля (без учета линзы Пиацци-Смита);  $w_{аст}$  — поле зрения, допустимое астигматизмом;  $\bar{\Delta} l'$  — дисторсия системы;  $\bar{H}_3$  — высота падения луча  $C$  от внешней зоны на главное зеркало,

определяющая его размеры;  $\bar{\Delta}S'_{0.707}$  — остаточная сферическая aberrация на зоне  $0.707H$ . При определении допустимых полей был взят следующий допуск:  $\delta g' = 0.030$  мм, где  $\delta g'$  — диаметр пятна геометрического рассеяния от соответствующей aberrации.

Особое значение придано величине  $\bar{D}_{\max}$  — допустимому максимальному диаметру, при котором система удовлетворяет критерию Релея. Как известно, одной из aberrаций, которая ставит предел полезным диаметрам оптических систем, является остаточная сферическая aberrация. Величины  $\bar{D}_{\max}$  в табл. 1 были найдены с учетом остаточной сферической aberrации  $\bar{\Delta}S'_{0.707}$  на зоне  $H_1 = 0.707H$  по следующей формуле:

$$D_{\max} \approx \frac{0.01332 D V^2}{\bar{\Delta}S'_{0.707}}, \quad (1)$$

где  $V = \frac{1}{A}$ .

Формула (1) была выведена на основании следующего выражения для волновой aberrации [5]:

$$h_{\max} \approx 0.01042 A^2 \bar{\Delta}S'_{0.707}, \quad (2)$$

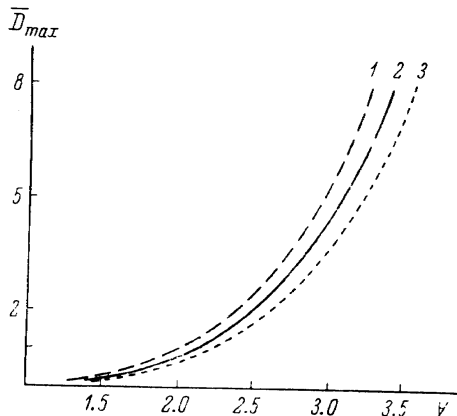


Рис. 3. Система «мениск—зеркало».  
1 —  $\bar{a}_1 = 0.20$ ; 2 —  $\bar{a}_1 = 0.1414$ ; 3 —  $\bar{a}_1 = 0.10$ .

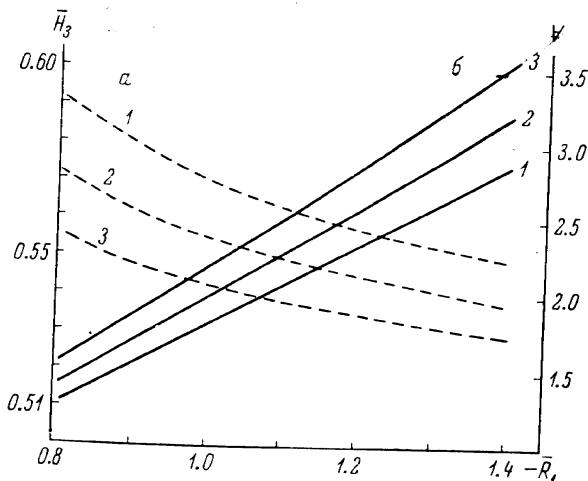


Рис. 4. Система «мениск—зеркало».  
а —  $H_3$ ; б —  $V$ . 1—3 — то же, что на рис. 3.

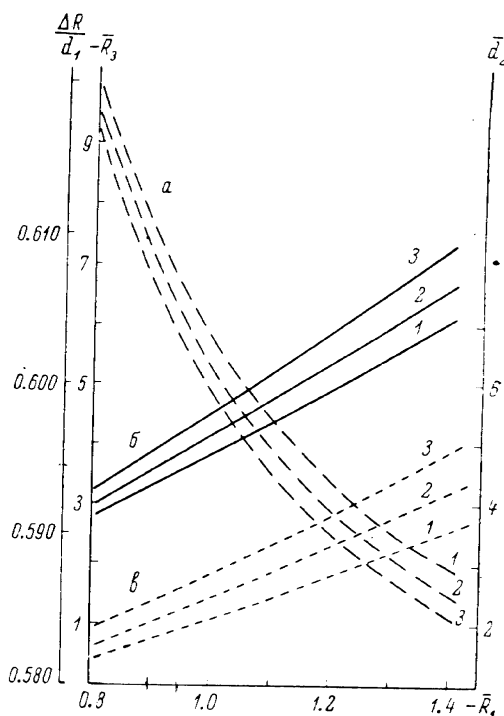


Рис. 5. Система «мениск—зеркало».

а —  $\frac{\Delta R}{a_1}$ ; б —  $R_3$ ; в —  $\bar{a}_2$ . 1—3 — то же, что на рис. 3.

где  $h_{\max}$  — максимальная волновая aberrация, принятая нами при выводе формулы, равная  $1/4\lambda$ . На основании числового материала для  $\bar{D}_{\max}$  можно получить также и следующую эмпирическую формулу:

$$\bar{D}_{\max} \approx 2.77 \bar{a}_1^{0.5} V^{1.5}, \quad (3)$$

которая может оказать большую помощь при интерполяции. В формуле (3) величины  $\bar{a}_1$  даны в единицах  $\bar{a}_1 = 0.1$ . Для толщины мениска  $\bar{a}_1 = 0.1$  формула (3) превращается в формулу

$$\bar{D}_{\max} \approx 2.77 V^{1.5}. \quad (4)$$

Понятие  $\bar{D}_{\max}$  подразумевает наличие в телескопе только сферических поверхностей. При необходимости получения большего диаметра для заданной светосилы ретушь одной из поверхностей мениска позволяет свести остаточную сферическую aberrацию до требуемой величины.

Используя результаты расчета, данные в табл. 1, можно построить графические зависимости конструктивных элементов от исходных параметров системы. Зависимость  $\bar{D}_{\max}$  от относительного отверстия  $A$  показана на рис. 3. На рис. 4 и 5 даны величины  $H_3$ ,  $V$ ,  $\frac{\Delta R}{a_1}$ ,  $R_3$  и  $\bar{a}_2$  для трех толщин мениска в зависимости от основного параметра —  $\bar{R}_1$ .

Последовательность нахождения конструктивных элементов заключается в следующем: пусть требуется рассчитать систему с относительным отверстием  $A$ .

По рис. 3 сразу же определяем, какой допустимый диаметр и соответствующую толщину мениска мы можем взять для заданного относительного отверстия. При выбранном диаметре мениска его толщина определяется однозначно (возможность вариации толщины создает возможность увеличения  $\bar{D}_{max}$ ). Затем для относительного отверстия  $A$  и найденной толщины мениска на рис. 4 определяем значение основного параметра  $\bar{R}_1$ . По найденному значению  $\bar{R}_1$  с помощью рис. 5 получаем и остальные конструктивные элементы:  $\bar{R}_2$ ,  $\bar{R}_3$  и  $\bar{d}_2$ . Таким образом мы получим все необходимые конструктивные данные для требуемой системы. Для оценки системы с точки зрения aberrаций достаточно использовать материал табл. 1 ( $w_k$ ,  $\bar{\Delta}'$  и др.).

Из табл. 1 видно, что в светосильных системах поле зрения ограничивается остаточной комой. Но при относительных отверстиях  $A \leq 1:2$  поле зрения начинает ограничивать астигматизм, который можно устранить введением в качестве параметра эксцентриситета зеркала. Как показали проведенные исследования, для этого достаточно выполнить главное зеркало в форме эллипсоида, близкого к сфере. Такой принцип был осуществлен в телескопе АЗТ-16 [4] (менисковый астрометрический астрограф диаметром 700 мм), главное зеркало которого представляет собой эллипсоид вращения с эксцентриситетом  $e^2=0.1257$ . В этом телескопе поперечный астигматизм  $\delta g' = 0.0028$  мм, и ничто не мешало бы нам довести его до полного нуля путем дальнейшего изменения  $e^2$ , если бы в том ощущалась практическая необходимость.

В книге Д. Д. Максудова [2] для определения конструктивных элементов системы «мениск—зеркало» приведены эмпирические формулы, выведенные им в предположении, что коррекция системы визуальная, мениск выполнен из стекла К-8 и имеет толщину  $\bar{d}_1=0.1$ . На основании данных табл. 1 нами составлены формулы (5), которые представляют собой некоторые поправки к формулам [2] с учетом изменения толщины мениска и ахроматизации системы и имеют вид

$$\begin{aligned} \bar{R}_1 &\simeq -0.6044 \bar{d}_1^{0.188} V^{0.66}, \\ \frac{\Delta R}{\bar{d}_1} &\simeq -\left[ +0.562 + 0.0844 \frac{A}{\bar{d}_1^{0.2}} \right], \\ \bar{R}_3 &\simeq -[2.127 + (\bar{d}_1^{0.06} - 1)] V^{0.974}, \\ \bar{d}_2 &\simeq \frac{1.1845}{\bar{d}_1^{0.144}} V^{1.13}. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (5) величины  $\bar{d}_1$  выражены в единицах  $\bar{d}_1=0.1$ . Точность их повышается с уменьшением относительного отверстия и приближением  $\bar{d}_1$  к значению  $\bar{d}_1=0.1$ . В этом случае конструктор может пользоваться формулами (5), не прибегая к интерполяции графиков.

## 2. Кассегрен I

Системы типа «менисковый Кассегрен» играют большую роль в астрономических исследованиях благодаря своей компактности при крупном масштабе изображения и хорошей ахроматизации, что выгодно отличает их от длиннофокусных линзовых систем. Преимущество менискового Кассегрена перед

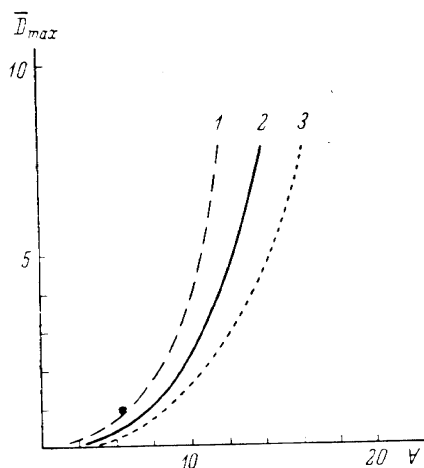


Рис. 6. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=0$ .  
1—3 — то же что на рис. 3.

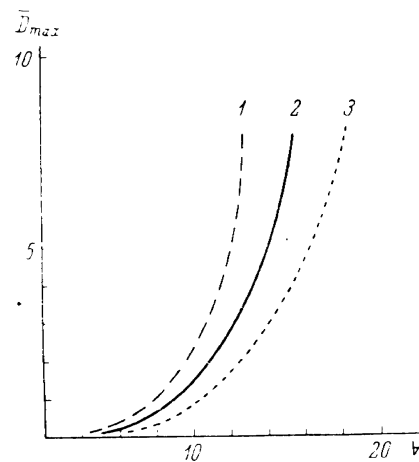


Рис. 7. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=0.5$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

чисто зеркальной аналогичной системой состоит в возможности осуществления большего поля зрения и герметичности трубы.

Табл. 2 дает общее представление о системе Кассегрен I при тех же обозначениях, что и в табл. 1. Здесь  $\bar{R}_4$  — радиус кривизны вторичного зеркала,  $\bar{d}_3$  — расстояние между главным и вторичным зерка-

	-R <sub>1</sub>											
	0.8			1.0			1.2			1.4		
	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2
$\bar{d}_1$ . . .	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2	0.1	0.1414	0.2
$\Delta R/d_1$	0.616990	0.618338	0.620345	0.599300	0.600799	0.602950	0.590140	0.591549	0.593555	0.584680	0.585983	0.587785

Δ = 0.

$-\bar{R}_3$ . . .	2.82552	2.59316	2.41294	4.05611	3.68180	3.37598	5.34276	4.822618	4.38763	6.68746	6.01555	5.44671
$\bar{d}_2 = -\bar{d}_3$	1.13992	1.03189	0.94865	1.67576	1.49947	1.35645	2.23939	1.992657	1.78777	2.83143	2.51115	2.24190
$\bar{r} = V$	4.96774	4.09686	3.42729	8.19862	7.64982	5.44827	11.88230	9.56277	7.75546	15.98896	12.81031	10.32858
$\bar{D}_{max}$ . . .	0.17691	0.14090	0.11690	0.85953	0.66200	0.52593	2.89014	2.18687	1.69586	7.78748	5.81533	4.45627
$\bar{L}$ . . .	1.415	1.349	1.324	1.910	1.770	1.690	2.449	2.243	2.097	3.024	2.745	2.534
$w_k$ . . .	23'	19'	16'	26'	23'	20'	31'	28'	25'	37'	33'	29'
$w_{kp}$ . . .	32'	36'	42'	27'	31'	36'	24'	27'	32'	22'	25'	29'
$w_{acr}$ . . .	196	199	293	192	194	197	190	192	194	099	191	190
$\Delta \bar{l}$ . . .	0.000080	0.000048	0.000028	0.000194	0.000116	0.000068	0.000359	0.000215	0.000127	0.000577	0.000346	0.000206
$H_3(c)$ . . .	0.54406	0.55900	0.57938	0.53271	0.54384	0.55905	0.52661	0.53564	0.54797	0.52269	0.53030	0.54000
$H_4(c)$ . . .	0.11647	0.12859	0.14242	0.10285	0.11377	0.12606	0.09455	0.10474	0.11604	0.08872	0.09820	0.10897
$-\Delta S'_{0.707}$	0.01858	0.01587	0.01338	0.01042	0.008898	0.007518	0.006507	0.005570	0.004724	0.004373	0.003759	0.00318

Δ = 0.5

$-\bar{R}_3$ . . .	2.79777	2.55600	2.36380	4.03628	3.65467	3.33915	5.32714	4.80089	4.35781	6.67446	5.99737	5.42158
$\bar{d}_2 = -\bar{d}_3$	1.09858	0.98092	0.88619	1.64310	1.45863	1.30558	2.21172	1.95775	1.74396	2.80707	2.48031	2.20295
$\bar{r} = V$	6.35865	5.27166	4.40505	9.89038	8.08928	6.65647	13.80003	11.20324	9.14251	18.09218	14.61653	11.86439
$\bar{D}_{max}$ . . .	0.17773	0.14160	0.11765	0.86052	0.66313	0.52712	2.89455	2.18766	1.69684	7.78000	5.82256	4.45671
$\bar{L}$ . . .	1.874	1.800	1.762	2.377	2.234	2.140	2.921	2.708	2.553	3.499	3.214	2.995
$w_k$ . . .	13'	11'	10'	18'	16'	14'	23'	20'	18'	29'	25'	22'
$w_{kp}$ . . .	29'	33'	38'	25'	28'	33'	23'	26'	30'	21'	24'	27'
$w_{acr}$ . . .	192	194	197	190	192	194	099	190	192	098	099	191
$\Delta \bar{l}$ . . .	0.000103	0.000062	0.000036	0.000235	0.000142	0.000084	0.000419	0.000253	0.000150	0.000656	0.000397	0.000238
$H_3(c)$ . . .	0.54343	0.55792	0.57759	0.53245	0.54337	0.55828	0.52647	0.53540	0.54755	0.52261	0.53021	0.54055
$H_4(c)$ . . .	0.12736	0.14302	0.16128	0.10898	0.12206	0.13716	0.09856	0.11017	0.12348	0.09157	0.10222	0.11434
$-\Delta S'_{0.707}$	0.03030	0.02614	0.02197	0.01514	0.01314	0.01120	0.008763	0.007643	0.006561	0.005604	0.004880	0.00420

Δ = 1.0

$-\bar{R}_3$ . . .	2.78239	2.53533	2.33580	4.02388	3.63779	3.31617	5.31648	4.786312	4.33783	6.66507	5.98442	5.40364
$\bar{d}_2 = -\bar{d}_3$	1.07314	0.94985	0.84795	1.62068	1.43100	1.27142	2.19127	1.932421	1.71250	2.78816	2.456757	2.17360
$\bar{r} = V$	7.80512	6.50701	5.44514	11.62357	9.57572	7.91647	15.75187	12.88253	10.57315	20.22195	16.45455	13.43610
$\bar{D}_{max}$ . . .	0.17846	0.14200	0.11827	0.86148	0.66400	0.52796	2.89276	2.18976	1.70017	7.78903	5.82169	4.45709
$\bar{L}$ . . .	2.349	2.270	2.223	2.855	2.706	2.605	3.400	3.183	3.022	3.981	3.691	3.466
$w_k$ . . .	9'	8'	7'	14'	12'	10'	18'	16'	14'	24'	21'	18'
$w_{kp}$ . . .	26'	30'	35'	23'	26'	31'	21'	21'	28'	20'	23'	26'
$w_{acr}$ . . .	190	192	194	099	190	192	098	099	191	097	098	190
$\Delta \bar{l}$ . . .	0.000128	0.000077	0.000044	0.000278	0.000169	0.00010	0.000480	0.000292	0.000175	0.000736	0.000449	0.000270
$H_3(c)$ . . .	0.54303	0.55727	0.57659	0.53227	0.54308	0.55776	0.52637	0.53522	0.54724	0.52254	0.53009	0.54035
$H_4(c)$ . . .	0.13440	0.15231	0.17352	0.11334	0.12790	0.14496	0.10161	0.11429	0.12902	0.09384	0.10531	0.11852
$-\Delta S'_{0.707}$	0.04547	0.03964	0.03339	0.02089	0.01839	0.01581	0.01142	0.1010	0.008758	0.006993	0.006195	0.005395

Т а б л и ц а 3

	-R <sub>1</sub>											
	0.8			1.0			1.2			1.4		
	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20
$\bar{d}_1$ . . .	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20	0.10	0.1414	0.20
$\Delta R/d_1$	0.61699	0.618338	0.620345	0.599300	0.600799	0.602950	0.590140	0.591549	0.593555	0.584680	0.585983	0.587785
$-\bar{R}_3$ . . .	2.73879	2.50428	2.32058	3.91760	3.54410	3.23827	5.15320	4.63636	4.20409	6.44780	5.78141	5.21754
$-\bar{R}_4$ . . .	1.16194	1.23088	1.33148	1.50630	1.56975	1.66455	1.84597	1.90268	1.99156	2.18095	2.23152	2.31482
$\bar{d}_2 = -\bar{d}_3$	1.02879	0.92121	0.82929	1.49839	1.32794	1.18441	1.99530	1.75968	1.56024	2.52066	2.21644	1.95708
$\bar{r} = V$	1.03479	0.92516	0.83829	1.50398	1.33114	1.18941	2.00035	1.76221	1.56334	2.52520	2.21844	1.95968
$\bar{D}_{max}$ . . .	3.678382	2.983552	2.445302	5.709525	4.592700	3.719355	7.974657	6.398892	5.156570	10.48095	8.399016	6.751353
$\bar{L}$ . . .	0.17400	0.13626	0.11251	0.85110	0.64772	0.51441	2.8714	2.1514	1.6620	7.7583	5.7326	4.3750
$w_k$ . . .	1.3043	1.2381	1.2048	1.7324	1.6033	1.5184	2.2044	2.0102	1.8694	2.7130	2.4502	2.2494
$w_{kp}$ . . .	0.55235	0.55666	0.57596	0.53129	0.54194	0.55644	0.52539	0.53402	0.54578	0.52162	0.52893	0.53890
$w_{acr}$ . . .	0.14320	0.15902	0.17758	0.13273	0.14654	0.16242	0.12594	0.13852	0.15288	0.12077	0.13253	0.14588
$H_3$ . . .	191	192	192	197	197	197	495	495	591	799	799	895
$H_4$ . . .	45'	53'	65'	40'	48'	57'	37'	43'	52'	35'	41'	48'
$w_k$ . . .	591	799	590	392	791	693	295	491	1793	292	392	698

	0.8			1.0			1.2			1.4		
$\bar{\Delta}l'$ . . .	0.002661	0.001378	0.000573	0.005564	0.002993	0.001465	0.009436	0.005263	0.002747	0.014383	0.008220	0.004454
$-\bar{\Delta}S'_{0.707}$	0.06035	0.008616	0.007077	0.005103	0.004300	0.003583	0.002951	0.002516	0.002118	0.001888	0.001627	0.001377

$\Delta = 0.5$

$-\bar{R}_3$ . . .	2.63248	2.38086	2.17749	3.82034	3.43141	3.10750	5.06274	4.53175	4.08268	6.36300	5.68251	5.10327
$-\bar{R}_4$ . . .	1.27045	1.31909	1.37919	1.62631	1.67823	1.74789	1.96951	2.02065	2.09321	2.30519	2.35694	2.42821
$\bar{d}_2$ . . .	0.90671	0.78833	0.68581	1.37999	1.19915	1.04516	1.88160	1.63522	1.42433	2.41157	2.09558	1.82541
$-\bar{d}_3$ . . .	0.91271	0.79233	0.69481	1.38668	1.20315	1.05016	1.88760	1.63882	1.42863	2.41665	2.09828	1.82881
$\bar{l}' = V$	4.104233	3.359916	2.782708	6.173683	5.003088	4.082628	8.475903	6.840405	5.545657	11.01750	8.858893	7.161232
$\bar{D}_{max}$ . . .	0.17380	0.13757	0.11270	0.85066	0.65240	0.51433	2.87174	2.1495	1.6581	7.7363	5.7398	4.3696
$\bar{L}$ . . .	1.6822	1.6052	1.5613	2.1124	1.9745	1.8791	2.5907	2.3858	2.2334	3.1039	2.8293	2.6178
$\bar{H}_3$ . . .	0.54046	0.55384	0.57181	0.53035	0.54052	0.55431	0.52483	0.53315	0.54447	0.52124	0.52835	0.53801
$\bar{H}_4$ . . .	0.17489	0.19670	0.22150	0.15389	0.17195	0.19260	0.14139	0.15721	0.17526	0.13267	0.14714	0.16338
$w_K$ . . .	1°0	1°0	1°0	1°6	2°1	2°2	4°2	4°2	4°7	7°5	7°5	8°0
$w_{Kp}$ . . .	47'	56'	67'	42'	50'	59'	38'	45'	54'	33'	42'	49'
$w_{act}$ . . .	5°5	6°7	4°6	3°3	8°1	5°8	2°6	4°3	12°3	2°2	3°2	7°2
$\bar{\Delta}l'$ . . .	0.002224	0.001130	0.000503	0.004839	0.002611	0.001299	0.008425	0.004703	0.002477	0.01311	0.007428	0.004053
$-\bar{\Delta}S'_{0.707}$	0.012910	0.010931	0.009154	0.005968	0.005111	0.004317	0.003332	0.002878	0.002452	0.002090	0.001808	0.001551

$\Delta = 1.0$

$-\bar{R}_3$ . . .	2.53700	2.26850	2.04667	3.73100	3.32676	2.98583	4.97821	4.43302	3.96826	6.28310	5.58898	4.99465
$-\bar{R}_4$ . . .	1.34600	1.37636	1.40333	1.72050	1.76081	1.80460	2.07326	2.11800	2.17179	2.41283	2.46234	2.52152
$\bar{d}_2$ . . .	0.80114	0.67704	0.56714	1.27612	1.08653	0.92224	1.77908	1.52249	1.30184	2.31126	1.98456	1.70467
$-\bar{d}_3$ . . .	0.81014	0.68104	0.57614	1.28337	1.09053	0.92924	1.78532	1.52689	1.30784	2.31668	1.98816	1.70907
$\bar{l}' = V$	4.531784	3.729819	3.113308	6.640938	5.408219	4.444569	8.977549	7.274338	5.932234	11.55744	9.322567	7.568650
$\bar{D}_{max}$ . . .	0.17400	0.13807	0.11361	0.85050	0.65220	0.51550	2.8721	2.1665	1.6587	7.7436	5.7562	4.3649
$\bar{L}$ . . .	2.0766	1.9939	1.9426	2.5101	2.3619	2.2562	2.9882	2.7730	2.6110	3.5037	3.2183	2.9971
$\bar{H}_3$ . . .	0.53882	0.55146	0.56835	0.52952	0.53927	0.55243	0.52431	0.53237	0.54328	0.52090	0.52781	0.53720
$\bar{H}_4$ . . .	0.20264	0.23002	0.26043	0.17306	0.19512	0.21995	0.15570	0.17459	0.19596	0.14381	0.16078	0.17954
$w_K$ . . .	0°9	0°9	0°9	1°4	1°9	2°0	4°0	4°0	4°4	7°2	7°2	7°6
$w_{Kp}$ . . .	49'	58'	68'	43'	51'	60'	39'	44'	55'	36'	42'	50'
$w_{act}$ . . .	6°1	6°0	4°3	3°3	18°7	5°4	2°6	4°4	10°0	2°2	3°3	7°9
$\bar{\Delta}l'$ . . .	0.001970	0.0009870	0.000434	0.004369	0.002353	0.001175	0.007728	0.004276	0.002264	0.012175	0.006853	0.003437
$-\bar{\Delta}S'_{0.707}$	0.01572	0.013422	0.01136	0.006903	0.005974	0.005104	0.003737	0.003253	0.002803	0.002296	0.001996	0.001731

Таблица 4

	0.8			1.0			1.2			1.4		
$\bar{d}_1$ . . .	0.1	0.1414	0.20	0.1	0.1414	0.20	0.1	0.1414	0.20	0.1	0.1414	0.20

$\bar{\Delta} = 0$

$x'_s$ . . .	-0.19362	-0.10773	-0.05611	-0.37885	-0.21649	-0.11811	-0.62186	-0.36332	-0.20415	-0.92905	-0.55092	-0.31605
$x'_m$ . . .	-0.18519	-0.11061	-0.06209	-0.34482	-0.21112	-0.12369	-0.54627	-0.34079	-0.20514	-0.79311	-0.50109	-0.30716
$\Delta'_{s-m}$ . . .	-0.00843	+0.00287	+0.00598	-0.03403	-0.00537	+0.00558	-0.07559	-0.02253	+0.00099	-0.13594	-0.04983	-0.00889

$\bar{\Delta} = 0.5$

$x'_s$ . . .	-0.19710	-0.11135	-0.05985	-0.38111	-0.21963	-0.12137	-0.62429	-0.36606	-0.20725	-1.07799	-0.55151	-0.31832
$x'_m$ . . .	-0.18911	-0.11574	-0.06775	-0.34642	-0.21510	-0.12871	-0.54620	-0.34327	-0.20943	-0.93752	-0.50087	-0.31022
$\Delta'_{s-m}$ . . .	-0.00799	+0.00439	+0.00790	-0.03469	-0.00453	+0.00734	-0.07809	-0.02279	+0.00218	-0.14047	-0.05064	-0.00810

$\bar{\Delta} = 1.0$

$x'_s$ . . .	-0.20472	-0.11545	-0.06266	-0.38944	-0.22451	-0.12556	-0.63311	-0.37107	-0.21145	-0.94416	-0.55701	-0.32235
$x'_m$ . . .	-0.19728	-0.12177	-0.07257	-0.35328	-0.22078	-0.13474	-0.55157	-0.34832	-0.21500	-0.79563	-0.50517	-0.31510
$\Delta'_{s-m}$ . . .	-0.00744	+0.00632	+0.00991	-0.03616	-0.00373	+0.00918	-0.08154	-0.02275	+0.00355	-0.14853	-0.05184	-0.00725

лами. По условию  $\bar{R}_4 = \bar{R}_2$  и  $d_3 = -d_2$ . Были взяты следующие значения выноса фокуса  $\Delta$  за поверхность главного зеркала:  $\bar{\Delta} = 0, 0.5$  и  $1.0$  — наиболее вероятные по конструктивным соображениям. При проектировании телескопа Кассегрен I добавляется интерполяция по заранее заданному значению  $\bar{\Delta}$ . Графический материал для Кассегрена I построен аналогично графикам системы «мениск—зеркало». Рис. 6—8 дают значения  $\bar{D}_{max}$  в зависимости от  $V$ , рис. 9—11 — зависимость  $V$  от  $\bar{R}_1$  и рис. 12—14 —

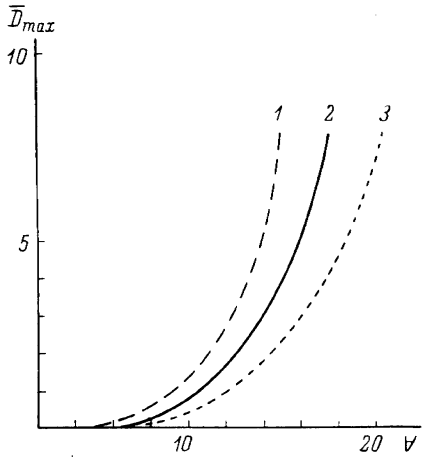


Рис. 8. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta} = 1.0$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

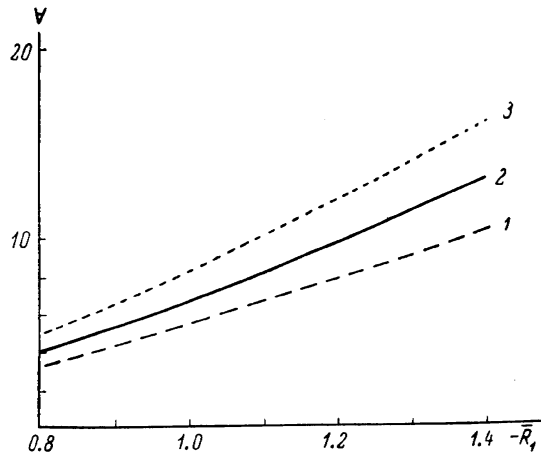


Рис. 9. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta} = 0$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

собственно конструктивные элементы системы (для трех значений  $d_1$  и  $\bar{\Delta}$ ). На рис. 15 представлены значения высот падения луча  $\bar{H}_3$  и  $\bar{H}_4$ , характеризующие размеры главного и вторичного зеркала для трех значений  $d_1$  и для  $\bar{\Delta} = 0.5$ .

Приведем пример пользования рис. 6—15. Предположим, что нам необходимо определить конструктивные элементы системы Кассегрен I при  $D = 500$  мм,  $A = 1 : 15$  и  $\bar{\Delta} = 0.5$ . По рис. 7 определяем, что тре-

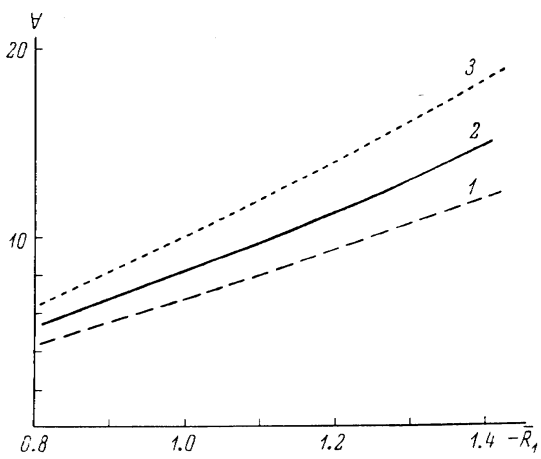


Рис. 10. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta} = 0.5$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

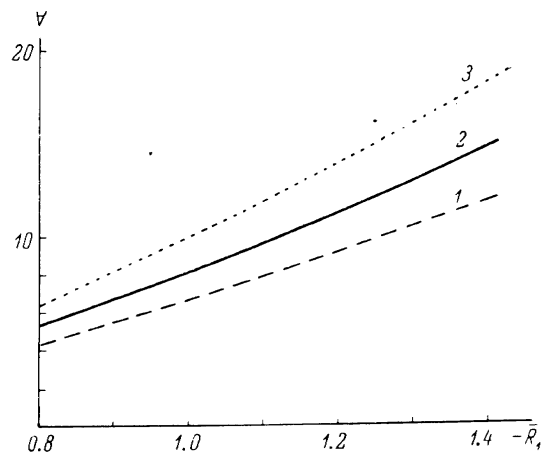


Рис. 11. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta} = 1.0$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

буемый диаметр  $D = 500$  мм при заданном относительном отверстии  $A = 1 : 15$  может быть получен при толщине мениска  $d_1 \geq 0.125$ . Чтобы обеспечить наибольшую точность, остановимся на толщине  $d_1 = 0.1414$  и обратимся к рис. 10, откуда получаем значение  $\bar{R}_1 = -1.425$ . Для найденного значения  $\bar{R}_1$  по рис. 13 и 15 находим остальные конструктивные элементы.

Необходимо отметить, что система «менисковый Кассегрен I» не имеет свободного параметра для исправления комы. В табл. 2 указаны размеры полезного поля зрения, допускаемого комой 3-го порядка. В случае необходимости получения большего поля зрения кому в системе Кассегрен I можно исправить заменой главного сферического зеркала эллипсоидальным. Некоторое усложнение технологии изготовления главного зеркала в данном случае оправдано возможностью сохранить основное преимущество систем Кассегрен I — легкостью изготовления вторичного зеркала (центральная часть второй поверхности мениска просто алюминировается).

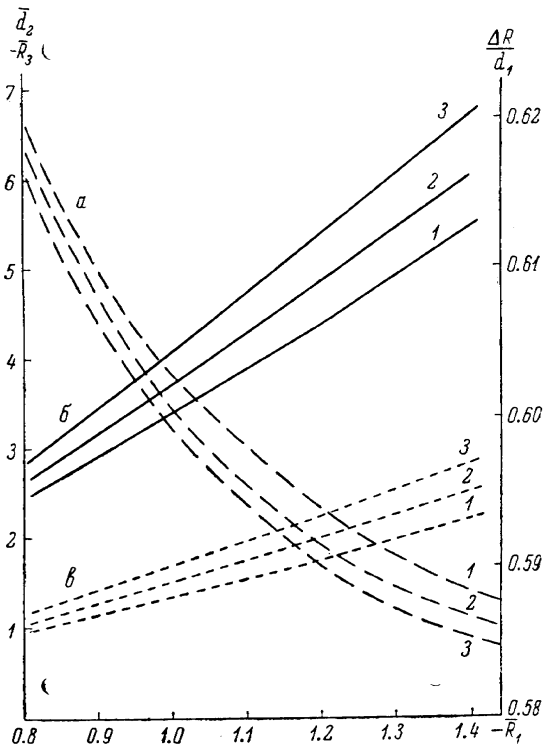


Рис. 12. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=0$ .

$a - \frac{\Delta R}{d_1}$ ;  $b - \bar{R}_3$ ;  $\bar{d}_2$ . 1-3 — то же, что на рис. 3.

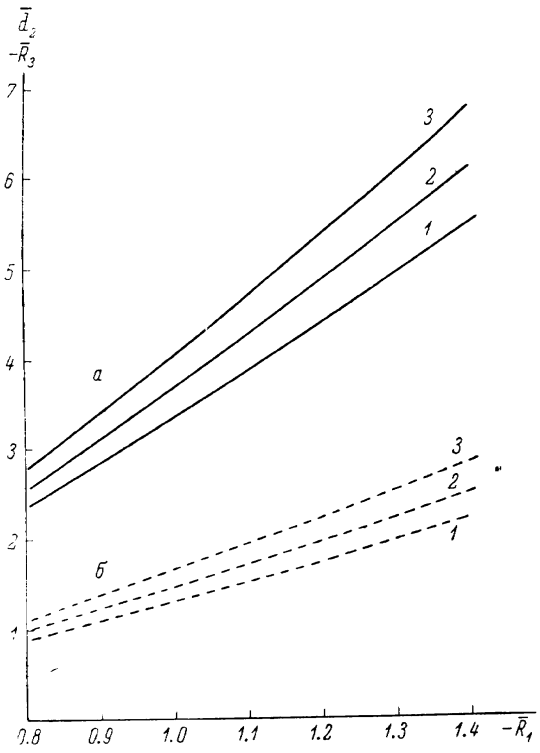


Рис. 13. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=0.5$ .

$a - \bar{R}_3$ ;  $b - \bar{d}_2$ . 1-3 — то же, что на рис. 3.

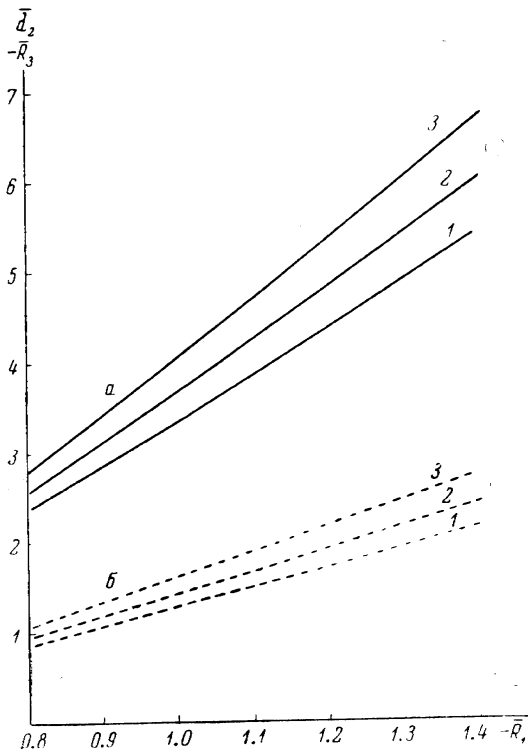


Рис. 14. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=1.0$ .

Обозначения те же, что на рис. 13.

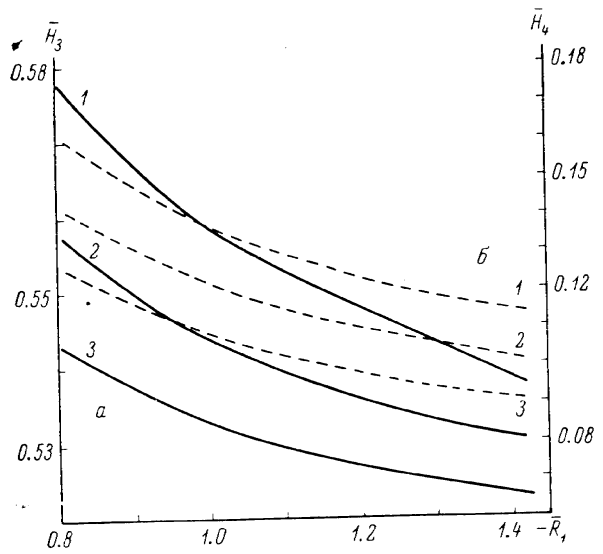


Рис. 15. Система Кассегрен I,  $\bar{\Delta}=0.5$ .

$a - \bar{H}_3$ ;  $b - \bar{H}_4$ . 1-3 — то же, что на рис. 3.



### 3. Кассегрен II

Эта система отличается от системы Кассегрен I тем, что в ней радиус кривизны вторичного зеркала отличается от радиуса кривизны 2-й поверхности мениска ( $\bar{R}_4 \neq \bar{R}_2$ ), что усложняет технологию изготов-

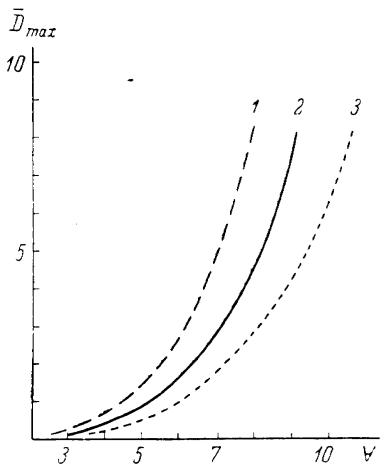


Рис. 16. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta}=0$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

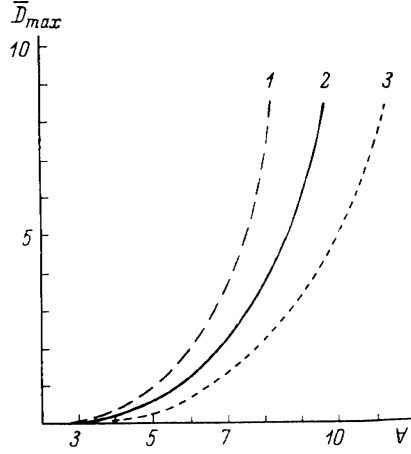


Рис. 17. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta}=0.5$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

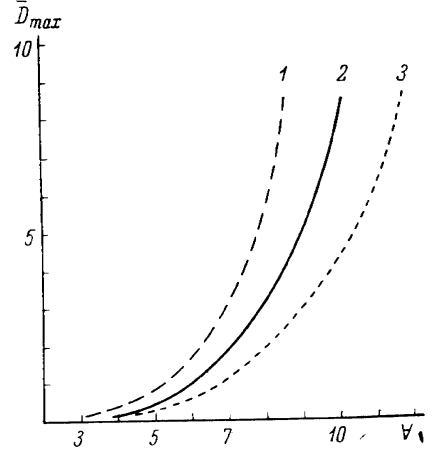


Рис. 18. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta}=1.0$ .  
1—3 — то же, что на рис. 3.

ления мениска, но дает дополнительный свободный параметр для исправления комы 3-го порядка. Результаты расчета для системы Кассегрен II приведены в табл. 3 при тех же обозначениях, что и

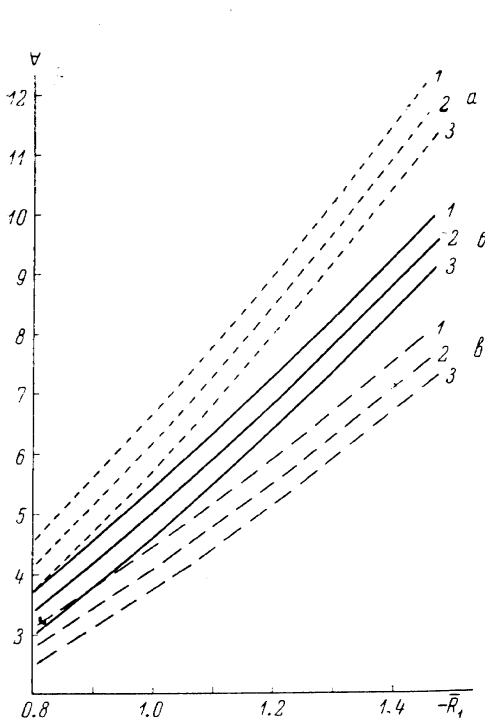


Рис. 19. Система Кассегрен II.  
а —  $\bar{d}_1=0.10$ ; б —  $\bar{d}_1=0.1414$ ; в —  $\bar{d}_1=0.20$ .  
1 —  $\bar{\Delta}=1.0$ ; 2 —  $\bar{\Delta}=0.5$ ; 3 —  $\bar{\Delta}=0$ .

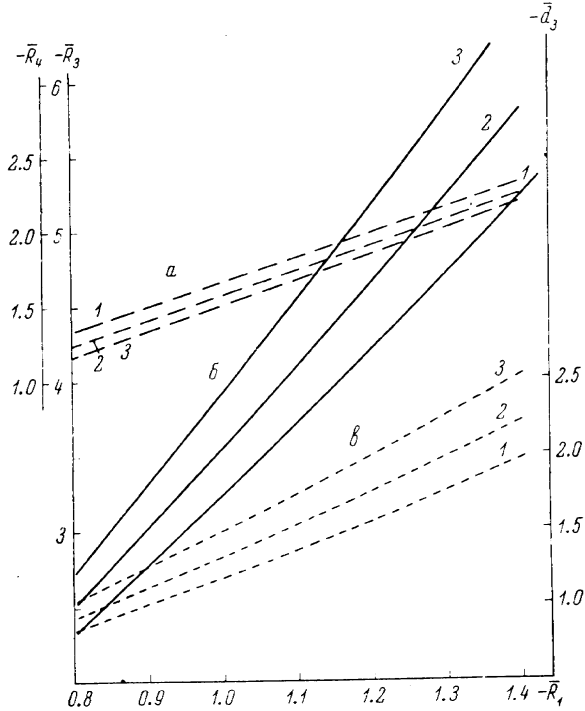


Рис. 20. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta}=0$ .  
а —  $\bar{R}_1$ ; б —  $\bar{R}_3$ ; в —  $\bar{d}_3$ . 1—3 — то же, что на рис. 3.

в табл. 1, 2, и представлены графически на рис. 16—23. Так как в этом случае  $\bar{d}_3 \neq -\bar{d}_2$ , величина  $\bar{d}_3$  была вычислена по формуле

$$\bar{d}_3 = -(\bar{d}_2 + \Delta x), \quad (6)$$

где  $\Delta x = x_4 - x_2$  (при определении стрелок  $x_2$  и  $x_4$  для зоны бралось значение  $\bar{H}_4$ ).

Методика определения конструктивных элементов по графикам аналогична предыдущему случаю.

Анализ числового материала показывает, что величина продольного астигматизма сильно меняет значение с изменением толщины мениска, проходя через ноль при некотором значении  $\bar{d}_1$ . Это изменение

продольного астигматизма, рассмотренного для  $\bar{\Delta} = 0.5$  в табл. 4 и графически представлено на рис. 24 (для  $\bar{\Delta} = 0.5$ ). На рис. 24 для заданных величин  $\bar{R}_1$  можно найти значения  $\bar{d}_1$ , при которых система обладает нулевым астигматизмом ( $\bar{d}_0$ ). Найдя таким образом

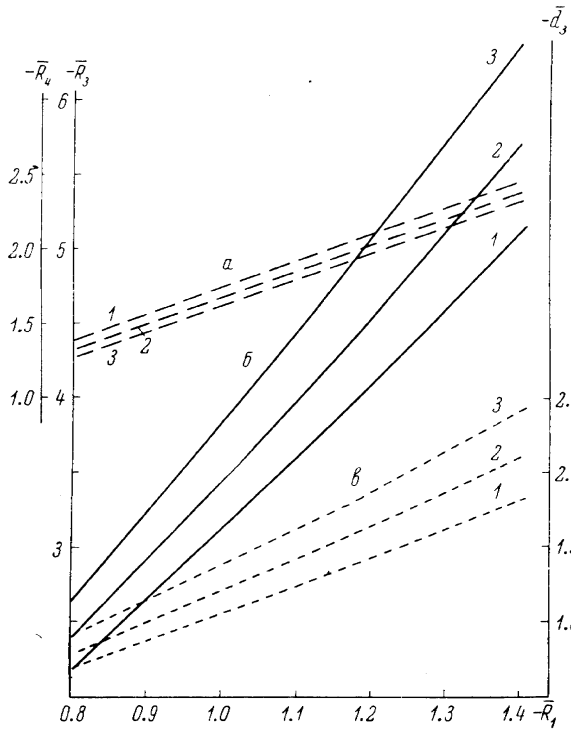


Рис. 21. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta} = 0.5$ .  
Обозначения те же, что на рис. 20.

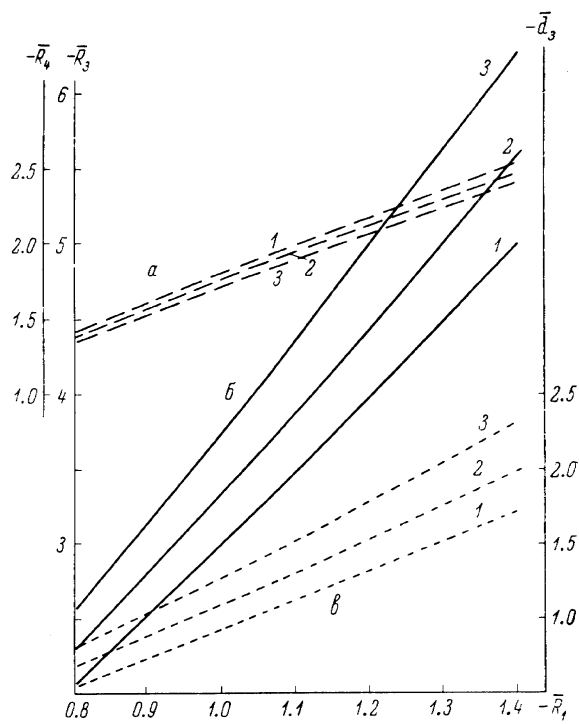


Рис. 22. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta} = 1.0$ .  
Обозначения те же, что на рис. 20.

все точки  $\bar{d}_0$ , можно построить зависимость  $\bar{d}_0$  от  $-\bar{R}_1$  (рис. 25), нанося на том же графике и соответствующие значения  $V$ , которые можно снять на рис. 26. Таким образом, отсюда сразу можно определить,

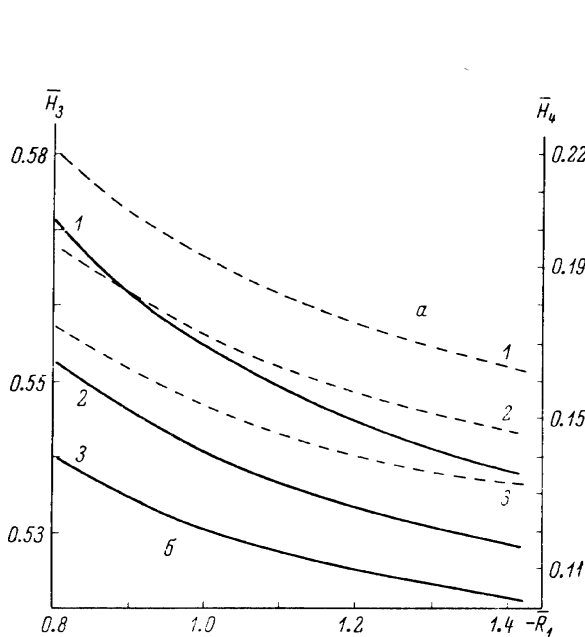


Рис. 23. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta} = 0.5$ .  
 $a - H_4$ ;  $b - H_3$ . 1-3 — то же, что на рис. 3.

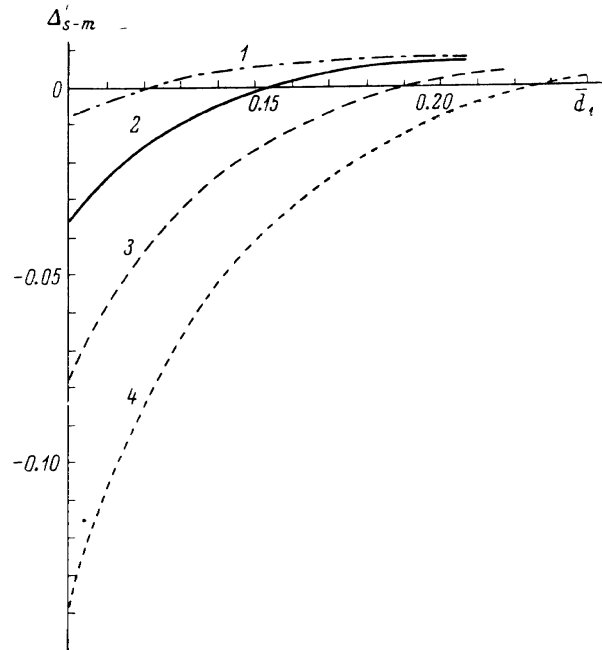


Рис. 24. Система Кассегрен II,  $\bar{\Delta} = 0.5$ .  
1 —  $-\bar{R}_1 = 0.8$ ; 2 —  $-\bar{R}_1 = 1.0$ ; 3 —  $-\bar{R}_1 = 1.2$ ; 4 —  $-\bar{R}_1 = 1.4$ .

какой толщины необходимо взять мениск при заданных значениях  $V$  и  $\bar{R}_1$  для исправления астигматизма. К сожалению, приходится отметить, что границы  $V$ , в пределах которых можно таким путем избавиться от астигматизма, очень узкие, так, при значениях  $V > 6$  сильно растет толщина мениска  $\bar{d}_0$ , что становится невыгодным из-за увеличения поглощения света в мениске.

$$\begin{aligned}
 x'_s &\simeq -2.35, & \Delta'S_{0.707} &\simeq -1.05, \\
 x'_m &\simeq -2.14, & w_{\kappa} &\simeq 1^{\circ}14, \\
 \Delta'_{s-m} &\simeq -0.21 & w_{\kappa p} &\simeq 19'2, \\
 & & w_{act} &\simeq 1^{\circ}56.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

В результате точного тригонометрического расчета для системы (7) получили:

$$\left. \begin{aligned}
 x'_s &= -2.3143, & \Delta S'_H &= -0.1074, & w_{\kappa} &= 1^{\circ}16, \\
 x'_m &= -2.1351, & \Delta S'_{0.707} &= -1.1197, & w_{\kappa p} &= 19'2, \\
 \Delta'_{s-m} &= -0.1792, & & & w_{act} &= 1^{\circ}52.
 \end{aligned} \right\}
 \tag{9}$$

Величины (8) хорошо согласуются с данными тригонометрического расчета (9). Следовательно, точность таблиц и графиков вполне достаточна для определения конструктивных элементов менисковых систем.

Графические методы расчета, описанные в данной статье, далеко не полностью охватывают все многообразие менисковых систем. В частности, совершенно не рассмотрена система «менисковый Грегори», интересная тем, что дает прямое изображение, система «менисковый Шмидт» [1], обладающая исправленным астигматизмом, и другие (это предполагается сделать в дальнейшем). Тем не менее приведенный материал может с успехом быть использован в астрономическом приборостроении при достаточно широком диапазоне изменения параметров проектируемого телескопа.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. Д. Максutow, Тр. ГОИ, т. XVI, вып. 124, 1944. [2] Д. Д. Максutow. Астрономическая оптика ГИТТЛ, 1946. [3] Д. С. Волосов. Методы расчета сложных фотографических систем. Гостехтеоретиздат, 1948. [4] Т. С. Белорossoва, Д. Д. Максutow, Н. В. Мерман и М. А. Соснина, Тр. 15-й Астрометр. конф. СССР, 1963. [5] Пань Цзюнь-хуа. Вторичные зеркала телескопов и оптические схемы для контроля их поверхности. Дисс. 1960.

#### COMPUTATIONS OF MENISCUS SYSTEMS

*T. S. Belorossova, D. D. Maksutov, N. V. Merman, M. A. Sosnina*

#### SUMMARY

The methods of determining the constructive elements of the following meniscus systems are described: «meniscus—concave mirror», «Cassegrain I» with aluminized secondary mirror, and «Cassegrain II» with the secondary mirror ground on the 2<sup>d</sup> surface of the meniscus. The determination is made by means of precise computations of 84 systems. The systems are calculated for identical chromatism, spherical aberration and, in case of the «meniscus — mirror» and «Cassegrain II» systems, for coma as well. The results are given in tables and on graphs.

All the computations were made in the scale  $D=1$  ( $D$  is a diameter of the system). The value of  $R_1$  (radius of curvature of the 1<sup>st</sup> surface of the meniscus) was taken for a main parameter, which determines the focal ratio of the system.

The constructive elements of the «meniscus—concave mirror» system can be determined from table 1 and figs 3—5, the «Cassegrain I» system — from table 2 and figs 6—15 and the «Cassegrain II» system — from tables 3—4 and figs 16—26. The methods of using the tables and figures by means of their interpolation and extrapolation are described in the present paper in detail. An example of using the tables and graphs in the form of calculations of the «Cassegrain II» system ( $D=500$  and  $A=1:8$ ) and a high precision of determinations of the constructive elements and aberration is given. In tables 1—3 the values of the field angle admitted by the coma, curvature of the vision field and astigmatism of each system are given. These tables contain also the maximum diameter, at which the wave spherical aberration for a given focal ratio, is within the limits of the Rayleigh criterion. The data of this paper can be used for rapid computations of the well-corrugated meniscus systems.