

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.1

## АНАБЕРРАЦИОННЫЙ МЕНИСК В СХЕМЕ КОНТРОЛЯ ВЫПУКЛЫХ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

© 2008 г. Е. В. Ермолаева; В. А. Зверев, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики, Санкт-Петербург

В работе проведен анализ свойств анаберрационного мениска как элемента автоколлимационной схемы контроля выпуклых несферических поверхностей вращения второго порядка. Представлены варианты схемы контроля.

Коды OCIS: 220.0220, 220.2740, 220.1250.

*Поступила в редакцию 16.10.2007.*

В классических зеркальных оптических системах астрономических телескопов первая отражающая поверхность (главное зеркало) имеет форму параболоида вращения, а вторая отражающая поверхность (вторичное зеркало) – форму вогнутого эллипсоида в системе Грегори, выпуклого гиперболоида в системе Кассегрена и форму выпуклого параболоида вращения в афокальной системе Мерсенна.

Потребность в развитии астрономического приборостроения и достигнутый к концу XIX века уровень технологии изготовления зеркал с несферическими отражающими поверхностями определили возможность и целесообразность изготовления классических зеркальных систем, предложенных еще в XVII веке. Однако широкое применение в объективах астрономических телескопов эти системы получили лишь в прошлом столетии.

Разработка приборов инфракрасной техники и крупногабаритных средств наблюдения различного назначения определила необходимость создания зеркальных оптических систем, формирующих изображение высокого качества в пределах широкого углового поля. Задачу одновременной компенсации сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны поверхности изображения принципиально можно решить, если применить для его образования оптическую систему, состоящую из трех отражающих поверхностей несферической формы. Вторичное зеркало таких систем, как правило, представляет собой выпуклую отражающую поверхность любой формы, описываемой уравнением второго порядка.

Достигнутое в результате расчета высокое качество изображения, образованного зеркальной оптической системой, в процессе изготовления можно сохранить, если отклонения отражающих поверхностей от номинальной формы не будут превышать по крайней мере  $\frac{1}{8}\lambda$ . Это условие определяет весьма высокие требования к точности контроля формы отражающих поверхностей в процессе их обработки. От того насколько удачно выбран метод контроля и созданы средства для его осуществления, зависит не только трудоемкость, но и сама возможность изготовления деталей объектива.

Для того чтобы достичь требуемой достоверности результатов, схема контроля должна быть предельно простой, конструкция контрольного устройства – технологичной в изготовлении и удобной при юстировке.

Решению проблемы контроля несферических поверхностей уделялось огромное внимание на всем протяжении прошлого столетия, о чем косвенно свидетельствует обширная библиография, приведенная в [1].

Применение фазовых (киноформных) оптических элементов существенно облегчает задачу создания средств контроля вогнутых отражающих поверхностей. Однако контроль выпуклых поверхностей и в настоящее время представляет собой сложную научно-техническую проблему.

Принципиально идеальной схемой контроля формы несферических поверхностей вращения второго порядка является схема, основанная на использовании анаберрационных точек (геометрических

фокусов) поверхностей. Однако в этом случае труднодоступны либо один из фокусов (вогнутый параболоид, вогнутая и выпуклая поверхности гиперболоида), либо оба (выпуклая поверхность эллипсоида и параболоида). Поэтому применение такой схемы требует дополнительных оптических элементов. Примером удачного построения такой схемы может служить схема Хиндла для контроля формы выпуклой поверхности гиперболоида, в которой в качестве дополнительного оптического элемента применена сфера, центр кривизны которой совмещен с труднодоступным фокусом гиперболоида, как показано на рис. 1.

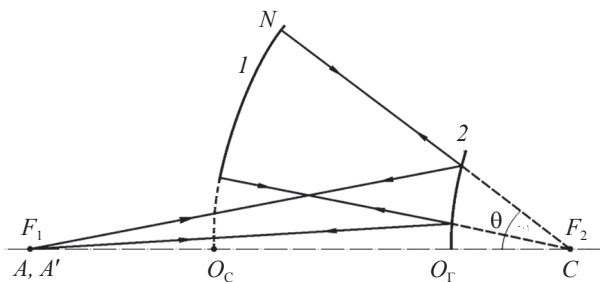
Очевидным достоинством схемы является то, что лучи отражаются от контролируемой поверхности в прямом и обратном ходе, т. е. дважды, что естественным образом повышает точность контроля. С другой стороны, геометрическое место точек пересечения лучей с контролируемой поверхностью, отраженных ею в край отверстия вспомогательной сферы, определяет внешнюю границу неконтролируемой центральной зоны поверхности. Эта зона тем меньше, чем дальше расположена сфера от контролируемой поверхности, при этом диаметр сферы  $D = 2R\sin\theta$ , где  $R = NC$  – радиус кривизны сферы.

Из простых геометрических соотношений можно получить приближенную зависимость диаметра контрольного сферического зеркала от параметров контролируемой выпуклой поверхности и размеров неконтролируемой зоны в виде

$$D = \frac{2eD_k}{(1 + \psi)(1 + e) - 2}, \quad (1)$$

где  $D_k$  – диаметр контролируемой поверхности гиперболоида,  $e$  – эксцентриситет в уравнении поверхности  $x^2 + y^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2$ ;  $\psi = \frac{D_{нз}}{D_k}$ ,  $D_{нз}$  – диаметр неконтролируемой зоны поверхности.

Заметим, что схему Хиндла можно применить и для контроля выпуклых поверхностей эллипсоида



**Рис. 1.** Автоколлимационная схема контроля выпуклой поверхности гиперболоида вращения. 1 – сферическое зеркало, 2 – гиперболоидное зеркало.

и параболоида. Однако при этом схему для контроля формы поверхности эллипсоида необходимо дополнить объективом, формирующим пучок лучей, сходящихся в одном из его геометрических фокусов, а схему для контроля формы параболоида – объективом, формирующим параллельный пучок лучей, т. е. коллиматором. Можно показать, что при применении этих схем диаметр контрольной сферы определяется соотношением (1).

В случае параболоида вращения эксцентриситет  $e = 1$  и соотношение (1) принимает вид

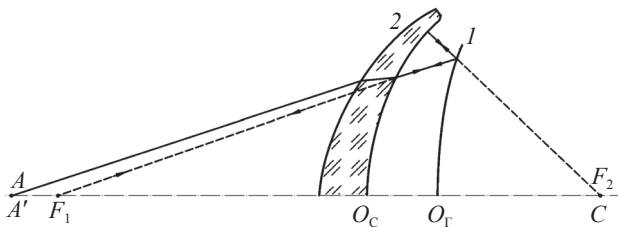
$$D = \frac{D_k}{\psi}. \quad (2)$$

Пусть  $\psi = 0,3$ . Тогда  $D > 3D_k$ . Следовательно, при контроле формы поверхности гиперболоида вращения при  $\psi \geq 0,3$  диаметр  $D > 3D_k$ .

Предположим, что в уравнении, определяющем эллипсоид,  $e^2 = 0,5$ . При этом если  $\psi = 0,3$ , то в соответствии с формулой (1) имеем  $D > 6D_k$ . Таким образом, при контроле несферических поверхностей в схеме Хиндла необходимо сферическое зеркало, диаметр которого в несколько раз больше диаметра контролируемого, причем отклонение формы контрольного зеркала от сферы должно составлять лишь малую часть от отклонения формы контролируемой поверхности. Кроме того, причиной деформации волнового фронта может быть не только погрешность изготовления контролируемой несферической поверхности, но и погрешности совмещения точечного источника с одним из геометрических фокусов и центра кривизны контрольной сферы с другим. Отделить погрешность изготовления поверхности от погрешности установки элементов схемы практически невозможно [2]. Поэтому высокие требования предъявляются к взаимному положению элементов в контрольной схеме. К тому же заметим, что чем дальше разнесены в пространстве отражающие поверхности, тем сложнее их выставить в требуемое положение, т. е. тем сложнее сборка контрольного устройства.

Как следует из соотношения (1), чем больше зона неконтролируемой поверхности, тем меньше диаметр контрольного зеркала. При  $\psi = 1$  независимо от эксцентриситета поверхности  $D = D_k$ . Поэтому представляет интерес схема с менисковым компенсатором для контроля выпуклой поверхности гиперболоида, представленная на рис. 2.

В этой схеме, которую можно рассматривать как модификацию схемы Хиндла, применен анаберрационный мениск 2, вогнутая поверхность которого, расположенная на конструктивно близком расстоянии от поверхности гиперболоида, играет роль вспомогательной сферы, концентричной геомет-



**Рис. 2.** Автоколлимационная схема контроля выпуклой поверхности гиперboloида вращения с анаберрационным мениском.

рическому фокусу  $F_2$  контролируемого гиперboloида  $1$ . Радиус кривизны выпуклой поверхности мениска служит коррекционным параметром для компенсации сферической aberrации, вносимой в изображение геометрического фокуса  $F_1$ , образованное мениском, его вогнутой поверхностью.

Эта схема обладает следующими очевидными достоинствами:

- диаметр анаберрационного мениска практически равен диаметру контролируемой поверхности зеркала,

- отсутствует зона неконтролируемой поверхности,

- форму сферической поверхности легко проверить в автоколлимационной схеме из центра кривизны, а качество изготовления мениска в целом – в автоколлимационной схеме со сферическим зеркалом, concentричным геометрическому фокусу  $F_1$ . Важно заметить, что возможность контроля качества изображения точки  $A$ , оптически сопряженной с геометрическим фокусом  $F_1$ , как показано на рис. 2, определяет возможность изменения поперечного увеличения изображения, образованного мениском, путем изменения радиуса кривизны его выпуклой поверхности. Для компенсации возникающей при этом сферической aberrации в изображении точки сферическую форму выпуклой поверхности мениска можно заменить несферической.

Определим параметры схемы для контроля формы выпуклой поверхности гиперboloида. Положения геометрических фокусов относительно вершины поверхности гиперboloида определяются следующими выражениями [2]:

$$f_1 = \frac{r_0}{1-e}, \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{r_0}{1+e}, \quad (4)$$

где  $r_0$  – радиус кривизны в вершине поверхности гиперboloида.

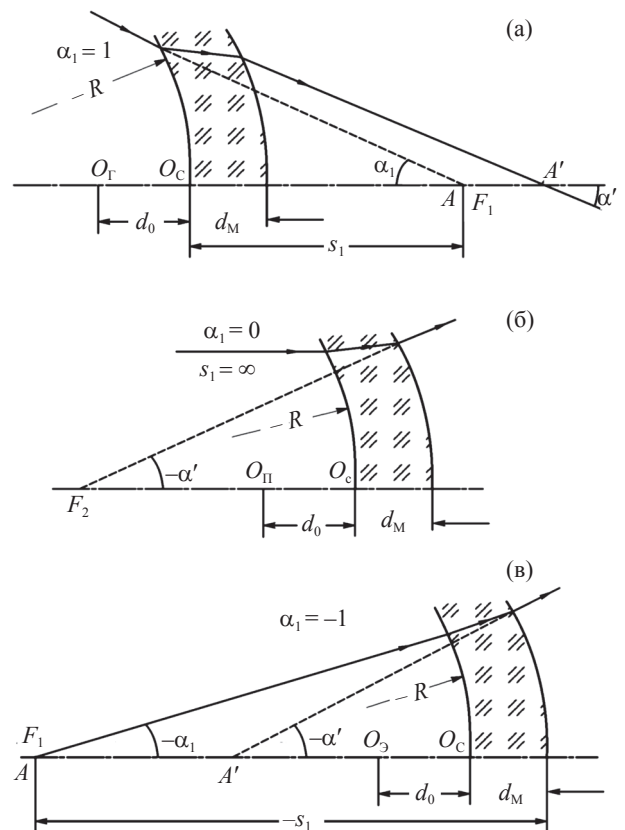
Радиус кривизны поверхности мениска, concentричного фокусу  $F_2$  гиперboloида, определяется выражением

$$R = \frac{r_0}{e+1} + d_0, \quad (5)$$

где  $d_0$  – расстояние от этой поверхности мениска до вершины гиперboloида.

Из функционального назначения мениска в рассматриваемой контрольной схеме следует, что в изображении геометрического фокуса  $F_1$ , образованного мениском в обратном ходе лучей, сферическая aberrация должна быть равна нулю. Положив в основу это условие, определим взаимосвязь конструктивных параметров мениска с эксцентриситетом контролируемой поверхности.

Представим мениск в обратном ходе лучей, как показано на рис. 3а, с помощью углов, образованных осевым виртуальным [4] лучом с оптической осью, в виде [5]



**Рис. 3.** Определение конструктивных параметров мениска при контроле поверхностей: а – гиперboloида вращения, б – параболоида вращения, в – эллипсоида вращения.  $O_г$ ,  $O_{II}$ ,  $O_3$  – вершины контролируемых поверхностей.

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1 & n_1 &= 1 \\ \alpha_2 &= \alpha & d_2 &= d_m & n_2 &= n \\ \alpha_3 &= \alpha' & n_3 &= 1.\end{aligned}$$

Используя формулу

$$n_2\alpha_2 - n_1\alpha_1 = h_1 \frac{n_2 - n_1}{r_1}, \quad (6)$$

где при принятых нормировке углов и обозначениях величин  $h_1 = \bar{s}_1\alpha_1 = \bar{s}_1 = -f_1 - d_0 = \frac{r_0}{e-1} - d_0$ ,  $r_1 = -R$ ,

$R = \frac{r_0}{e+1} + d_0$ , получаем

$$\alpha = 1 - 2 \frac{n-1}{n} \frac{e}{e-1} \frac{r_0}{r_0 + (e+1)d_0}. \quad (7)$$

Первичная сферическая абберация изображения геометрического фокуса  $F_1$ , образованного мениском в обратном ходе лучей, определяется коэффициентом

$$S_1 = \sum_{i=1}^{i=2} h_i P_i = h_1 P_1 + h_2 P_2, \quad (8)$$

где

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

Положив  $S_1 = 0$ , при принятых нормировке и обозначениях углов  $\alpha_i$  и других величин получаем уравнение вида

$$\begin{aligned}\alpha^3 - (2 + v)\alpha\alpha'^2 + \\ + (1 + 2v)\alpha^2\alpha' - v\alpha^3 - \frac{(1 - v\alpha)(1 - \alpha)^2}{1 - \frac{e-1}{1 - (e-1)\tilde{d}_0} \alpha\tilde{d}_m} = 0,\end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\tilde{d}_m = \frac{d_m}{r_0}, \quad \tilde{d}_0 = \frac{d_0}{r_0}.$$

Итак, при выбранном материале мениска и требуемом значении эксцентриситета контролируемой поверхности  $e$  из соотношения (7) находим значение угла  $\alpha$ . Найденное значение угла  $\alpha$  и выбранную толщину мениска  $\tilde{d}_m$  подставляем в уравнение (9), решив которое, находим угол  $\alpha'$ . Зная углы  $\alpha$  и  $\alpha'$ , легко найти конструктивные параметры мениска. Кроме того, определив угол  $\alpha'$ , находим задний отрезок мениска при обратном ходе лучей, а изменив его знак, получим передний отрезок при прямом ходе лучей

$$\bar{s}_2' = -s_1 = \frac{h_2}{\alpha'} = \frac{1 - \alpha\tilde{d}_m}{\alpha'} \left( \frac{r_0}{e-1} - d_0 \right). \quad (10)$$

Заметим, что при  $D = D_k$  расстояние  $d_0$  равно разности стрелок прогиба контрольной сферической поверхности мениска при  $\frac{1}{4}D^2 = \frac{1}{4}D_k^2 = 2Rz_{сф} - z_{сф}^2$  и контролируемой несферической поверхности при  $\frac{1}{4}D_k^2 = 2r_0z_{асф} - (1-e)z_{асф}^2$ , т. е.

$$d_0 = z_{сф} - z_{асф}.$$

При выборе величины  $d_0$  необходимо учитывать конструкторское решение задачи требуемого расположения деталей в схеме. В первом приближении величину  $d_0$  можно найти при  $D = D_k$ , решив уравнение

$$\begin{aligned}d_0^2 + 2 \frac{r_0}{e+1} d_0 - \frac{2er_0^2}{(1-e^2)^2} \times \\ \times \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{4} \frac{1-e^2}{r_0^2} D_k^2} \right) + \frac{1}{4} \frac{e^2}{1-e^2} D_k^2 = 0.\end{aligned} \quad (11)$$

Для последующего анализа схемы удобно принять  $d_0 = 0$ . При этом формула (7) принимает вид

$$\alpha = 1 - 2 \frac{n-1}{n} \frac{e}{e-1}. \quad (12)$$

В этом случае, когда угол  $\alpha = 0$ , эксцентриситет контролируемой поверхности определяется формулой

$$e = \frac{n}{2-n}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что верхний предел значений эксцентриситета контролируемой поверхности определяется условием  $2-n > 0$ , т. е. показатель преломления  $n$  материала мениска должен быть меньше 2. Можно считать, что область значений показателя преломления оптического стекла существующих марок ограничена интервалом  $1,5 \leq n < 2$ . При этом значения эксцентриситета контролируемых поверхностей должны удовлетворять условию  $3 \leq e < \infty$ .

Заметим, что при  $\alpha = 0$  уравнение (9) принимает вид  $\alpha'^3 - 1 = 0$ , откуда  $\alpha' = 1$ . Следовательно, если  $\alpha = 0$ , то при произвольном расстоянии  $d_0$  и произвольной толщине мениска  $d_m$  радиусы кривизны поверхностей мениска равны между собой.

Пусть при  $d_0 = 0$  и  $d_m = 0$ . В этом случае уравнение (9) принимает вид

$$(\alpha' - 1)(\alpha'^2 + \alpha\alpha' + b) = 0, \quad (14)$$

где  $a = 1 - (2+v)\alpha$ ,  $b = a + (1+2v)\alpha^2$ .

Из уравнения (14) следует, что при  $\alpha' = 1$  и произвольном значении угла  $\alpha$ , а следовательно, и величин  $e$  и  $\nu$  коэффициент  $S_1 = 0$ .

Рассмотрим решение задачи контроля формы выпуклого гиперboloида, эксцентриситет которого соответствует интервалу  $1 < e < 3$ , при  $d_m \neq 0$ . Для этого выбираем значения  $e$  из этого интервала и подставляем в уравнение (12), в результате чего находим соответствующие значения угла  $\alpha$ . Затем, решая уравнение (9), при  $d_0 = 0$  и принятом  $\tilde{d}_m$  находим значение угла  $\alpha'$ . Кривые зависимости угла  $\alpha'$  от эксцентриситета  $e$  контролируемого гиперboloида вращения в диапазоне  $1 < e \leq 10$  при  $n = 1,5$  для ряда выбранных значений  $\tilde{d}_m$  представлены на рис. 4. Видно, что при  $e = 3$  (при этом угол  $\alpha = 0$ ) все кривые пересекаются; с уменьшением  $e$ , особенно при  $e < 1,5$ , и при увеличении толщины мениска угол  $\alpha'$  круто уменьшается. Поэтому толщина мениска должна быть минимально возможной из условия технологичности его изготовления.

Эксцентриситет параболоида вращения  $e = 1$ .

При этом  $f_1 = \infty$ ,  $f_2 = \frac{1}{2}r_0$ . В этом случае контрольный мениск в обратном ходе лучей, как показано на рис. 3б, удобно записать в виде

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0 & n_1 &= 1 \\ \alpha_2 &= \alpha & d_1 &= d_m & n_2 &= n \\ \alpha_3 &= \alpha' & n_3 &= 1. \end{aligned}$$

Используя формулу (6), находим  $\alpha = h_1 \frac{n-1}{nr_1}$ . Высоту  $h_1$  принимаем равной  $\frac{1}{2}r_0$ . Тогда при  $r_1 = -R$ , где  $R = f_2 + d_0 = \frac{1}{2}r_0 + d_0$ , угол

$$\alpha = -\frac{n-1}{n} \frac{r_0}{r_0 + 2d_0}. \quad (15)$$

В этом случае из условия  $S_1 = 0$  получаем уравнение

$$\alpha'^3 - (2 + \nu)\alpha\alpha'^2 + (1 + 2\nu)\alpha^2\alpha' + \frac{\nu\alpha^4\tilde{d}_m}{1 - \alpha\tilde{d}_m} = 0, \quad (16)$$

где  $\tilde{d}_m = \frac{2}{r_0}d_m$ .

При  $d_0 = 0$  угол  $\alpha = -\frac{n-1}{n}$  и уравнение (16) принимает вид

$$\begin{aligned} \alpha'^3 + \left(2 - \frac{n+1}{n^2}\right)\alpha'^2 + \left(1 - \frac{3n-2}{n^3}\right)\alpha' + \\ + \frac{(n-1)^4}{n^4} \frac{\tilde{d}_m}{n + (n-1)\tilde{d}_m} = 0. \end{aligned}$$

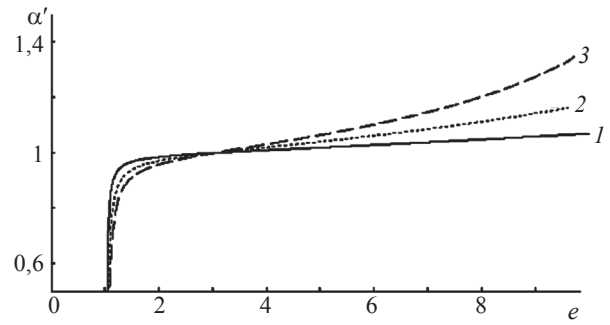


Рис. 4. Зависимости угла  $\alpha'$  от эксцентриситета  $e$  контролируемого выпуклого гиперboloида вращения при разных толщинах мениска. 1 –  $\tilde{d}_m = 0,1$ , 2 – 0,2, 3 – 0,3.

Если значения эксцентриситета лежат в диапазоне  $0 < e < 1$ , то уравнение поверхности второго порядка определяет эллипсоид вращения.

При этом расстояния от вершины эллипсоида вращения до дальнего и ближнего геометрических фокусов соответственно равны

$$f_1 = \frac{r_0}{1-e}, \quad f_2 = \frac{r_0}{1+e}.$$

В этом случае контрольный мениск в обратном ходе лучей, как показано на рис. 3в, удобно записать в виде

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -1 & n_1 &= 1 \\ \alpha_2 &= \alpha & d_1 &= d_m & n_2 &= n \\ \alpha_3 &= \alpha' & n_3 &= 1. \end{aligned}$$

Используя формулу (6), находим, что угол

$$\alpha = -\frac{1}{n} + h_1 \frac{n-1}{nr_1},$$

где

$$h_1 = \bar{s}_1\alpha_1 = -s_1 = f_1 + d_0 = \frac{r_0}{1-e} + d_0,$$

$$r_1 = -R, \quad R = f_2 + d_0 = \frac{r_0}{1+e} + d_0.$$

Выполнив соответствующую замену величин, получаем

$$\alpha = -1 - 2 \frac{n-1}{n} \frac{e}{1-e} \frac{r_0}{r_0 + (1+e)d_0}. \quad (17)$$

В этом случае

$$S_1 = h_1 \left( \frac{\alpha+1}{\nu-1} \right)^2 (\nu\alpha+1) + h_2 \left( \frac{\alpha'-\alpha}{1-\nu} \right)^2 (\alpha'-\nu\alpha).$$

При  $S_1 = 0$  это выражение легко преобразовать в уравнение вида

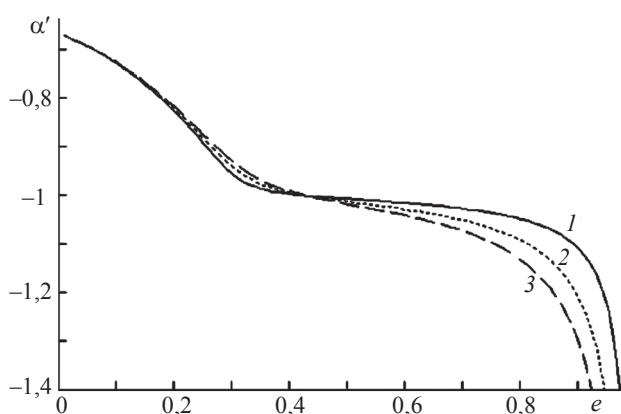


$$\alpha'^3 - (2 + \nu)\alpha\alpha'^2 + (1 + 2\nu)\alpha^2\alpha' - \nu\alpha^3 + \frac{(1 + \nu\alpha)(1 + \alpha)^2}{1 - \frac{1 - e}{1 + (1 - e)\tilde{d}_0}\alpha\tilde{d}_m} = 0, \quad (18)$$

где  $\tilde{d}_m = \frac{d_m}{r_0}$ ,  $\tilde{d}_0 = \frac{d_0}{r_0}$ .

Используя формулы (17) и (18), при  $d_0 = 0$  и  $n = 1,5$  для трех значений толщины мениска  $\tilde{d}_m$  получаем кривые зависимости значений угла  $\alpha'$  от эксцентриситета в диапазоне  $0 < e < 1$ , представленные на рис. 5. Из рисунка следует, что при  $e = \frac{n}{2+n}$  (при этом  $\alpha = -n$ , а  $\alpha' = -1$ ) и  $e \rightarrow 0$  (при этом  $\alpha' \rightarrow -\frac{1}{n}$ ) кривые пересекаются; в диапазоне изменения эксцентриситета между точками пересечения кривых зависимость угла  $\alpha'$  от толщины мениска незначительна; при  $e > 0,8$  кривая зависимости угла  $\alpha'$  от эксцентриситета  $e$  круто падает, причем тем круче, чем больше толщина мениска  $d_m$ . Поэтому при контроле поверхностей эллипсоидов вращения с эксцентриситетами, близкими к 1, толщина мениска должна быть минимальной.

Итак, в результате выполненного анализа схемы контроля выпуклых несферических поверхностей вращения второго порядка с анаберрационным мениском в качестве контрольного элемента получены соотношения, определяющие его параметры. Для определения светового диаметра мениска и его абберрационного расчета необходимо знать его переднюю числовую апертуру. Удвоенное значение числовой апертуры вогнутой поверхности мениска равно



**Рис. 5.** Зависимости угла  $\alpha'$  от эксцентриситета  $e$  контролируемого выпуклого эллипсоида вращения при разных толщинах мениска. 1 –  $\tilde{d}_m = 0,1$ , 2 –  $0,2$ , 3 –  $0,3$ .

$2 \sin \omega = \frac{D}{2}$ . Передняя числовая апертура при расчете мениска в обратном ходе лучей равна  $\sin \sigma = \frac{1}{V} \sin \omega$ , где  $V$  – поперечное увеличение изображения оптически сопряженных геометрических фокусов, соответствующее решаемой задаче.

В качестве примера приведем результаты расчета оптической системы схемы контроля выпуклой поверхности вторичного зеркала объектива Кассегрена, имеющей форму гиперboloида вращения. Диаметр зеркала  $D = 143$  мм, вершинный радиус  $r_0 = 3090,235$  мм, эксцентриситет  $e = 6,334$ .

В результате расчета оптической системы получены следующие конструктивные параметры:

$r_1 = 447,304$		$n_1 = 1$
$r_2 = 451,357$	$d_1 = 15$	$n_2 = \text{K8}$
$r_3 = 3090,235$	$d_2 = 30$	$n_3 = 1$
$r_4 = 451,357$	$d_3 = -30$	$n_4 = -1$
$r_5 = 3090,235$	$d_4 = 30$	$n_5 = 1$
$r_6 = 451,357$	$d_5 = -30$	$n_6 = -1$
$r_7 = 447,304$	$d_6 = -15$	$n_7 = -\text{K8}$
		$n_8 = -1$

При  $s = -544,874$  мм,  $\sin \sigma = 0,13$  и  $\lambda = 632,8$  нм волновая абберрация не превосходит значения  $W = 0,05\lambda$ .

Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод, что рассмотренная схема контроля выпуклых несферических поверхностей вращения второго порядка в зависимости от величины и знака передней числовой апертуры вполне применима как самостоятельно, так и в качестве составной части, например, схемы интерферометра Физо.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. Перевод с англ. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
2. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.
3. Simpson F.A., Oland B.H., Meckel J. Testing Convex Aspheric Lens Surfaces with a Modified Hindle Arrangement // Opt. Eng. 1974. V. 13. G101.
4. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 218 с.
5. Зверев В.А., Кривоустова Е.В. Оптехника несферических поверхностей. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 203 с.