

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПЛАНЕТНОГО СПЕКТРОГРАФА ТЕЛЕСКОПА БТА

М. В. Лобачев

Рассмотрена оптическая схема спектрографа, исправленная на сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну изображения. Зеркальный объектив камеры, в котором применены две асферические поверхности, построен по внеосевой схеме. Фотографическая пластинка вынесена с оптической оси. Приведены схемы контроля асферических поверхностей при их изготовлении.

An optical system of the spectrograph corrected for the spherical aberration, coma, astigmatism and curvature of the image is considered. A mirror objective in which two aspherical surfaces are used is constructed according to the off-axis scheme. The photographic plate is off the optical axis. The control systems for manufacturing of aspherical surfaces is presented.

I. Для 6-метрового телескопа изготовлен спектрограф, предназначенный для фотографирования спектров планет и других протяженных объектов. Он устанавливается на балконе системы вторичного фокуса телескопа. Основные характеристики спектрографа следующие. Коллиматор: фокусное расстояние 2400 мм, относительное отверстие 1 : 30.74. Диспергирующий узел снабжен тремя дифракционными решетками. Размер заштрихованной области составляет 80×80 мм для решеток 300 штрихов на 1 мм и 1200 штрихов на 1 мм и 150×80 для решетки 600 штрихов на 1 мм. Объектив камеры: фокусное расстояние 646 мм, относительное отверстие 1 : 8.08, линейное поле зрения 154 мм.

Спектральные характеристики приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Число штрихов решетки/мм	Порядок спектра	Спектральный интервал длин волн λ , нм	Обратная линейная дисперсия D , нм/мм	Теоретическая разрешающая способность
300	1	700—1100	5.2	24000
600	3	690—1000	0.8—0.5	144000
600	4	670—690	0.5	192000
1200	1	300—700	1.3	96000

II. Все фокусирующие элементы оптической схемы спектрографа являются зеркальными с применением асферических поверхностей. Оптическая схема спектрографа показана на рис. 1.

Свет от планеты падает на главное зеркало телескопа и системой, имеющей относительное отверстие 1 : 30.74, строит ее изображение на входной щели 1.

Далее плоское зеркало направляет пучок света на внеосевое параболическое зеркало 2, которое посылает параллельный пучок на одну из дифракционных решеток. Набор решеток и условия их работы даны в табл. 1.

После дифракции на решетке свет направляется на объектив камеры 4, 5, который строит изображение спектральных линий в фокальной плоскости. 6 Входная щель 1, плоское зеркало, внеосевое параболическое зеркало 2 и дифракционная решетка 3 лежат в меридиональной плоскости спектрографа. Оптическая ось объектива камеры 00 вынесена из этой плоскости и находится к ней под углом $6^{\circ}42'$.

Входной коллиматор построен по схеме внеосевого параболического зеркала. Внеосевой угол равен $7^{\circ}30'$. Входная щель имеет прямые ножи

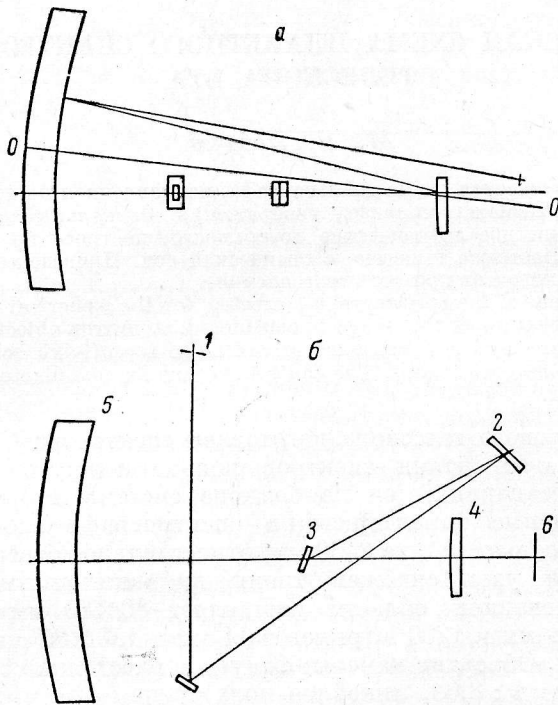


Рис. 1. Оптическая схема планетного спектрографа.

a — сагитальное; *b* — меридиональное сечение; 1 — входная щель; 2 — коллиматор; 3 — дифракционная решетка; 4 — первое, выпуклое, зеркало; 5 — второе, вогнутое, зеркало; 6 — фокальная плоскость; 00 — оптическая ось объектива.

размером 50 мм. У входной щели установлена линза, проектирующая входной зрачок спектрографа на дифракционную решетку.

Величины максимальных изображений планет на входной щели спектрографа составляют: Венера 45, Юпитер 41, Сатурн 27, Марс 23 мм.

Для наблюдения изображения планеты на входной щели предусмотрена система визуального гида, работающая в пучке, отраженном от щечек щели, щечки щели наклонены на 10° .

Объектив камеры построен по зеркальной схеме и состоит из двух асферических зеркал. Конструкция из двух зеркал дает возможность построить спектрограф, исправленный на сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну изображения.

При aberrационном расчете свободными параметрами, которые влияют на aberrации, служат: соотношение оптических сил зеркал, воздушный промежуток, коэффициенты деформаций поверхностей зеркал. Соотношение оптических сил определяет кривизну изображения. Воздушный промежу-

ток служит параметром для исправления астигматизма (при совместном решении уравнения оптической силы всей системы).

Для исправления сферической aberrации и комы решается система из двух уравнений с двумя неизвестными. При этом определяются коэффициенты деформации поверхностей: l_1^2 и l_2^2 .

После решения этих уравнений имеем следующие значения конструктивных элементов при фокусном расстоянии, равном 1:

$$r_{01} = r_{02} = 2\sqrt{2}, \quad d = -2, \quad l_1^2 = -5.82869, \quad l_2^2 = -0.171572.$$

После расчета радиусов при реальном фокусном расстоянии $f' = 640$ мм и после оптимизации системы получаем конструктивные элементы объектива:

$$\begin{aligned} r_{01} &= 1813.875 & l_1^2 &= -5.895195 & d &= -1264.65 & n_1 &= 1 \\ r_{02} &= 1807.817 & l_2^2 &= -0.1764 & & & n_2 &= -1 \\ s_F &= 1548.43 & & & & & n_3 &= 1 \\ f_K &= 646.09 & & & & & & \end{aligned}$$

s'_K — расстояние от второго зеркала до фокальной плоскости объектива.

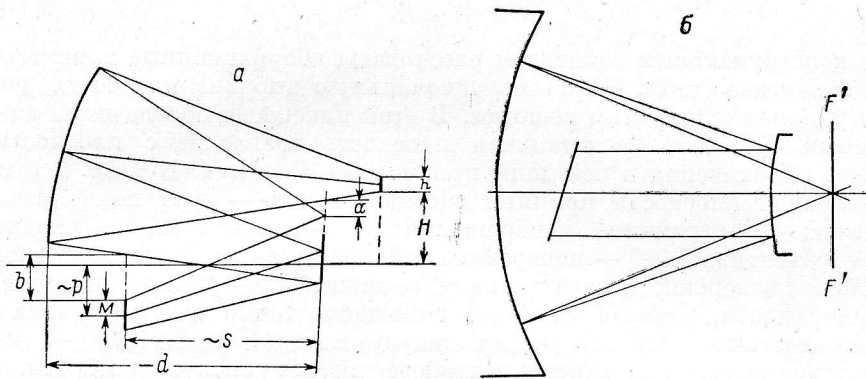


Рис. 2. Оптическая схема объектива спектрографа.

a — сечение вдоль штрихов дифракционной решетки; *б* — перпендикулярно к штрихам дифракционной решетки.

При полученных значениях радиусов и воздушного промежутка схема объектива камеры при осесимметричном ее оформлении не осуществима.

Для устранения этого недостатка схема спектрографа, так же как и схема камерного объектива, строится с ходом лучей, идущим по одну сторону относительно оптической оси.

На рис. 2, *a* изображено сагиттальное сечение объектива спектрографа. Объектив имеет единую оптическую ось, на которой расположены оба зеркала. Дифракционная решетка смещена с оптической оси в сторону, обратную внеосевому положению пучка в камере. Она помещена во входной зрачок объектива. Пучок, отраженный от дифракционной решетки, падает на первое выпуклое зеркало объектива. После отражения от него пучок света проходит над дифракционной решеткой и падает на второе, вогнутое, зеркало. После отражения от второго зеркала пучок проходит над дифракционной решеткой и над первым зеркалом. Фокальная плоскость перпендикулярна к оптической оси объектива. Главный луч в пространстве изображений идет под углом к оптической оси объектива, и, следовательно, фокальная плоскость несколько наклонена к главному лучу. Главный луч выполняет роль осевого луча.

На рис. 2, *б* изображено меридиональное сечение объектива спектрографа. Меридиональное сечение совпадает с плоскостью дисперсии дифракционной решетки.

Для габаритного расчета объектива в сагиттальном сечении введем следующие обозначения, показанные на рис. 2, a : p — величина смещения центра дифракционной решетки от оптической оси; M — половина размера входного зрачка в сагиттальном сечении; s — расстояние от первой поверхности до входного зрачка; h — высота спектра; a — высота прохождения нижнего наклонного луча, ближайшего к оптической оси объектива, над световым размером первого зеркала; W_{\min} — угол между лучом и оптической осью в пространстве дифракционной решетки, соответствующий минимальному значению поля; H — величина поля зрения, которое определяется его внеосевым положением; b — высота прохождения нижнего наклонного луча, ближайшего к оптической оси объектива, после отражения от первого зеркала над дифракционной решеткой. Значения W_{\min} , p и H определяются из выражений:

$$W_{\min} = - \frac{2M - 0.8284 \frac{f'_k}{s} (2M + b) + a - \frac{sh}{f'_k}}{2.8284 f'_k}; \quad (1)$$

$$p = \frac{shr_{01}^2 - [(2M + a)r_{01}^2 + 2d(r_{01} + 2d)(sW_{\min} - M) - 2dr_{01}(r_{01} + d)W_{\min}] f'_k}{2d(r_{01} + 2d)f'_k}; \quad (2)$$

$$H = W_{\min} f'_k. \quad (3)$$

По конструктивным элементам рассчитаны аберрационные характеристики объектива (табл. 2). За меридиональную выбрана плоскость, перпендикулярная к штрихам решетки. В этой плоскости обозначения даны строчными буквами. Сагиттальная плоскость совпадает с плоскостью чертежа. Обозначения в ней даны прописными буквами. В табл. 2 в меридиональной плоскости приняты обозначения: w — угол поля зрения объектива; l' — величина изображения; m — координата на входном зрачке объектива; $\delta g'$ — поперечная аберрация, направленная вдоль плоскости дисперсии; в сагиттальном сечении: W — угол поля зрения; h' — координата, характеризующая положение точки над меридиональной плоскостью, соответствующая центру входной щели; $\Delta h'$ — изменение координаты h' , характеризующее высоту спектральных линий (величина $\Delta h' = 0$ соответствует центру изображения входной щели); $\delta G'$ — поперечная аберрация, направленная вдоль спектральной линии.

В табл. 3—5 приведены аберрационные характеристики спектрографа с учетом высоты щели. Они характеризуют форму спектральных линий. Спектрограф оснащен устройствами, обеспечивающими: 1) впечатывание спектров сравнения и калибровки, 2) наблюдение за расположением планеты на входной щели, 3) вращение изображения планеты вокруг оптической оси.

Система впечатывания спектра сравнения. При получении спектра сравнения источником света служит лампа ЛПК-Ж, проектируемая на дифракционную решетку. В качестве проектирующей системы применяется одиночная линза. Линза может перемещаться вдоль оптической оси, что дает возможность ее фокусировать в зависимости от спектрального интервала.

В табл. 6 приведены величины перемещения конденсорной линзы в зависимости от длины волны. Нулевое положение соответствует длине волны $\lambda = 302$ нм. В таблице приняты обозначения: Δ — положение линзы относительно $\lambda = 302$ нм; β — масштаб изображения источника света при его проекции на дифракционную решетку.

В системе спектра сравнения имеется призмный блок, который дает возможность установить призмы на любом расстоянии от оптической оси. Оптическая система спектра сравнения обеспечивает полное заполнение входного зрачка спектрографа в том случае, если источник света имеет размер не менее 8 мм. Увеличение, с которым источник света изображается на дифракционную решетку, равно $10\times$, что обеспечивает полное заполнение апертуры коллиматора.

ТАБЛИЦА 2

m	w = -0.001, l' = -0.6466		w = -0.0845, l' = -55.661		w = -0.12, l' = -77.026	
	$\delta g'$	$\delta G'$	$\delta g'$	$\delta G'$	$\delta g'$	$\delta G'$
	M		W = -0.1273, h' = 81.653		W = -0.1273, h' = 81.061	
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	0.000	-0.006	0.000	-0.003	-0.004	0.000
0	-0.001	-0.005	0.000	-0.003	-0.002	-0.001
28.28	-0.001	-0.004	-0.002	-0.003	-0.002	-0.003
20.00	-0.002	-0.004	-0.001	-0.002	-0.001	-0.002
40.00	-0.002	0.000	-0.005	0.003	0.005	0.001
28.28	-0.001	0.000	-0.003	0.002	-0.003	0.001
28.28	-0.001	0.006	-0.006	0.008	-0.005	0.008
20.00	0.000	0.004	-0.004	0.006	-0.003	0.005
0	0.000	0.008	-0.003	0.008	-0.003	0.007
0	0.000	0.006	-0.002	0.006	-0.001	0.005
28.28	0.002	-0.004	-0.002	0.002	-0.005	0.003
-20.00	0.001	0.000	0.000	0.002	-0.002	0.002
-40.00	0.002	0.000	-0.003	0.000	-0.012	0.003
-28.28	0.002	0.000	-0.001	0.000	-0.006	0.001
-28.28	0.001	-0.004	-0.003	-0.001	-0.011	0.005
-20.00	0.001	-0.004	0.000	-0.002	-0.005	0.001

ТАБЛИЦА 3

Решетка 300 штрихов на 1 мм, работающая в I порядке

λ	h'	l'	$\lambda = 800$		$\lambda = 900$		$\lambda = 1000$		$\lambda = 1100$	
			$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$
700	75.762	20.597	5.521	-0.022	5.520	-0.021	5.520	-0.027	5.520	-0.023
75.762	20.597	20.597	2.780	-0.006	2.780	-0.006	2.780	-0.007	2.780	-0.007
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.695	-0.003	-0.015	-2.696	-0.003	-2.696	-0.004	-2.696	-0.004	-2.696	-0.004
-5.433	-0.015	-0.015	-5.433	-0.016	-5.433	-0.017	-5.433	-0.018	-5.433	-0.018

ТАБЛИЦА 4
Решетка 600 штрихов на 1 мм, работающая в III порядке

$\lambda = 727$ $h' = 74.890$ $l' = +77.245$		$\lambda = 765$ $h' = 75.441$ $l' = -0.006$		$\lambda = 796.26$ $h' = 74.889$ $l' = -77.349$		$\lambda = 818.6$ $h' = 74.886$ $l' = 77.825$		$\lambda = 850$ $h' = 75.441$ $l' = -0.009$		$\lambda = 874.07$ $h' = 74.889$ $l' = -77.317$	
$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$
5.605	-0.073	5.604	-0.086	5.602	-0.106	5.605	-0.092	5.604	-0.114	5.601	-0.154
2.825	-0.019	2.825	-0.022	2.825	-0.027	2.826	-0.024	2.825	-0.029	2.825	-0.039
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-2.741	-0.017	-2.741	-0.021	-2.742	-0.026	-2.741	-0.021	-2.741	-0.027	-2.742	-0.038
-5.528	-0.069	-5.529	-0.083	-5.531	-0.105	-5.527	-0.087	-5.529	-0.111	-5.531	-0.152

ТАБЛИЦА 5
Решетка 1200 штрихов на 1 мм, работающая в I порядке

$\lambda = 308$ $h' = 74.879$ $l' = 78.119$		$\lambda = 400$ $h' = 75.441$ $l' = -0.061$		$\lambda = 485$ $h' = 74.895$ $l' = -77.025$		$\lambda = 515$ $h' = 74.888$ $l' = 77.440$		$\lambda = 600$ $h' = 75.441$ $l' = -0.001$		$\lambda = 677.65$ $h' = 74.894$ $l' = -76.998$	
$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$	$\Delta h'$	$\delta g'$
5.603	-0.027	5.603	-0.028	5.601	-0.028	5.604	-0.035	5.603	-0.037	5.603	-0.039
2.824	-0.007	2.825	-0.007	2.823	-0.007	2.825	-0.009	2.825	-0.009	2.825	-0.010
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-2.707	-0.005	-2.708	-0.006	-2.709	-0.008	-2.706	-0.007	-2.707	-0.009	-2.707	-0.010
-5.529	-0.024	-5.529	-0.027	-5.531	-0.030	-5.528	-0.032	-5.529	-0.036	-5.529	-0.040

ТАБЛИЦА 6

λ	Δ	β
302	0	10.4
365	6.4	10.1
404	9.0	10.0
436	10.6	9.9
486	12.5	9.8
546	14.2	9.8
589	15.1	9.8
656	16.2	9.7
852	18.6	9.7
1013	19.7	9.6

ТАБЛИЦА 7

λ	Δ	β
302	0	2.49
365	12.3	2.39
404	17.3	2.36
436	20.4	2.34
486	24.1	2.32
546	27.3	2.31
589	29.1	2.30
656	31.3	2.29
852	35.5	2.26
1013	38.0	2.25

Система впечатывания спектра калибровки. Для получения спектра калибровки служит отдельная система, встроенная в спектрограф. Свет в спектрограф вводится в пространстве между дифракционной решеткой и коллиматорным зеркалом. Зеркало, вводящее свет в схему спектрографа, расположено в центральной теневой зоне, образованной вторичным зеркалом телескопа. Устройство впечатывания спектра калибровки снабжено вспомогательной спектральной щелью, оптически сопряженной с основной спектральной щелью. Перед этой щелью на расстоянии 2 мм установлен ступенчатый ослабитель [2].

Источник света — лампа накаливания К-12—30 проектируется на дифракционную решетку. Масштаб изображения $2.3\times$.

Перед вспомогательной щелью установлен конденсор, который может перемещаться вдоль оптической оси, обеспечивая резкое изображение источника на дифракционной решетке. Спектр калибровки может быть сфотографирован на пластинке в любом месте относительно основного спектра и спектра сравнения. В табл. 7 приведена величина перемещения конденсора, необходимая для получения резкого изображения источника света на дифракционной решетке.

Система вращения изображения планеты вокруг оптической оси. Эта система является съемной и может быть установлена в ходе светового пучка перед входной щелью спектрографа. Она состоит из трехзеркального агрегата, имеющего возможность поворачиваться вокруг оптической оси.

Система визуального гида. С помощью визуального гида представляется возможным наблюдать за расположением планеты на щечках входной щели. Он состоит из оборачивающей системы, работающей при увеличении -1 , и набора окуляров. В табл. 8 приведены основные характеристики системы при работе с разными окулярами. Обозначения: $f'_{ок}$ — фокусное расстояние окуляра; l — величина изображения участка неба на входной щели спектрографа; $\varnothing_{зр}$ — диаметр выходного зрачка; Γ — видимое увеличение изображения планеты.

ТАБЛИЦА 8

$f'_{ок}$, мм	$2l$, мм	Γ	$\varnothing_{зр}$, мм	z , сек.
10	7	25	0.3	6.3
20	15.6	12.5	0.6	14.1
40	31.6	6.3	1.3	28.6
80	47	3.1	2.6	42.5

III. Двухзеркальная система, исправленная на все aberrации, имеет асферические поверхности второго порядка. При изготовлении и при контроле этих поверхностей можно использовать теневой метод с применением компенсаторов aberrаций.

Рассмотрим схемы, сводящие нормали к поверхности в одну точку.

Схема контроля первого, выпуклого, зеркала, конструктивные элементы которого: $r_{01}=1813.875$; $l_1^2=-5.895195$, показана на рис. 3, а. Контроль этой поверхности осуществляется с тыльной стороны детали. Вторая поверхность детали плоская. Вблизи исследуемой детали помещается отрицательная линза, создающая параллельный пучок и компенсирующая несхождение нормалей испытываемой поверхности.

Отрицательная линза может быть изготовлена в виде двояковогнутой детали, имеющей одинаковые радиусы кривизны.

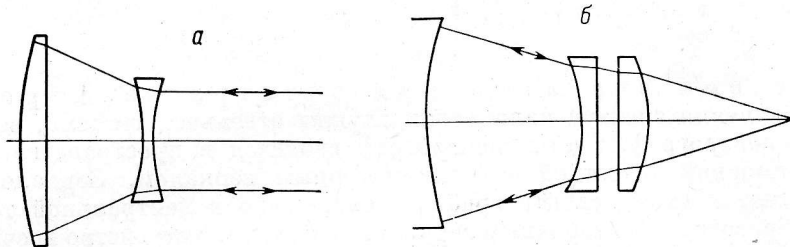


Рис. 3. Оптические схемы установок, применяемых при контроле поверхности первого, выпуклого, зеркала объектива (а) и второго, вогнутого, зеркала (б).

Введем обозначения: m — высота крайнего луча на отрицательной линзе; f' — фокусное расстояние линзы; ν — величина, обратная показателю преломления; $\delta s'_k$ — сферическая aberrация компенсирующей отрицательной линзы. Значение $\delta s'_k$ определится из выражения

$$\delta s'_k = - \frac{m^2 [4(1-\nu) + (2\nu-1)\nu^2]}{8f'(1-\nu)^2}. \quad (4)$$

Введем обозначения: x — стрелка на исследуемой поверхности, рассчитанная по световому диаметру; n_1 — показатель преломления материала, из которого изготовлена деталь; u — апертурный угол луча, распространяющегося по нормали к асферической поверхности. Апертурный угол рассматривается в пространстве между отрицательной линзой и испытываемой деталью; s — расстояние от испытываемой детали до точки пересечения апертурным лучом оптической оси; $\delta s'_g$ — сферическая aberrация, вызываемая несхождением нормалей в одну точку. Тогда

$$\delta s'_g = \frac{xl_1^2}{n_1} + \frac{u^2s(n_1^2-1)}{2n_1^2}. \quad (5)$$

Для выполнения условия исправления сферической aberrации необходимо приравнять выражения (4), (5) и определить m и f' .

После решения этих выражений и оптимизации системы были получены конструктивные элементы схемы:

$r_{01} = 1813.015$	$d_1 = 25$	$n_1 = 1.46014$, стекло кварцевое
$r_2 = \infty$	$d_2 = 105.524$	$n_2 = 1.0$
$r_3 = -1028$	$d_3 = 15$	$n_3 = 1.46014$, стекло кварцевое
$r_4 = 1028$		$n_4 = 1.0$
$l_1^2 = -5.895195$		

Эта система рассчитана из условия, что светящаяся точка и ее изображение находятся в бесконечности.

Схема контроля вторичного, вогнутого, зеркала, конструктивные элементы которого: $r_{02}=1807.817$; $l_2^2=-0.1764$, показана на рис. 3, б.

Контроль этого зеркала осуществляется из центра кривизны. В качестве компенсатора aberrаций используется менисковая линза.

Расстояние между центром кривизны нулевой зоны и точкой пересечения луча от крайней зоны с оптической осью $-\delta s'_g$ может быть определено из выражения $\delta s'_g = x l_2^2$.

При диаметре зеркала 920 мм стрелка по световому диаметру составляет 59.688 мм. Тогда $\delta s'_g = -10.529$.

Отрицательное значение сферической aberrации можно скомпенсировать менисковой линзой диаметром 440 мм. Для удобства она изготавливается из двух линз: плоско-вогнутой и плоско-выпуклой.

Конструктивные элементы этой системы таковы:

$$\begin{array}{lll} r_{01} = 1807.817 & d_1 = 959.4 & n_1 = 1 \\ r_2 = -1047.1 & d_2 = 44 & n_2 = 1.51956 \text{ К-8} \\ r_3 = \infty & d_3 = 62.93 & n_3 = 1 \\ r_4 = \infty & d_4 = 50 & n_4 = 1.51952 \text{ К-8} \\ r_5 = -997.7 & & n_5 = 1 \\ & l_1^2 = -0.1764 & \\ s_1 = s'_1 = 789.43 & & \end{array}$$

Остаточная сферическая aberrация, выраженная в линейной $\delta s'$ и в волновой l/λ мерах, приведена в табл. 9. Расчет дан по ходу света от светящейся точки к ее изображению.

ТАБЛИЦА 9

smu	$\delta s'$	l/λ	smu	$\delta s'$	l/λ
0.048	-0.006	-0.045	0.193	0.013	-0.255
0.096	-0.017	-0.068	0.217	0.020	0.098
0.145	-0.013	-0.219	0.241	-0.003	0.000
0.169	-0.001	-0.309			

Список литературы

1. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Изд. 2-е. Л., «Машиностроение», 1969. 670 с.
2. Гусев О. Н., Аксельдор С. С., Васильев А. С., Лобачев М. В. Звездный спектрограф. Авт. свидетельство № 305369. — Бюл. изобрет. и отк., 1971, № 18.