

---

УДК 535.31; 681.7.

**В. М. Тягур, Н. И. Лихолит**

Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал», Киев

## **ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ АНАСТИГМАТИЧЕСКИЙ КВАЗИОРТОСКОПИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ С ВНЕОСЕВЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ**

---

*Исследуются конструктивные особенности трехзеркального анастигматического объектива с внеосевым полем зрения без экранирования с исправленной дисторсией, приведены формулы для вычисления радиусов зеркал при заданных фокусном расстоянии объектива и расстоянии между зеркалами, показаны зависимости конических постоянных зеркал, заднего отрезка и диафрагменного числа объектива от расстояний между зеркалами.*

**Ключевые слова:** *трехзеркальный анастигматический объектив, исправленная дисторсия, радиусы зеркал, расстояния между зеркалами.*

---

### **ВСТУПЛЕНИЕ**

Основным элементом любой оптико-электронной системы (ОЭС) является объектив, который создает изображение в фокальной плоскости. От характеристик объектива в большой степени зависит пространственное разрешение и качество изображения всей ОЭС. Поэтому выбор типа объектива, его параметров и непосредственно сама разработка объектива представляют собой важный шаг при создании новой ОЭС. Обзору различных оптических схем и вопросу выбора оптической схемы объектива в зависимости от необходимого пространственного разрешения и назначения были посвящены работы [2, 3, 9, 10]. Большое внимание уделено зеркальным объективам, которые обладают рядом преимуществ: возможностью работы в широком спектральном диапазоне; возможностью создания длиннофокусных систем с небольшими габаритами, небольшой массой за счет небольшого количества оптических элементов и применения облег-

ченной конструкции зеркал. Среди зеркальных объективов особое место занимают трехзеркальные объективы без экранирования с внеосевым шелевым полем зрения, которые получили свое значительное развитие в последние годы. Основным преимуществом этих объективов по сравнению с классическими осесимметричными зеркальными системами с центральным экранированием является значительное повышение значений модуляционной передаточной функции (МПФ), особенно на средних пространственных частотах [1]. Есть достаточно много запатентованных схем трехзеркальных объективов без экранирования [4—6, 11—17]. Они различаются между собой положением апертурной диафрагмы, наличием промежуточного изображения, типом поверхности вторичного и третичного зеркала.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Развитие современных оптико-электронных приборов идет в направлении увеличения пространственного разрешения, что требует увеличения фокусного расстояния объектива. В то же

---

© В. М. ТЯГУР, Н. И. ЛИХОЛИТ, 2015

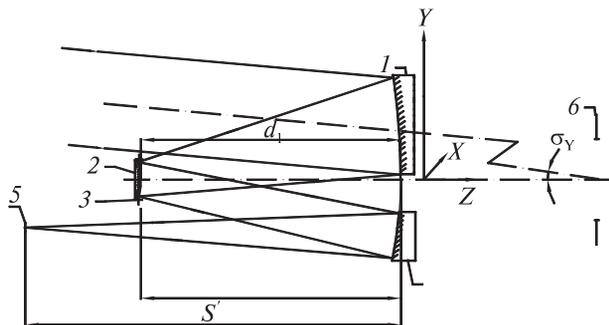


Рис. 1. Оптическая схема трехзеркального объектива без экранирования: 1 — главное зеркало, 2 — вторичное зеркало, 3 — апертурная диафрагма, 4 — третичное зеркало, 5 — фокальная плоскость, 6 — входной зрачок

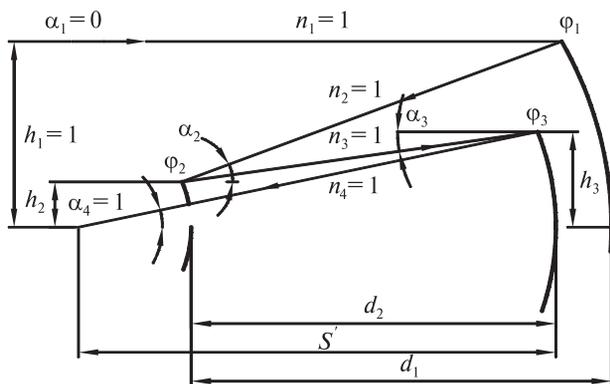


Рис. 2. Ход 1-го параксиального луча в трехзеркальном объективе

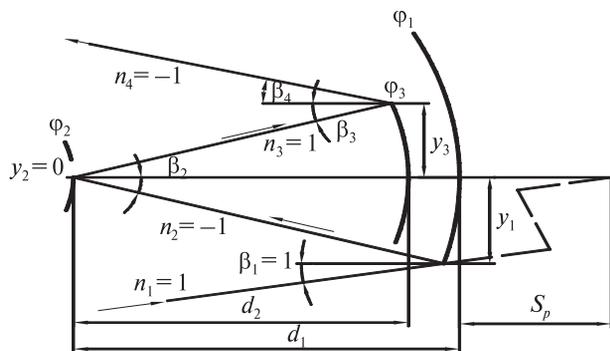


Рис. 3. Ход 2-го параксиального луча в трехзеркальном объективе

время одним из основных требований остается уменьшение веса и габаритов объектива при близком к дифракционному предельное качество изображения в широком поле зрения. Вот почему трехзеркальные объективы без экранирования являются очень перспективными для создания малогабаритных объективов с высокой разрешающей способностью. В объективах с тремя отражениями в принципе могут быть хорошо исправлены все aberrации, кроме дисторсии [4]. Наличие в данных объективах дисторсия, которая может достигать 2 %, вызывает трудности при их использовании в аппаратуре для картографирования. Поэтому целью данной статьи является исследование трехзеркального объектива без экранирования с внеосевым щелевым полем зрения и исправленной дисторсией.

В трехзеркальном объективе для работы используется внеосевое щелевое поле зрения, что позволяет построить оптическую систему без центрального экранирования, которое есть в зеркальных объективах [3]. Как правило, все три зеркала находятся на одной оптической оси, но из-за большого внеосевого поля зрения главное и третичное зеркала работают внеосевыми сегментами (рис. 1). Это означает, что эти зеркала становятся внеосевыми при их изготовлении.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование объектива состояло из двух этапов. На первом этапе проводился габаритный расчет различных вариантов объектива и вычисление коэффициентов aberrаций третьего порядка, исходя из расчета хода первого и второго параксиальных лучей. В качестве исходных задавались: фокусное расстояние объектива  $f'_0$ , нормированное среднее расстояние между главным и вторичным зеркалом и вторичным и третичным зеркалами  $d_{CP} = (|d_1| + d_2)/(2f'_0)$ , отношение расстояний между главным и вторичным зеркалами и вторичным и третичным зеркалами  $b = d_2/|d_1|$ , величина заднего фокального отрезка  $S'$  и отношение высоты первого параксиального луча на вторичном зеркале к высоте на главном зеркале  $g = h_2/h_1$ . Положение апертурной диафрагмы было выбрано на вторичном зеркале.

Для расчета углов падения  $\alpha_i$  первого параксиального луча (рис. 2) используем формулу [8]

$$\alpha_{i+1} = \frac{h_i - h_{i+1}}{d_i}$$

и условия нормировки:  $\alpha_1 = 0$ ,  $h_1 = 1$ ,  $\alpha_4 = 1$ .

При этих условиях нормировки высоты на вторичном и третичном зеркалах будут равны  $h_2 = g$ ,  $h_3 = -S'$ .

Оптические силы зеркал вычислим по формуле [8]:

$$\varphi_i = \frac{\alpha_{i+1} n_{i+1} - \alpha_i n_i}{h_i},$$

а радиусы зеркал будут равны

$$R_i = \frac{f'_0(n_{i+1} - n_i)}{\varphi_i}.$$

Для расчета углов падения  $\beta_i$  и высот на зеркалах  $y_i$  второго параксиального луча (рис. 3) используем формулы

$$\beta_1 = 1, \quad y_1 = -S_p,$$

$$\beta_2 = -(\beta_1 + y_1 \varphi_1), \quad y_2 = 0,$$

$$\beta_3 = -(\beta_2 + y_2 \varphi_2), \quad y_3 = -(y_2 - d_2 \beta_3),$$

где  $S_p = d_1 / (\varphi_1 d_1 - 1)$  — расстояние от главного зеркала до входного зрачка.

Для полученного таким образом объектива рассчитаем параметры  $P_i$  и  $W_i$  сферических зеркал [8]:

$$P_i = \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right)^2 (\alpha_{i+1} + \alpha_i),$$

$$W_i = \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2} \right) (\alpha_{i+1} + \alpha_i).$$

Суммы Зейделя для трехзеркального объектива со сферическими зеркалами будут равны

$$S_{IS} = P_1 + gP_2 - S'P_3,$$

$$S_{IIS} = y_1 P_1 + W_1 + W_2 + y_3 P_3 + W_3,$$

$$S_{IIIS} = y_1^2 P_1 + 2y_1 W_1 - \frac{y_3^2}{S'} P_3 - 2 \frac{y_3}{S'} W_3 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3,$$

$$S_{IVS} = \alpha_2 - \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{g} + \frac{1 + \alpha_3}{S'},$$

$$S_{VVS} = y_1^3 P_1 + 3y_1^2 W_1 + 2y_1 \varphi_1 + \frac{y_3^3}{S'^2} P_3 + 3 \frac{y_3^2}{S'^2} W_3 - 2 \frac{y_3}{S'} \varphi_3.$$

Влияние асферических поверхностей на абберации 3-го порядка могут быть учтены добавлением к коэффициентам 3-го порядка следующих членов, которые зависят от эксцентриситетов асферических поверхностей [8]:

$$\Delta S_{IA_i} = -e_i^2 h_i \frac{(n_{i+1} \alpha_{i+1})^3}{(n_{i+1} - n_i)^2}, \quad \Delta S_{IIA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IA_i},$$

$$\Delta S_{IIIA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IIA_i}, \quad \Delta S_{IVA_i} = \frac{y_i}{h_i} \Delta S_{IIIA_i},$$

где  $e_i^2$  — квадрат эксцентриситета асферической поверхности.

Суммы Зейделя для объектива с асферическими поверхностями определяются по формулам

$$S_I = S_{IS} + \Delta S_{IA_1} + \Delta S_{IA_2} + \Delta S_{IA_3},$$

$$S_{II} = S_{IIS} + \Delta S_{IIA_1} + \Delta S_{IIA_3},$$

$$S_{III} = S_{IIIS} + \Delta S_{IIIA_1} + \Delta S_{IIIA_3},$$

$$S_{IV} = S_{IVS},$$

$$S_V = S_{VVS} + \Delta S_{VA_1} + \Delta S_{VA_3},$$

С помощью трех асферических зеркал можно исправить сферическую абберацию, кому и астигматизм, для чего необходимо, чтобы  $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ . Для выполнения этого условия необходимо, чтобы абберации, вносимые асферическими поверхностями, компенсировали соответствующие абберации трехзеркального объектива со сферическими поверхностями, т. е. выполнялось условие

$$-S_{IS} = \Delta S_{IA_1} + \Delta S_{IA_2} + \Delta S_{IA_3},$$

$$-S_{IIS} = \Delta S_{IIA_1} + \Delta S_{IIA_3},$$

$$-S_{IIIS} = \Delta S_{IIIA_1} + \Delta S_{IIIA_3}.$$

Решив систему уравнений, можно найти значения квадратов эксцентриситетов соответствующих зеркал, при которых в объективе будут исправлены сферическая абберация, кома и астигматизм.

Для заданных значений нормированного среднего расстояния  $d_{CP}$  и отношения расстояний между зеркалами  $b$  определялась величина заднего фокального отрезка  $S'$  и отношение высот  $g$ , при которых в объективе кроме сферической абберации, комы и астигматизма были бы исправлены еще и кривизна поля и дисторсия,

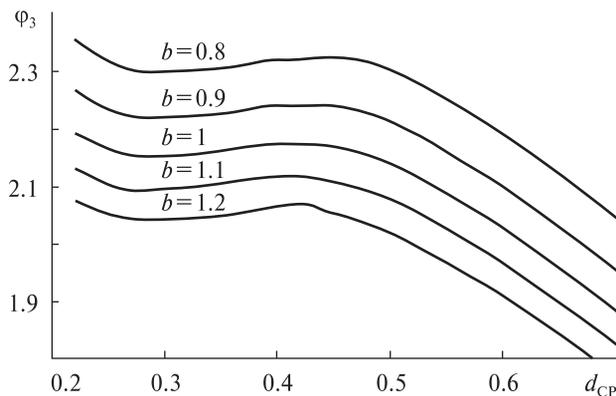


Рис. 4. Оптическая сила третичного зеркала при  $S_1 = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$

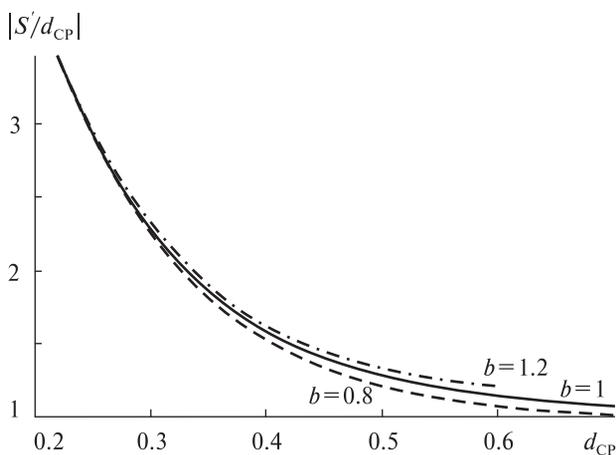


Рис. 5. Величина заднего отрезка при  $S_1 = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$

для чего все суммы Зейделя должны быть равны нулю  $S_1 = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$ .

На втором этапе проводилась окончательная оптимизация конструктивных параметров полученных вариантов объектива при помощи программы ZEMAX. Визирный угол  $\sigma_\gamma$  и диаметр входного зрачка для каждого варианта выбирались из условия отсутствия экранирования входного зрачка вторичным зеркалом и обеспечения близкого к дифракционному пределу качества изображения. Поверхности зеркал описывались уравнением

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \gamma_1 r^2 + \gamma_2 r^4 + \gamma_3 r^6 + \dots + \gamma_6 r^{12},$$

где  $c = 1/R$  — кривизна поверхности зеркала,  $r$  — радиальная координата поверхности,  $k = -e^2$  — коническая постоянная,  $\gamma_i$  — коэффициенты, которые описывают отклонение поверхности от сферы или асферики второго порядка,  $R$  — радиус кривизны поверхности зеркала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных объективов позволил выявить некоторые закономерности значений конструктивных параметров трехзеркального анастигматического квазиортоскопического объектива с внесосевым полем зрения. Ключевую роль в получении такого объектива играют значения оптической силы третичного зеркала  $\phi_3$  и заднего отрезка  $S'$  в зависимости от значений нормированного среднего расстояния  $d_{CP}$ . Приведенную на рис. 4 зависимость оптической силы третичного зеркала  $\phi_3$  от нормированного среднего расстояния между зеркалами  $d_{CP}$  для различных значений  $b$  можно описать формулой [7]

$$\phi_3 = -(0.99 \dots 1.01) \times \frac{2f'_o}{41.9d_{CP}^4 - 81.8d_{CP}^3 + 55.1d_{CP}^2 - 15.45d_{CP} + 3.6 + \frac{0.1^b}{b} + 0.3(1-b)} \quad (1)$$

Для исправления в объективе кривизны поля и дисторсии задний отрезок должен подчиняться зависимости, приведенной на рис. 5, которая может быть описана формулой

$$|S' / d_{CP}| \approx 81d_{CP}^4 - 189.5d_{CP}^3 + 169.3d_{CP}^2 - 69.5d_{CP} + 12.38 - 0.6d_{CP}(1-b). \quad (2)$$

При нормированном среднем расстоянии  $d_{CP} < 0.32$  отношение заднего отрезка к среднему расстоянию между зеркалами  $|S' / d_{CP}| > 2$ , что позволяет с помощью дополнительного плоского зеркала, расположенного вблизи вторичного зеркала, отклонить лучи так, чтобы фокальная плоскость находилась за третичным зеркалом. Это позволяет значительно уменьшить общие габариты объектива.

Очень часто в объективах требуется телецентрический ход в пространстве изображений. Зависимость положения выходного зрачка  $S'_p$  объектива от нормированного среднего расстояния между зеркалами  $d_{CP}$  описывается формулой

$$S'_p \approx -24.5d_{CP}^4 + 61.5d_{CP}^3 - 51.3d_{CP}^2 + 13.6d_{CP} - 0.25^{(2-b)}.$$

В диапазоне значений расстояний между зеркалами  $d_{CP}$  от 0.22 до 0.7 положение выходного зрачка объектива  $S'_p$  будет изменяться от +0.9 до -0.7 диоптрий. Телецентрический ход лучей в пространстве изображений в зависимости от отношения расстояний между зеркалами  $b$  получается в объективе при значениях нормированного среднего расстояния  $0.45 \leq d_{CP} \leq 0.49$ .

Изготовление внеосевых асферических зеркал, их контроль и юстировка трехзеркального объектива с внеосевым полем зрения представляет собой сложную задачу. Поэтому с точки зрения упрощения конструкции интересен вопрос зависимости конической постоянной  $k$  зеркал от выбранных габаритов объектива. Для третичного зеркала при среднем расстоянии между зеркалами  $d_{CP} < 0.29$  зеркало должно быть гиперболическим, при  $0.29 < d_{CP} < 0.42$  — эллиптическим, а при  $d_{CP} > 0.43$  оно приобретает форму сплюснутого сфероида. Для диапазона среднего расстояния между зеркалами  $0.42 < d_{CP} < 0.43$  третичное зеркало становится сферическим [7] (рис. 6), что значительно облегчает изготовление и контроль такого объектива. Коническая постоянная  $k_3$  третичного зеркала изменяется в зависимости от нормированного среднего расстояния между зеркалами по формуле

$$k_3 \approx -82.6d_{CP}^4 + 198.3d_{CP}^3 - 180.5d_{CP}^2 + 74.2d_{CP} - 11.5. \quad (3)$$

Вторичное зеркало также при небольших габаритах объектива при  $d_{CP} < 0.4$  должно быть гиперболическим, при  $0.43 < d_{CP} < 0.55$  — эллиптическим, а при  $d_{CP} > 0.6$  оно приобретает форму сплюснутого сфероида. Сферическим вторичное зеркало может быть при среднем расстоянии между зеркалами  $0.56 < d_{CP} < 0.60$  (рис. 6). Кривая зависимости конической постоянной вторичного зеркала от габаритов может быть достаточно точно описана уравнением

$$k_2 \approx -4.16[1 + 5(b-1)^3]d_{CP}^2 + 10.4d_{CP} - 4.59. \quad (4)$$

Главное зеркало при любых габаритах объектива должно иметь гиперболическую форму. Коническая постоянная главного зеркала (рис. 6)

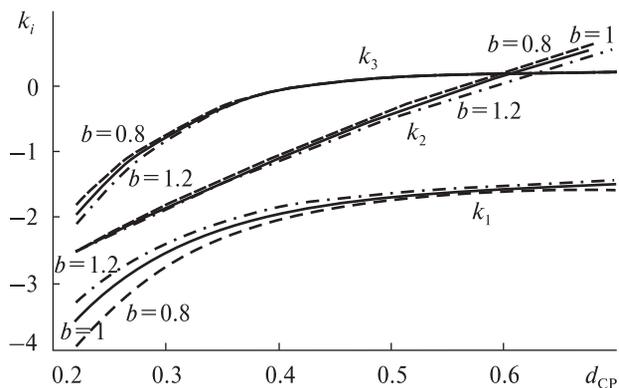


Рис. 6. Величины конических постоянных  $k$  зеркал при  $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$

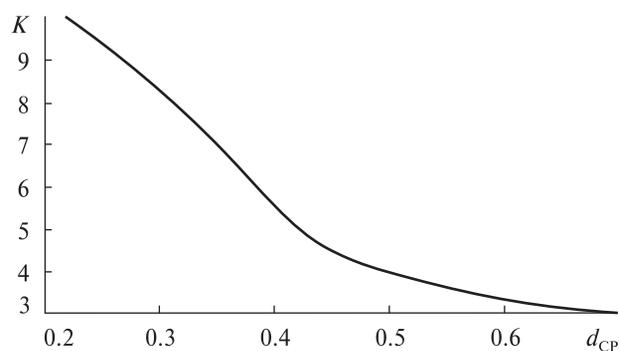


Рис. 7. Светосила объектива

изменяется в зависимости от среднего расстояния между зеркалами по формуле

$$k_1 \approx -76.9d_{CP}^4 + 179.9d_{CP}^3 - 159.3d_{CP}^2 + 64.3d_{CP} - 11.7. \quad (5)$$

При различных средних расстояниях между зеркалами объектив без экранирования с высоким качеством изображения может работать при определенной светосиле. Ориентировочная зависимость светосилы (диафрагменного числа  $\sigma_x$ ) применения асферики высокого порядка, приведена на рис. 7.

Результаты исследования позволяют упростить методику расчета трехзеркального анастигматического квазиортоскопического объектива

с внеосевым полем зрения, так как при выбранных допустимых габаритах  $d_{CP}$  и  $b$  по формулам (1)–(5) можно определить значения конструктивных параметров  $R_3, S', k_1, k_2, k_3$ , при которых будут исправлены аберрации.

В таблице представлены конструктивные параметры вариантов объективов, рассчитанных по предложенной методике, а также конструктивные параметры и качество изображения этих же объективов после небольшой оптимизации. Расстояния между зеркалами  $d_1$  и  $d_2$  в число корригируемых параметров не включались. Коэффициент передачи контраста  $T$  рассчитывался на пространственной частоте  $\nu = 70 \text{ мм}^{-1}$  при длине волны  $\lambda = 0.6328 \text{ мкм}$  для дифракционного изображения  $T_d$  и для реального изображения для нескольких точек поля зрения:  $T_0$  ( $\sigma_Y = 7^\circ, \sigma_X = 0^\circ$ ),  $T_1$  ( $\sigma_Y = 7^\circ, \sigma_X = \pm 2^\circ$ ),  $T_2$  ( $\sigma_Y = 7^\circ, \sigma_X = \pm 3^\circ$ ). Значение дисторсии  $\Delta y'$  приведено для края поля зрения. Её величина не превышает значения дисторсии по всему полю зрения.

Анализ выполненных расчетов показывает, что в трехзеркальном объективе с щелевым внеосевым полем зрения при определенных соотношениях конструктивных параметров можно достаточно хорошо исправить все аберрации в большом диапазоне значений нормированного среднего расстояния между зеркалами  $d_{CP}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные эмпирические формулы для расчета конструктивных параметров достаточно точно создают первоначальную модель трехзеркального объектива с внеосевым полем зрения с исправленными аберрациями, в том числе и с исправленной дисторсией. Дальнейшая оптимизация конструктивных параметров объектива позволяет устранить и аберрации высших порядков. Исследования позволили обнаружить области значений нормированного среднего расстояния между зеркалами  $d_{CP}$ , при которых третичное или вторичное зеркало может быть сферичес-

**Конструктивные параметры вариантов объективов, рассчитанные по методике и после оптимизации**

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
	По методике/после оптимизации			
$f_o, \text{мм}$	600	600	1000	500
$K$	5	5	9	3,5
$d_{CP}$	0.423	0.423	0.275	0.57
$b$	1.0	1.26	0.8	0.9
$R_1, \text{мм}$	-964.5/-965.8	-892.5/-891.4	-1350/-1355.3	-1068/-1069.1
$R_2, \text{мм}$	-352.2/-352.7	-353.4/-353.1	-522.1/-529.8	-327.8/-327.0
$R_3, \text{мм}$	-552.0/-552.6	-588.4/-586.6	-864.0/-870.3	-467.4/-467.9
$d_1, \text{мм}$	-253.8	-224.6	-305.6	-300
$d_2, \text{мм}$	253.8	283.0	244.4	270
$S', \text{мм}$	-378.1/-379.0	-394.8/-392.5	-697.3/-694.9	-327.4/-328.9
$k_1$	-1.85/-1.8544	-1.85/-1.76	-2.763/-3.027	-1.607/-1.6195
$k_2$	-0.935/-0.956	-1.0/-1.0	-2.032/-2.02	0/0
$k_3$	0/0	0/0	-1.04/-1.0	0.204/0.201
$S'_p, \text{дптр}$	0.19/0.28	0.09/0.11	0.81/0.80	-0.33/-0.57
$T_d$	0.71	0.71	0.49	0.79
$T_0$ (мер/суг)	0.65/0.64	0.65/0.64	0.48/0.48	0.74/0.73
$T_1$ (мер/суг)	0.64/0.63	0.64/0.64	0.47/0.47	0.72/0.72
$T_2$ (мер/суг)	0.59/0.60	0.61/0.61	0.44/0.44	0.65/0.67
$\Delta y', \%$	0.004	-0.003	0.003	0.004

ким, что значительно упрощает изготовление и юстировку такого объектива. Получена зависимость светосилы объектива от его габаритов.

1. Грамматин А. П., Сычева А. А. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования // Оптич. журн. — 2010. — 77, № 1. — С. 24—27.
2. Лебедева Г. И., Гарбуль А. А. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы // Оптич. журн. — 1994. — 61, № 8. — С. 57—62.
3. Лысенко А. И., Маламед Е. Р., Сокольский М. Н. и др. Оптические схемы объективов космических телескопов // Оптич. журн. — 2002. — 69, № 9. — С. 21—25.
4. Пат. 2327194 России. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / А. П. Грамматин, Г. М. Грязнов, В. Д. Стариченкова. — Оpubл. 2006.
5. Пат. 82876 России. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / В. А. Данилов, И. Е. Путилов, А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский, А. И. Лысенко, Ю. Н. Петров. — Оpubл. 2008.
6. Пат. 106764 России. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / Г. К. Любанец, О. В. Сежержицкий, Б. Д. Троняк, А. В. Чеботарев, И. В. Черных, Н. А. Черняк. — Оpubл. 2011.
7. Пат. 94303 Украины. Трехзеркальный астигматический квазиортоскопический объектив / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит, И. Е. Гринюк. — Оpubл. 2011.
8. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1969. — 672 с.
9. Токарев А. А. Объективы с дифракционным уровнем разрешения для аппаратуры дистанционного зондирования // Междунар. Акад. Контентант. — 2001. — Июль. — С. 13—17.
10. Тягур В. М., Лихолит М. И., Колобродов В. Г. Оптичні системи космічних багатоспектральних сканерів // Наук. вісті НТТУ «КПІ». — 2006. — № 6. — С. 125—132.
11. Пат. 4240797 USA. All-reflective three element objective / W. B. Wetherell, D. A. Womble. — Publ. 1980.
12. Пат. 4265510 USA. Three mirror anastigmatic optical system / L. G. Cook. — Publ. 1981.
13. Пат. 4733955 USA. Reflective optical triplet having a real entrance pupil / L. G. Cook. — Publ. 1988.
14. Пат. 4834517 USA. Method and apparatus for receiving optical signals / L. G. Cook. — Publ. 1989.
15. Пат. 7209285 USA. Common axis three mirror anastigmatic optic / G. C. Vanstone, J. A. Carter, D. J. Stoppenbach. — Publ. 2007.
16. Пат. 10274740 Jap. Catoptric system / M. Mitsumasa, O. Hisahiro, O. Toshihiro, S. Hironobu. — Publ. 1998.
17. Пат. 1846792 Eur. Three mirror anastigmatic telescope / N. Aharon. — Publ. 2006.

Стаття надійшла до редакції 27.01.15

В. М. Тягур, М. І. Лихолит

Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

### ТРЬОХДЗЕРКАЛЬНИЙ АНАСТИГМАТИЧНИЙ КВАЗИОРТОСКОПІЧНИЙ ОБ'ЄКТИВ ІЗ ПОЗАОСЬОВИМ ПОЛЕМ ЗОРУ

Досліджуються конструктивні особливості трьохзеркального астигматичного об'єктива із позаосьовим полем зору без екранування з виправленою дисторсією, наведені формули для обчислення радіусів дзеркал при заданих фокусній відстані об'єктива й відстані між дзеркалами, показані залежності конічних сталих дзеркал, заднього відрізка й діафрагмового числа об'єктива від відстаней між дзеркалами.

**Ключові слова:** трьохзеркальний астигматичний об'єктив, виправлена дисторсія, радіуси дзеркал, відстані між дзеркалами.

V. M. Tiagur, N. I. Lykholit

“Arsenal” Special Device Production State Enterprise, Kyiv

### THREE-MIRROR ANASTIGMATIC QUASI-ORTHO SCOPIC LENS WITH THE OFF-AXIS FIELD OF VIEW

We present the results of the research of design features of three-mirror anastigmatic lens with the off-axis field of view without shielding with corrected distortion. Formulas for calculating the radii of mirrors for specified values of lens focal length and distance between mirrors are given, and the dependence of conic constants of mirrors and lens focal number on distances between mirrors is demonstrated.

**Key words:** three-mirror anastigmatic lens, corrected distortion, radiuses of mirrors, distances between mirrors.