

РАСЧЕТ СВЕТОЗАЩИТНЫХ БЛЕНД В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ “ЗЕРКАЛЬНЫЙ РАЙТ” С МАЛЫМ УГЛОМ НАКЛОНА ЗЕРКАЛЬНОГО ПЛАНОВОИДА

© 2011 г. С. А. Чупраков, канд. техн. наук

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

E-mail: chupr@iszf.irk.ru

Рассмотрены конструкции бленд для предотвращения попадания засветки нулевого порядка в фокальную плоскость системы “зеркальный Райт”. Бленды имеют вид трубы с “люком” для предметного пучка, “конуса центрального отверстия” в planoидном зеркале и “переднего экрана”. Форма “люка”, “конуса центрального отверстия” и окружность фокальной плоскости задают две линейчатые поверхности, с помощью которых можно приближенно определить геометрию “переднего экрана”.

Ключевые слова: светозащита, бленды, двухзеркальные оптические системы.

Коды OCIS: 220.2740

Поступила в редакцию 02.11.2010

В зеркальных оптических системах существует проблема защиты фокальной плоскости от попадания прямой засветки – лучей, которые до пересечения с рабочей фокальной плоскостью не пересекали входной зрачок в конусе угла поля зрения. Расчет геометрии светозащитных бленд проводится методом трассировки лучей и для известных оптических систем является инженерной задачей, решаемой распространенными оптическими САД-пакетами, такими как ZEMAX и т. п. Вместе с тем существуют задачи определения связи геометрических параметров светозащитных бленд (формы, размеров, расположения в пространстве) с геометрическими параметрами малоизвестных зеркальных схем, когда требуется выяснить, решается ли проблема светозащиты вообще, и каковы должны быть взаимные расположения зеркал, их светосила и поле зрения, чтобы светозащита была осуществима. Для решения таких задач методом трассировки лучей потребовались бы расчеты очень большого количества систем, в которых интересующие параметры перебирались бы с достаточным шагом, независимо друг от друга, а полученные результаты аппроксимировались специально подобранными функциями, связывающими их с перебираемыми параметрами. Такой способ, по понятным причинам, очень трудоемок и малоэффективен, несмотря

на большие возможности современной вычислительной техники. Поэтому, для первоначальных исследований геометрии светозащитных бленд в малоизвестных оптических схемах, целесообразно воспользоваться методами аналитической геометрии в той мере, в которой это позволяет сложность получаемых выражений.

Геометрия светозащитных бленд

В системе “зеркальный Райт” фокальная плоскость подвержена прямой засветке через отверстие в planoидном зеркале. Если не принимать никаких мер, то наблюдения в дневное время становятся невозможны точно так же, как и в других двухзеркальных системах – касегреновского и грегорианского типа. Для устранения засветки применяются три бленды:

1. собственно “труба” с люком, контур которого представляет собой линию пересечения в первом приближении двух цилиндров;

2. “конус центрального отверстия”, представляющий собой пересечение конуса лучей, отраженных от главного зеркала, и цилиндра с радиусом, равным радиусу центрального отверстия в planoидном зеркале, ось которого параллельна оси предметного пучка;

3. “передний экран”, установленный по ходу предметного пучка на некотором расстоянии перед вогнутым зеркалом.

В работах [1, 2] была приближенно определена геометрия описанной системы светозащиты – длина “конуса” kl и расстояние nm , а по существу только точка m . В дальнейшем, пространственная форма “конуса” была уточнена, но оставалась неизвестной форма и геометрические размеры “переднего экрана”.

Геометрия “трубы” и “конуса центрального отверстия” определяются достаточно произвольно. Они могут иметь и другую форму. Например, вместо трубы можно использовать параллелепипед, а цилиндр, пересекающий “конус центрального отверстия”, может быть не параллелен предметному пучку. Также конус может быть вырезан не цилиндром, а пересечен плоскостью и т. п. Поле зрения, страдающее от засветки, может иметь не круглую форму, а представлять собой произвольно ориентированный прямоугольник и даже несколько прямоугольников (крупные современные матричные фотоприемники делают составными). Таким образом, форма “люка” для предметного пучка, “конуса центрального отверстия” и форма фокальной плоскости однозначно определяют форму и положение в пространстве “переднего экрана” и к нему мо-

жет быть применена методика расчета, в целом сходная с описанной.

Все расчеты ведутся в следующей системе координат. Начало координат расположено в вершине planoидной поверхности, плоскость симметрии системы – YZ , положительное направление оси Z – от planoида к главному зеркалу, оптическая ось главного зеркала совпадает с осью Z . Очевидно, что координаты контура “люка” рассчитываются из уравнений двух цилиндров

$$\begin{aligned} \left(\frac{X}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\tilde{Y}}{R_1}\right)^2 &= 1, \\ \left(\frac{X}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{Y}{R_2}\right)^2 &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

при условии разворота цилиндра с радиусом образующей R_1 вокруг вершины координат на угол θ в плоскости YZ

$$\tilde{Y} = Y \cos \theta + Z \sin \theta, \quad (2)$$

R_2 – радиус образующей второго цилиндра, ось которого совпадает с осью Z . Выражения для координат X_T и Y_T можно записать как функции координаты Z_T , т. е. расстояния от вершины planoидного зеркала

$$\begin{aligned} X_T &= -\frac{1}{2} \sqrt{-\csc^2 \theta^3 \left(\sin \theta (R_2^2 - 4R_1^2 + 5Z_T^2) - 8Z_T \cos \theta \sin \theta \sqrt{R_2^2 - R_1^2 + Z_T^2} + \sin 3\theta (R_2^2 + Z_T^2) \right)}, \\ Y_T &= Z_T \operatorname{ctg} \theta - \csc \theta^2 \sin \theta \sqrt{R_2^2 - R_1^2 + Z_T^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Контур светозащитного “конуса центрального отверстия” рассчитывается из уравнений конуса лучей, отраженных от главного зеркала и цилиндра, радиус которого равен радиусу центрального отверстия в planoидном зеркале

$$\begin{aligned} \left(\frac{X}{h}\right)^2 + \left(\frac{Y}{h}\right)^2 &= \left(\frac{Z+c}{c}\right)^2, \\ \left(\frac{X}{h}\right)^2 + \left(\frac{\tilde{Y}}{h}\right)^2 &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

так же при условии разворота цилиндра с радиусом образующей R_1 вокруг вершины координат на угол θ в плоскости YZ (см. выше),

c – расстояние от вершины planoидного зеркала до точки схода конуса, рассчитываемое по формуле

$$c = \Delta + \frac{f^2 \omega}{D_{\text{вх.з.}}/2 - f\omega}, \quad (5)$$

где $D_{\text{вх.з.}}$ – диаметр входного зрачка (зеркального planoида), f – фокусное расстояние главного зеркала, ω – половина угла поля зрения, Δ – вынос фокальной плоскости за поверхность зеркального planoида. Выражения для координат X_C и Y_C можно записать как функции координаты Z_C , т. е. расстояния от вершины planoидного зеркала

$$X_C = -\frac{1}{2} \sqrt{\csc^3 \theta \left(Z_C \left(5Z_C c^2 + 4h^2 \sin^2 \theta (2c + Z_C) - 4c^3 h^2 \sin^3 \theta + Z_C \left(c^3 Z_C \sin 3\theta - 8 \cos \theta \sqrt{c^2 Z_C \sin^2 \theta (2ch^2 + Z_C (c^2 + h^2))} \right) \right) \right)},$$

$$Y_C = Z_C \operatorname{ctg} \theta - \frac{\csc \theta^2 \sqrt{c^2 Z_C \sin^2 \theta (2ch^2 + Z_C (c^2 + h^2))}}{c^2}. \quad (6)$$

Очевидно, что граница тени является *огibaющей семейства кривых*, представляющих собой центральную проекцию кривых (3) и (6), если центрами проецирования являются точки, лежащие на окружности, ограничивающей рабочую фокальную плоскость, на плоскость, перпендикулярную оптической оси и пересекающую предметный пучок в точке m (рис. 1а). Те участки этой плоскости, на которые лучи, выпущенные из точек, лежащих на окружности, ограничивающей фокальную плоскость, не попадают, могут быть удалены. Таким образом “передний экран” как бы “вырезается” двумя тенями – от “люка” и “конуса центрального отверстия”, и представляет собой световое пят-

но, которое было бы видимо на указанной плоскости, если бы окружность фокальной плоскости представляла собой “ламбертовский источник”.

Легко предположить, что для расчета вышеупомянутой огибающей достаточно для каждой точки пространственных кривых (3) и (6) рассчитывать единственный луч, выпущенный из точки окружности фокальной плоскости, максимально удаленный в плоскости XU от точек (X_C, Y_C) (6) и (X_T, Y_T) (3). Очевидно, что проекция этого луча в плоскости XU пройдет через центр окружности, ограничивающей рабочую фокальную плоскость.

Для нахождения “переднего экрана” можно воспользоваться следующими упрощениями:

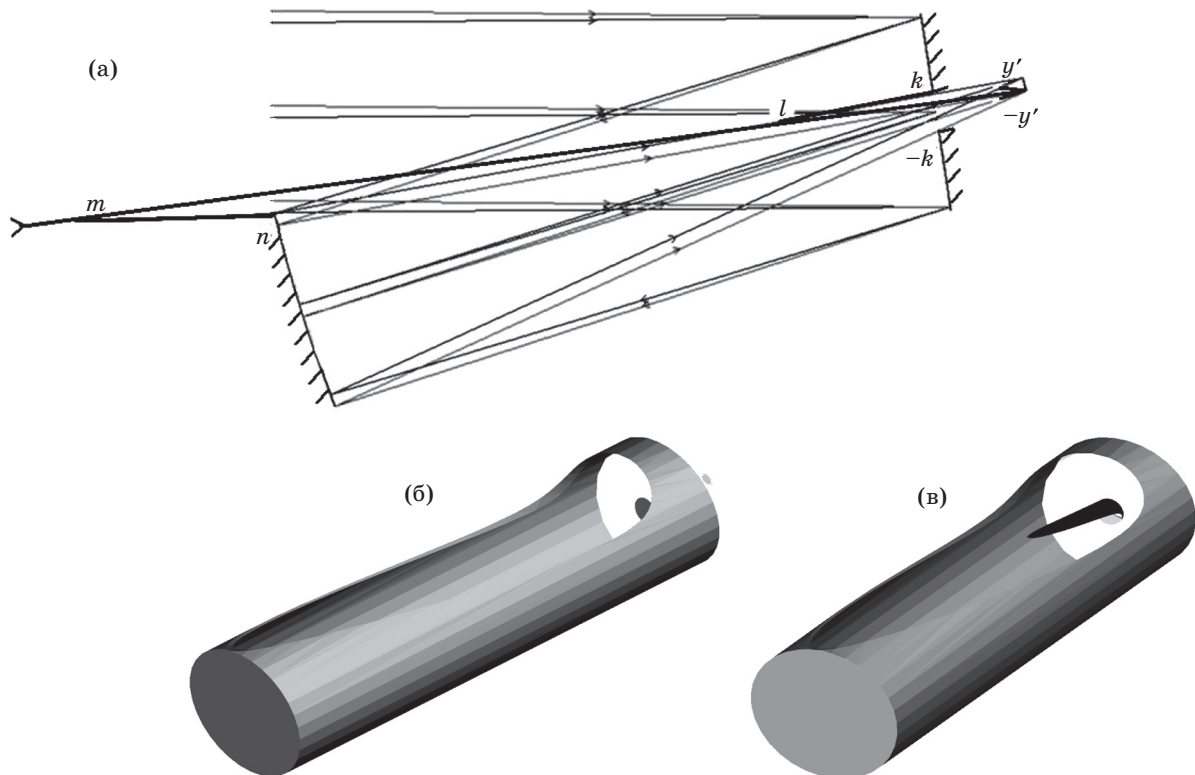


Рис. 1. Конструкция системы светозащиты в “зеркальном Райте”. а – сечение плоскостью симметрии зеркального planoида (наиболее уязвимая для засветки точка $(-y')$ поля зрения $(-y'y)$, б – труба с выходным “люком” для предметного пучка, представляющего собой линию пересечения двух цилиндров, в – “конус центрального отверстия”, представляющий собой конус лучей, отраженных главным зеркалом, и цилиндра с основанием, диаметр которого равен центральному отверстию.

1. Контуры теней от “люка” и “конуса центрального отверстия” представляют собой линейчатые поверхности.

2. Образующими линейчатых поверхностей являются: для “люка” – окружность поля зрения и линия, заданная точками (X_T, Y_T, Z_T) , а для “конуса центрального отверстия” – также окружность поля зрения и линия, заданная точками (X_C, Y_C, Z_C) .

3. Направляющие линейчатых поверхностей проходят через две точки, являющиеся точками пересечения образующих и плоскости, поворачивающейся вокруг оси главного зеркала. Данная плоскость будет пересекать каждую образующую в двух точках. Для расчетов берутся точки, расположенные по разные стороны от оси поворота плоскости (т. е. от оптической оси).

Сложный вид формул для (X_T, Y_T, Z_T) и (X_C, Y_C, Z_C) не позволяет найти точки пересечения контуров “люка” и “конуса центрального отверстия” с заданной плоскостью напрямую. Такой расчет представляет собой задачу пересечения трех поверхностей, поэтому для простоты расчеты велись следующим образом. Вначале задавалась точка (X, Y, Z) , принадлежащая контуру, затем через оптическую ось и эту точку проводилась плоскость. Соответствующие точки фокальной плоскости для “конуса центрального отверстия” находятся по формулам

$$x_c = \frac{-X_C y_f}{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}}, \quad y_c = \frac{-Y_C y_f}{\sqrt{X_C^2 + Y_C^2}}, \quad (7)$$

а для “люка” по формулам:

$$x_t = \frac{-X_T y_f}{\sqrt{X_T^2 + Y_T^2}}, \quad y_t = \frac{-Y_T y_f}{\sqrt{X_T^2 + Y_T^2}}, \quad (8)$$

где y_f – радиус окружности фокальной плоскости. Значение $z_c = z_t$ принимается равным $-\Delta$. Экран расположен на расстоянии $R > (f - \Delta)$ от вершины planoидного зеркала. Координаты контуров тени находятся по формулам для “конуса центрального отверстия”

$$\begin{aligned} \tilde{x}_c &= X_C + (x_c - X_C) \frac{Z_C - R}{Z_C + \Delta}, \\ \tilde{y}_c &= Y_C + (y_c - Y_C) \frac{Z_C - R}{Z_C + \Delta} \end{aligned} \quad (9)$$

и для “люка”

$$\begin{aligned} \tilde{x}_t &= X_T + (x_t - X_T) \frac{Z_T - R}{Z_T + \Delta}, \\ \tilde{y}_t &= Y_T + (y_t - Y_T) \frac{Z_T - R}{Z_T + \Delta}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, зная конструктивные параметры “зеркального Райта”:

1. $D_{\text{вх.з.}}$ – диаметр входного зрачка (зеркального planoида),
2. f – фокусное расстояние главного зеркала,
3. ω – половину угла поля зрения,
4. Δ – вынос фокальной плоскости за поверхность зеркального planoида,

можно определить уравнения лучей, выпущенных из точек, лежащих на окружности, ограничивающей фокальную плоскость, и пересекающих контуры, задаваемые уравнениями (3) и (6). В дальнейшем, положение и форма “переднего экрана” будет определяться этими прямыми и поверхностью, которую они пересекают. В данной работе эта поверхность, как уже упоминалось, является плоскостью XU , перпендикулярной оси вогнутого зеркала и расположенной таким образом, что она пересекает предметный пучок в точке m (рис. 1).

На рис. 2 показаны контуры пересечения рассмотренных линейчатых поверхностей: 1 – от “конуса центрального отверстия”, 2 – от “люка”, расположенные на упомянутой плоскости.

Рисунок получен для системы со следующими параметрами: $D_{\text{вх.з.}} = 150$, $f = 720$, $\omega = 0,8^\circ$, $\Delta = 110$, $R_1 = 156$, $R_2 = 182$. Область, ограниченная пересекающимися линиями (1)

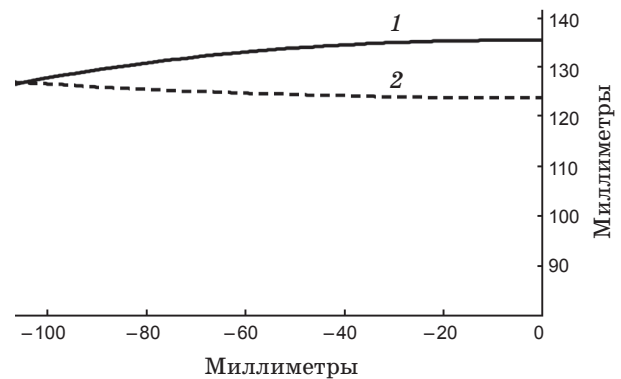


Рис. 2. Контур пересечения линейчатых поверхностей с плоскостью, перпендикулярной оптической оси и отстоящей от начала координат на расстоянии до точки “ m ” (см. рис. 1а). Начало координат соответствует точке пересечения плоскости предметным пучком в точке “ m ”.

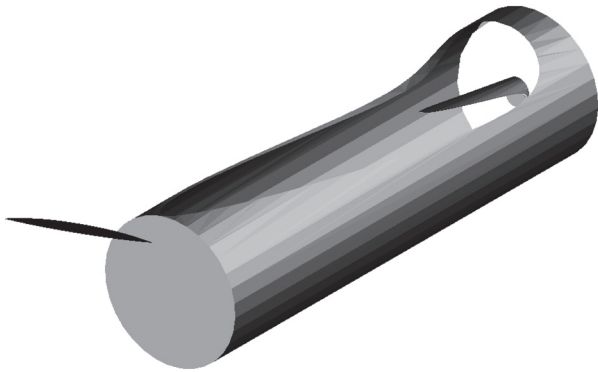


Рис. 3. Результат пространственного моделирования области, ограниченной кривыми, приведенными на рис. 2.

и (2) является “передним экраном” “зеркального Райта”. На рис. 3 показан результат моделирования “переднего экрана” для указанных конструктивных параметров.

В действительности контур будет иметь форму, слегка отличающуюся от рассчитываемой по предлагаемой методике из-за того, что реальные “труба” с люком и “конус центрального отверстия” имеют конечную толщину. Таким образом, уравнения (3), (6), (9) и (10) позволяют исследовать поведение геометрических параметров светозащитных бленд в системе “зеркальный Райт” в зависимости от относительного отверстия, положения фокальной плоскости и поля зрения.

Расчет экранирования входного зрачка

Как уже отмечалось автором [3], конус центрального отверстия увеличивает экранирование входного зрачка из-за того, что внешняя сторона конуса центрального отверстия “перегораживает” лучи, отраженные от planoидного зеркала. В результате контур экранирования представляет собой фигуру, состоящую из двух частей – полуокружности с диаметром, равным центральному отверстию, и проекции линии, заданной выражениями (6) на плоскость входного зрачка пучком лучей, параллельных оси вогнутого зеркала. Полуокружность – проекция этой же линии на плоскость входного зрачка, но падающим предметным пучком до отражения от зеркального planoида. На рис. 4 показан контур экранирования, рассчитанный для системы с $A = 4,6$, $\omega = 0,8^\circ$, $\Delta = 0,153$.

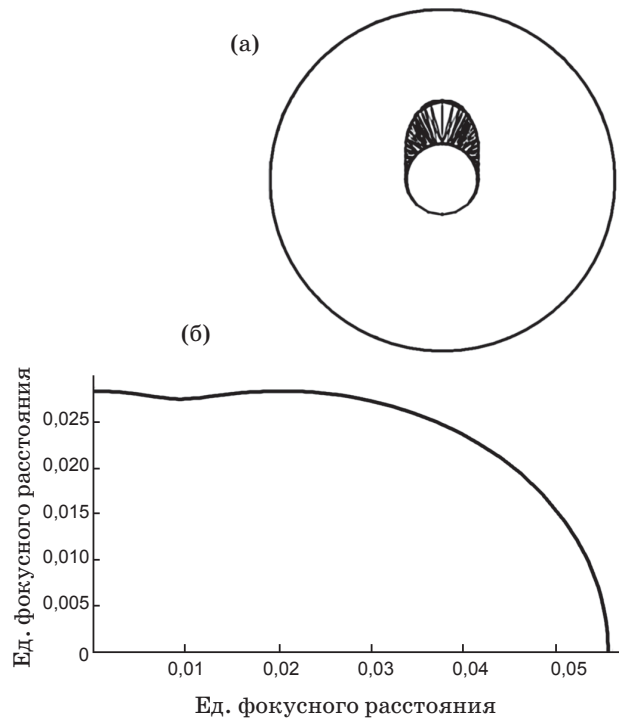


Рис. 4. Экранирование входного зрачка “конусом центрального отверстия” в planoидном зеркале. а – полный контур экранирования, состоящий из перекрывающихся проекций “конуса центрального отверстия” пучком лучей до и после отражения от planoидного зеркала, б – половина контура заштрихованной области (см. рис. 4а) для системы с $A = 4,6$, $\omega = 0,8^\circ$, $\Delta = 0,153$, развернутая на 90° по часовой стрелке. Координаты по осям выражены в долях фокусного расстояния системы. Максимальное значение по оси ординат соответствует радиусу центрального отверстия в planoидном зеркале.

Для расчета экранирования достаточно вычислить следующее выражение для площади фигуры, показанной на рис. 4а,

$$S_{obs} = 2 \int_0^{Y'} Y_c(X_c) dX_c + \frac{h^2 \pi}{2}. \quad (11)$$

Интеграл в выражении (11) представляет собой площадь одной из ветвей контура, показанной на рис. 4б. Для вычисления интеграла требуется выразить функцию $Y_c(X_c)$ и вычислить верхний предел интегрирования Y' , являющийся корнем уравнения

$$X_c(Y_c) = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12), полученное из (6), представляет собой полином четвертой степени Y_c , ко-

эффиценты которого имеют настолько сложный вид, что аналитическое решение не представляется возможным. Значительно проще найти решение численно, положив в качестве начального значения Y' следующую величину:

$$Y_{0\max} = -2h \cos 2\theta \operatorname{csc} \left(\frac{D_{\text{вх.з.}}/2 - \omega f}{f} - \theta \right). \quad (13)$$

Представляет интерес исследование зависимости экранирования входного зрачка “конусом центрального отверстия” от таких геометрических параметров, как вынос фокальной плоскости Δ , поле зрения 2ω , относительное отверстие системы A . При этом, угол между падающим и отраженным от зеркального planoида пучками θ должен рассчитываться по формуле:

$$\theta \leq \frac{D_{\text{вх.з.}}(A + 2\omega)}{D_{\text{вх.з.}} - 2A\Delta}. \quad (14)$$

На рис. 5 показана зависимость экранирования входного зрачка от полевого угла ω при фиксированном значении относительного отверстия $A = 1:4,5$, полем зрения $\omega = 0,5^\circ$ и выноса фокальной плоскости за planoидную поверхность $\Delta = 0,139f$. При создании каждого графика два значения фиксировались, а величина θ пересчитывалась по формуле (14).

Таким образом, в достаточно широких диапазонах значений основных конструктивных параметров оптической системы “зеркальный Райт” экранирование по площади входного зрачка “конусом центрального отверстия” не превышает критические 13–15% площади входного зрачка.

Зависимость геометрических параметров “переднего экрана” от конструктивных параметров системы “зеркальный Райт”

“Передний экран” не вносит дополнительного экранирования входного зрачка. Но его положение в пространстве и геометрические размеры зависят от геометрии “конуса центрального отверстия” и “люка” в трубе, задаваемой выражениями соответственно (6) и (3). Предельно малый угол θ делает положение и размеры “переднего экрана” очень чувствительными к малейшему изменению любого из конструктивных параметров – относительному отверстию, полю зрения и положению фокальной плоскости. Эти зависимости также требуют

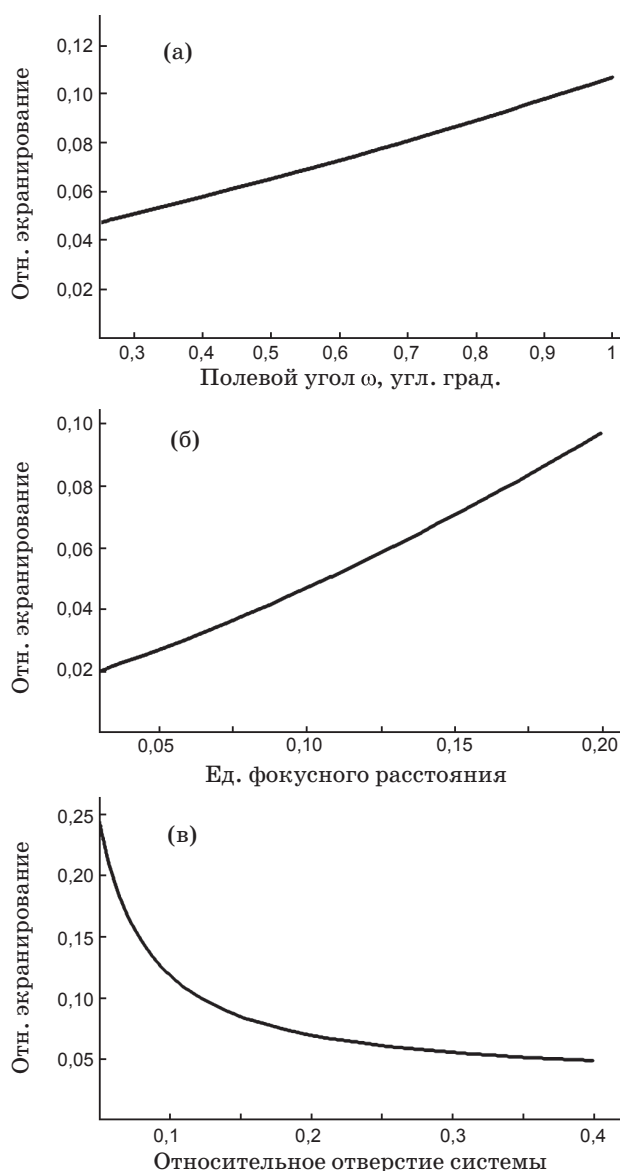


Рис. 5. Зависимость экранирования входного зрачка в системе “зеркальный Райт” от конструктивных параметров. а – от полевого угла ω (градусы) при относительном отверстии $A = 1:4,5$ и выносе фокальной плоскости за planoидную поверхность $\Delta = 1,139f$, б – от выноса фокальной плоскости за planoидную поверхность при относительном отверстии $A = 1,45$ и полевым углом $\omega = 0,5^\circ$, в – от относительного отверстия системы при выносе фокальной плоскости за planoидную поверхность $\Delta = 1,139f$ и полевым углом $\omega = 0,5^\circ$.

изучения, как и экранирование входного зрачка в предыдущем разделе. Основной интерес представляет зависимость размеров и положения переднего экрана от направления луча – $y'lm$ (рис. 1). При увеличении угла пересечения конуса лучей, отраженных от главного

зеркала и цилиндра с диаметром основания, равным центральному отверстию (4), образующих “конус центрального отверстия”, уменьшается длина конуса kl и экранирование (11) входного зрачка. Но при этом угол луча $-y'lm$ с осью предметного пучка становится меньше, что приводит к увеличению длины системы, поскольку расстояние nm растёт. Представляет интерес влияние длины конуса kl на размеры “переднего экрана” в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 1, т. е. в направлении оси абсцисс рис. 2.

Для удобства представления расчетов введем угол Θ между пучком, отраженным от зеркального planoида, и осью цилиндра, который вырезает конус центрального отверстия. До этого мы рассматривали только случай $\Theta = \theta$, когда эта ось параллельна падающему пучку. Но если $\Theta > \theta$, то длина конуса центрального отверстия уменьшится, соответственно, уменьшится и экранирование входного зрачка. Графики зависимости экранирования входного зрачка, длины и поперечных размеров переднего экрана в объективе “зеркальный Райт” с конструктивными параметрами, рассматриваемыми выше, приведены на рис. 6.

Как следует из рис. 6, увеличение угла Θ всего на 1° позволяет уменьшить экранирование входного зрачка с 9% до 7,4%. Но при этом ближайшее возможное положение переднего экрана увеличивается в 15 раз, до $6f'$, а ширина экрана увеличивается почти втрое, до $0,6f'$ уже при $\Theta = 16,8^\circ$. Следует отметить, что уменьшение расстояния от главного зеркала до переднего экрана при заданном Θ приведет к экранированию входного зрачка или к появлению области паразитной засветки, что недопустимо.

Выводы

Для исследования геометрии светозащитных бленд оптической системы “зеркальный Райт” с малым углом наклона planoидного зеркала применен аналитический метод расчета. Формы и взаимное расположение в пространстве двух светозащитных бленд – “трубы” и “конуса центрального отверстия” в planoидном зеркале, а также светозащищенной фокальной плоскости были заданы в явном виде из конструктивных параметров оптической системы. Форму и расположение в пространстве третьей бленды (“переднего экрана”) также оказалось возможно рассчитать методами анали-

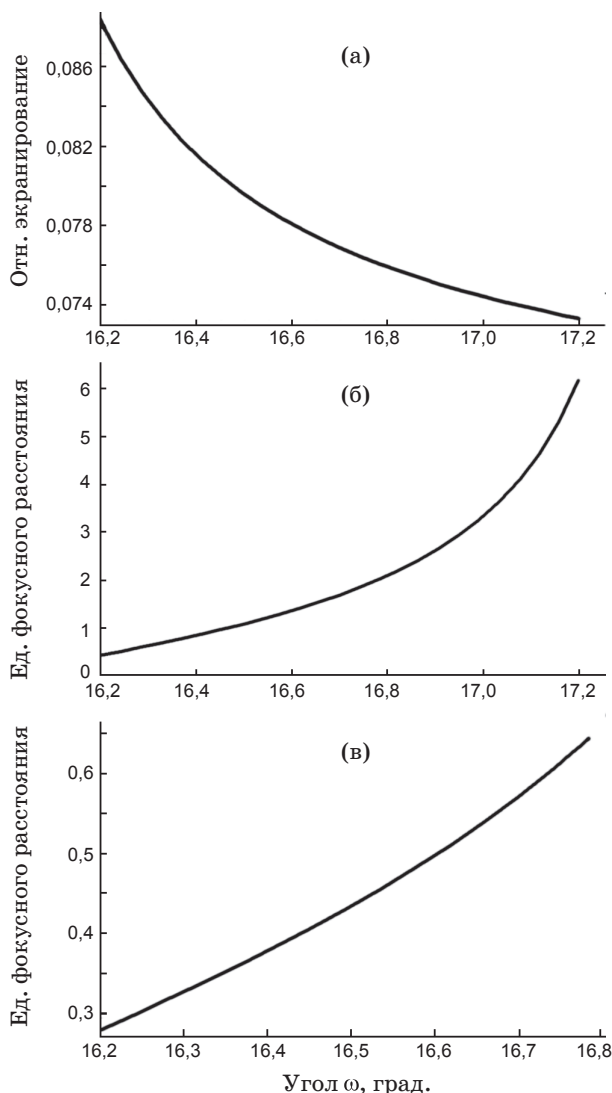


Рис. 6. Исследование зависимости геометрических параметров “переднего экрана” в системе “зеркальный Райт” от формы “конуса центрального отверстия”. По оси абсцисс отложено значение угла θ между осью цилиндра, вырезающего конус центрального отверстия, и осью пучка, отраженного от зеркального planoида. При $\theta = 16,2^\circ$ ось цилиндра совпадает с предметным пучком. а – экранирование входного зрачка “конусом центрального отверстия”, б – расстояние ml от точки пересечения предметного и отраженного пучков до плоскости переднего экрана, рассчитанное в единицах фокусного расстояния, в – половина ширины переднего экрана в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии системы, выраженная в единицах фокусного расстояния.

тической геометрии и, следовательно, связать с конструктивными параметрами оптической системы. Такой подход представляется более удобным при исследовании геометрии систем

светозащиты в малоизученных оптических системах, в первую очередь, зеркальных внеосевых, по сравнению с традиционными методами трассировки лучей в оптических САД-программах.

Представляет интерес разработка аналогичного метода расчета светозащитных бленд в системе “зеркальный Шмидт” и “зеркальный Шмидт–Кассегрен” с малым углом наклона зеркального планоида.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Чупраков С.А., Бородин А.Н. Широкоугольный зеркальный объектив телескопа // Патент РФ № 2215314. 2003.
 2. Чупраков С.А. Зеркальные объективы, основанные на применении центрально-симметричных планоидных зеркал // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 45–49.
 3. Чупраков С.А. Оптические системы на основе децентрированных, центрально-симметричных планоидных поверхностей // Автореф. канд. дис.: СПбГУ ИТМО. 2008. 23 с.
-