

А. Л. СУШКОВ

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЗЕЙДЕЛЕВЫХ АБЕРРАЦИЙ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрен аппарат расчета хода параксиальных лучей в осесимметричных неоднородных оптических средах с изменением показателя преломления по трем координатам. На примере линзы со сфероконцентрической неоднородностью показателя преломления показана практическая возможность расчета параксиальных отрезков и коэффициентов aberrаций третьего порядка оптической системы с неоднородными линзами.

*Ключевые слова:* неоднородный показатель преломления, коэффициенты aberrаций, линза со сфероконцентрическим градиентом показателя преломления.

Известные численные методы расчета хода реальных лучей через осесимметричные неоднородные среды связаны с решением дифференциальных уравнений второго порядка [1]. При этом анализ влияния коэффициентов полинома, описывающего распределение показателя преломления (РПП), и толщин градиентных линз на aberrации оптической системы затруднен из-за большого объема вычислений.

Цель настоящей статьи — продемонстрировать возможность введения в инженерную практику универсального алгоритма расчета хода параксиальных лучей и коэффициентов aberrаций третьего порядка систем, включающих неоднородные оптические элементы.

Теория aberrаций третьего порядка неоднородного оптического элемента не позволяет точно оценить величину aberrации, но обеспечивает получение намного большего объема информации относительно влияния поверхностей линз и неоднородных оптических сред на aberrации третьего порядка.

Как известно, теория aberrаций третьего порядка позволяет вычислить величины углов наклона и высоты первого и второго вспомогательных лучей. Для однородных систем формулы расчета коэффициентов aberrаций третьего порядка широко применяются в программах анализа оптических систем [2, 3].

В работах [4—6] представлен аппарат расчета aberrаций третьего порядка, построенный на вычислении параметров первого и второго вспомогательных лучей, проходящих через однородные и неоднородные осесимметричные оптические среды с произвольным законом распределения показателя преломления.

Условием расчета коэффициентов aberrаций в системе координат  $OXYZ$ , где ось  $Z$  — оптическая ось, является наличие известной функциональной зависимости углов наклона и высот первого и второго вспомогательных лучей в неоднородных средах.

В работе [5] функции высот и углов представлены в виде числовых рядов по координате  $z$ , которые обозначим через  $h(z)$ ,  $H(z)$  и  $\alpha(z)$ ,  $\beta(z)$ . В неоднородной среде угол наклона луча является производной от функции высоты луча:  $\alpha(z) = \dot{h}(z)$  и  $\beta(z) = \dot{H}(z)$ .

Согласно [4, 6] параксиальная высота  $y(z)$  произвольного луча может быть записана в виде линейной функции через его высоту на предмете ( $T$ ) и входном зрачке ( $Q$ ):

$$y(z) = h(z)Q + H(z)T, \tag{1}$$

где  $Q$  и  $T$  — нормированные координаты луча в плоскости входного зрачка и плоскости предмета.

Ход первого и второго вспомогательных лучей в системе координат, отнесенной к первой поверхности линзы, показан на рис. 1.

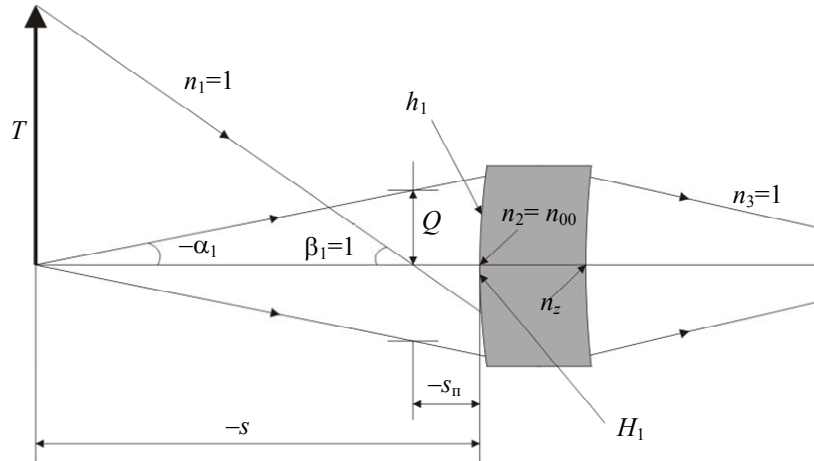


Рис. 1

В общем случае функция РПП оптической среды представляется в виде степенного ряда [5]

$$n(z, y) = n_0(z) + n_1(z)y^2 + n_2(z)y^4 + \dots, \tag{2}$$

где коэффициенты  $n_0(z)$ ,  $n_1(z)$ ,  $n_2(z)$ , в свою очередь, также представлены степенными рядами:

$$\left. \begin{aligned} n_0(z) &= n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots, \\ n_1(z) &= n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2 + \dots, \\ n_2(z) &= n_{20} + n_{21}z + n_{22}z^2 + \dots \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Контроль сходимости каждого из степенных рядов (3) производится путем сравнения величин параксиального инварианта  $I$  для каждой поверхности оптической системы. Обобщенный параксиальный инвариант  $I$  для  $k$ -й поверхности определяется как

$$I = n_k (H_k \alpha_k - h_k \beta_k), \quad k = \overline{1, p}. \tag{4}$$

Для первой и второй производных функции высоты луча  $y(z)$  (см. формулу (1)) справедливы выражения

$$\dot{y}(z) = \dot{h}(z)Q + \dot{H}(z)T, \quad \ddot{y}(z) = \ddot{h}(z)Q + \ddot{H}(z)T. \tag{5}$$

Дифференциальное уравнение для хода луча [5] в меридиональной плоскости в системе координат, отнесенной к предмету, имеет вид

$$\frac{\partial n(z, \xi)}{\partial z} (1 + \dot{y}^2) \dot{y} + n(z, \xi) \ddot{y} - (1 + \dot{y}^2) \frac{\partial n(z, \xi)}{\partial y} = 0, \tag{6}$$

где  $\xi = y^2$ .

Подстановка уравнений (5) в выражение (6) с исключением величин высшего порядка малости позволяет получить общую запись уравнения для обоих вспомогательных лучей.

Для первого вспомогательного луча при  $y(z)=h(z)$  выражение (6) преобразуется к виду

$$\ddot{h}(z)(n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots) + \dot{h}(z)(n_{01} + 2n_{01}z + \dots) - 2h(z)(n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2 + \dots) = 0. \quad (7)$$

С учетом того, что уравнение (7) должно удовлетворяться для всех  $Q$  и  $T$ , коэффициенты при них (в силу независимости величин  $Q$  и  $T$ ) должны быть равны нулю [5].

Решение (7) получено при представлении функции высоты луча  $h(z)$  в виде ряда

$$h(z) = \sum_{v=0}^{\infty} A_v z^v = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + \dots, \quad (8)$$

где  $A_0$  и  $A_1$  определяются высотой луча и углом его наклона к оптической оси на входе в неоднородную среду.

Первая и вторая производные функции высоты луча  $h(z)$  определяются как

$$\left. \begin{aligned} \dot{h}(z) &= \sum_{v=0}^{\infty} (v+1)A_{v+1}z^v = A_1 + 2A_2z + 3A_3z^2 + \dots, \\ \ddot{h}(z) &= \sum_{v=0}^{\infty} (v+2)(v+1)A_{v+2}z^v = 2A_2 + 6A_3z + 12A_4z^2 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставив выражения (9) в уравнение (7), получим

$$\begin{aligned} \sum_{v=0}^{\infty} (v+2)(v+1)A_{v+2}z^v [n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2] + \sum_{v=0}^{\infty} (v+1)A_{v+1}z^v [n_{01} + 2n_{02}z] - \\ - 2 \sum_{v=0}^{\infty} A_v z^v [n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Приравняв коэффициенты различных степеней в тождестве (10) к нулю, получим в общем случае рекурсивное соотношение для  $A_m$ :

$$\begin{aligned} A_m = \left\{ \sum_{v=2}^{m-1} [2A_{v-2}n_{1,m-v} - v(v-1)A_v n_{0,m-v} - (v-m+1)(v-1)A_{v-1}n_{0,m-v+1}] - \right. \\ \left. - (m-1)A_{m-1}n_{01} + A_{m-2}n_{10} \right\} / m(m-1)n_{00}. \end{aligned} \quad (11)$$

После задания показателей преломления по формулам (3) вычисляются коэффициенты  $A_m$  и определяются степенные ряды для высоты любого параксиального луча.

Угол преломления луча определяется по известным формулам параксиальной оптики однородных сред с учетом кривизны поверхности и с использованием величин  $n_{00}$  и  $n'_{00}$  в качестве показателей преломления.

Для проверки сходимости рядов (8) и (9) для каждой поверхности по формуле (4) вычисляется параксиальный оптический инвариант. Если значения инвариантов идентичны, то ряды сходятся и расчет продолжается. При несовпадении значений инвариантов необходимо увеличить точность расчета путем введения большего числа членов в разложении  $h(z)$ .

В системе координат, отнесенной к поверхности линзы, для коэффициентов aberrаций третьего порядка осесимметричной неоднородной оптической системы выражения известны [7]. Коэффициенты aberrаций являются суммой двух составляющих, обусловленных преломлением луча на поверхности ( $\bar{S}_{i,k}$ ) и прохождением луча через неоднородную среду ( $\tilde{S}_{i,k}$ ):

$$S_i = \bar{S}_{i,k} + \tilde{S}_{i,k}, \quad (12)$$

где  $S_i$ ,  $i = I \dots V$ , — коэффициент aberrаций третьего порядка оптической системы:  $S_I$  — сферическая aberrация,  $S_{II}$  — кома,  $S_{III}$  — астигматизм,  $S_{IV}$  — кривизна поля изображения,  $S_V$  — дисторсия.

Формулы для вычисления составляющей  $\bar{S}_{i,k}$  имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{S}_I &= \sum_{k=1}^p (h_k P_k + K_k h_k^4); \\
 \bar{S}_{II} &= \sum_{k=1}^p \left[ h_k P_k \left( \frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} \right) + K_k h_k^3 H_k \right]; \\
 \bar{S}_{III} &= \sum_{k=1}^p \left[ h_k P_k \left( \frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} \right)^2 + K_k h_k^2 H_k^2 \right]; \\
 \bar{S}_{IV} &= - \sum_{k=1}^p \left( \frac{\delta \mu_k}{r_k} \right); \\
 \bar{S}_V &= \sum_{k=1}^p \left\{ \left[ h_k P_k \left( \frac{\delta \alpha_k}{\delta \mu_k} \right)^2 + \frac{J^2}{h_k} \frac{\delta(\alpha_k n_k)}{n_k n_{k+1}} \right] \frac{\delta \beta_k}{\delta \alpha_k} + K_k h_k H_k^3 \right\}; \\
 K_k &= \frac{4 \delta n_{1,k}}{r_k} + \frac{\delta \dot{n}_{0,k}}{r_k^2}, \quad P_k = \left( \frac{\delta \alpha_k}{\delta \mu_k} \right)^2 \delta(\alpha_k \mu_k), \quad \mu_k = \frac{1}{n_k}; \\
 \delta \alpha_k &= \alpha'_k - \alpha_k, \quad \delta \beta_k = \beta'_k - \beta_k; \quad J = -n_1 (s_1 - s_{II}) \alpha_1 \beta_1, \quad s_1 \neq \infty; \quad J = -n_1 h_1 \beta_1, \quad s_1 = \infty,
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $s_1, s_{II}$  — расстояния от первой поверхности до предмета и входного зрачка оптической системы;  $\alpha_k, \beta_k, \alpha'_k, \beta'_k$  — величины углов падения и преломления первого и второго вспомогательных лучей для  $k$ -й поверхности;  $h_k, H_k$  — высоты первого и второго вспомогательных лучей на поверхности с радиусом кривизны  $r_k$ ;  $P_k, K_k$  — коэффициенты, учитывающие соответственно однородную и неоднородную природу оптической среды.

Составляющая  $\tilde{S}_{i,k}$  определяется следующими интегральными выражениями, где интегрирование ведется в пределах от 0 до  $d$  ( $d$  — толщина линзы):

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{S}_I &= \sum_{k=1}^p \left[ \Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k^3) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^4 + 4n_{1,k+1} h_{k+1}^2 \alpha_{k+1}^2 - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^4) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{II} &= \sum_{k=1}^p \left[ \Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k^2 \beta_k) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^3 H_{k+1} + \right. \\
 &\quad \left. + 2n_{1,k+1} h_{k+1} \alpha_{k+1} (h_{k+1} \beta_{k+1} + H_{k+1} \alpha_{k+1}) - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^3 \beta_{k+1}) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{III} &= \sum_{k=1}^p \left[ \Delta(n_{0,k} h_k \alpha_k \beta_k^2) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1}^2 H_{k+1}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 4n_{1,k+1} h_{k+1} H_{k+1} \alpha_{k+1} \beta_{k+1} - n_{0,k+1} \alpha_{k+1}^2 \beta_{k+1}^2) dz \right]; \\
 \tilde{S}_{IV} &= -2 \sum_{k=1}^p \int \frac{n_{1,k+1}}{n_{0,k+1}} dz; \\
 \tilde{S}_V &= \sum_{k=1}^p \left[ \Delta(n_{0,k} h_k \beta_k^3) - \int (8n_{2,k+1} h_{k+1} H_{k+1}^3 + \right. \\
 &\quad \left. + 2n_{1,k+1} H_{k+1} \beta_{k+1} (h_{k+1} \beta_{k+1} + H_{k+1} \alpha_{k+1}) - n_{0,k+1} \alpha_{k+1} \beta_{k+1}^3) dz \right],
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $\Delta$  — разность значений выражений в скобках, соответствующих параметру луча перед преломлением на второй поверхности и после преломления на первой поверхности.

При подстановке значений высот и углов наклона лучей (см. формулы (8), (9)) в систему уравнений (13) получаем значения составляющей  $\bar{S}_{i,k}$ , а при численном интегрировании функций углов и высот — составляющей  $\tilde{S}_{i,k}$ .

В сферической системе координат линейное сфероцентрическое распределение показателя преломления согласно [8] имеет вид

$$n(r - \rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1} (r - \rho), \quad (15)$$

где  $n_{\rho 0}$  — показатель преломления материала неоднородной среды в центре сферической системы координат,  $r$  — радиус сферического РПП,  $\rho$  — сферическая координата,  $n_{\rho 1}$  — линейный коэффициент РПП.

После подстановки значений  $r$  в формулу (15) получаем

$$n(\rho) = n_{\rho 0, \text{пр}} + n_{\rho 1, \text{пр}} \rho.$$

В последующих формулах для упрощения записи под величинами  $n_{\rho 0}$ ,  $n_{\rho 1}$  будем понимать их приведенные значения.

При переходе из сферической системы координат в прямоугольную, отнесенную к первой поверхности линзы, согласно [8] имеем

$$n_{00} = n_{\rho 0}, \quad n_{01} = n_{\rho 1}, \quad n_{10} = -n_{\rho 1} \frac{1}{2r}, \quad n_{11} = n_{\rho 1} \frac{1}{2r^2}, \quad n_{20} = n_{\rho 1} \frac{1}{8r^3}, \quad n_{21} = n_{\rho 1} \frac{3}{8r^4}.$$

Показатель преломления на оси  $z$  на выходе из неоднородной среды линзы определяется по формуле

$$n_z = n_{00} + n_{01} d.$$

Неоднородный ПП задается полиномом (2), где функции  $n_0(z)$ ,  $n_1(z)$ ,  $n_2(z)$  представляют собой линейные зависимости:

$$n_0(z) = n_{00} + n_{01} z, \quad n_1(z) = n_{10} + n_{11} z, \quad n_2(z) = n_{20} + n_{21} z.$$

Угол преломления луча на поверхности вычисляется по известной формуле для однородных сред:

$$\alpha' = \frac{h \frac{1}{R} (n' - n) + \alpha n}{n'}, \quad (16)$$

где  $R$  — радиус кривизны поверхности линзы.

Поскольку коэффициенты  $A_0 = h_1$ ,  $A_1 = -\alpha_2$  (см. формулу (8)), для коэффициентов полиномов высоты луча и угла его наклона согласно (11) получим

$$A_2 = \frac{2A_0 n_{10} - A_1 n_{01}}{2n_{00}}, \quad A_3 = \frac{A_1 n_{10} + A_0 n_{11} - A_2 n_{01}}{3n_{00}}, \quad A_4 = \frac{2A_2 n_{10} - 2A_1 n_{11} - 9A_3 n_{01}}{12n_{00}},$$

$$A_5 = \frac{A_3 n_{10} - A_2 n_{11} - 8A_4 n_{01}}{10n_{00}} \text{ и т. д.}$$

Высота  $h_2$  луча на второй поверхности согласно формуле (8) и угол  $\tilde{\alpha}_2$  на выходе из неоднородной среды согласно формуле (9) определяются полиномами

$$h_2 = A_0 + A_1d + A_2d^2 + A_3d^3 + A_4d^4 + A_5d^5, \quad (17)$$

$$\tilde{\alpha}_2 = -(A_1 + 2A_2d + 3A_3d^2 + 4A_4d^3 + 5A_5d^4).$$

Угол осевого луча в пространстве изображений согласно выражению (16) вычисляем по формуле

$$\alpha_3 = h_2 \frac{1}{R_2} (1 - n_z) + \tilde{\alpha}_2 n_z.$$

Заднее фокусное расстояние и задний фокальный отрезок линзы рассчитываются по известным зависимостям:  $f' = h_1 / \alpha_3$  и  $s'_{F'} = h_2 / \alpha_3$ .

Расчет высоты второго вспомогательного луча осуществляется по формулам (17) с заменой коэффициентов  $A_v$  на  $B_v$ :

$$H(z) = \sum_{v=0}^{\infty} B_v z^v = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + \dots \quad (18)$$

при следующих исходных данных:  $H_1 = s_{\text{п}}$ ,  $\beta_1 = 1$ ; коэффициенты  $B_0, B_1, B_2$  и т.д. вычисляются по формуле (18), при этом  $B_0 = H_1, B_1 = -\beta_2$ .

Значения параксиального инварианта для первой и второй поверхностей вычисляются как

$$I_1 = n_1 (H_1 \alpha_1 - h_1 \beta_1), \quad I_2 = n_z (H_2 \tilde{\alpha}_2 - h_2 \tilde{\beta}_2),$$

Функции углов и высот представляются полиномами

$$\alpha_2(z) = -(A_1 + 2A_2z + 3A_3z^2 + 4A_4z^3 + 5A_5z^4 + \dots), \quad (19)$$

$$h_2(z) = A_0 + A_1z + A_2z^2 + A_3z^3 + A_4z^4 + A_5z^5 + \dots;$$

$$\beta(z) = -(B_1 + 2B_2z + 3B_3z^2 + 4B_4z^3 + 5B_5z^4), \quad (20)$$

$$H(z) = B_0 + B_1z + B_2z^2 + B_3z^3 + B_4z^4 + B_5z^5.$$

Подстановка формул (19) и (20) в интегральные выражения (14) и численное интегрирование позволяют получить численные значения коэффициентов aberrаций  $S_1 \dots S_v$ .

Рассмотрим пример расчета коэффициентов aberrаций  $S_I$  и  $S_{II}$  одиночной линзы с линейным сфероконцентрическим РПП. Расчет производился при следующих параметрах линзы (рис. 2):  $r = 12,792$  мм,  $R_1 = 12,792$  мм,  $R_2 = 197,706$  мм,  $d = 1$  мм,  $n_{p0} = 1,65$ ,  $n_{p1} = 0,031551$  мм<sup>-1</sup>,  $s_{\text{п}} = 0$ ,  $f' = 20,00$  мм,  $s'_{F'} = 19,376$  мм.

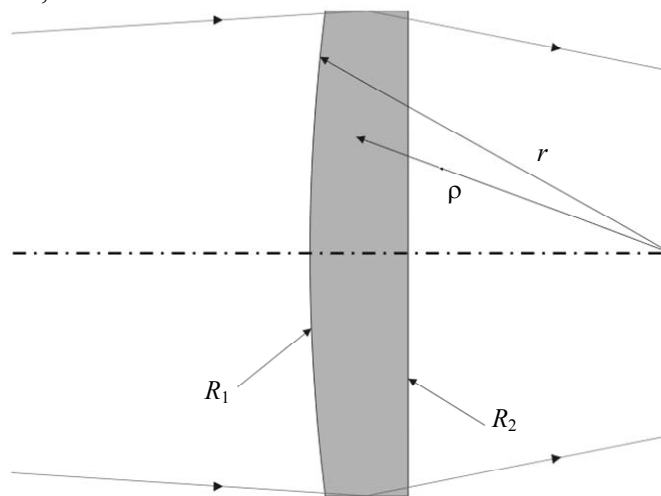


Рис. 2

В результате расчета углов наклона и высот первого и второго вспомогательных лучей по формулам (19), (20) при исходных  $\alpha_1 = 0, \beta_1 = 1, h_1 = f'$  получим:

$$\alpha_2=0,615964, \quad \tilde{\beta}_2 = 0,594224, \quad h_2=19,376600,$$

$$\alpha_3=1,000000, \quad \beta_3 = 1,001287, \quad H_2=-0,600180.$$

Значения параксиальных инвариантов для первой и второй поверхностей:

$$I_1 = -20,001824, \quad I_2 = -20,001825.$$

*Расчет коэффициента  $S_I$ .* Для однородной и неоднородной сред коэффициент  $\bar{S}_I$  (см. выражения (13)) рассчитывается соответственно как

$$\bar{S}'_I = h_1 P_1 + h_2 P_2; \quad \bar{S}''_I = K_1 h_1^4 + K_2 h_2^4,$$

где

$$K_1 = \frac{4n_{10}}{R_1} + \frac{n_{01}}{R_1^2}, \quad K_2 = -\frac{4(n_{10} + n_{11}z)}{R_2} - \frac{n_{01}}{R_2^2}.$$

Согласно выражениям (14) для составляющей  $\tilde{S}_{i,k}$  коэффициенты вычисляются следующим образом:

$$\tilde{S}_{I,1} = n_z h_2 \tilde{\alpha}_2^3 - n_2 h_1 \alpha_2^3; \quad \tilde{S}_{I,2} = \int_0^d n_0(z) \alpha^4(z) dz;$$

$$\tilde{S}_{I,3} = \int_0^d -4n_1(z) h^2(z) \alpha^2(z) dz, \quad \tilde{S}_{I,4} = \int_0^d -8n_2(z) h^4(z) dz.$$

По суммарному значению коэффициента  $S_I$ , определяемому как

$$S_I = \bar{S}'_I + \bar{S}''_I + \tilde{S}_{I,1} + \tilde{S}_{I,2} + \tilde{S}_{I,3} + \tilde{S}_{I,4},$$

вычисляется величина продольной сферической аберрации для края зрачка диаметром 5 мм:

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 u S_I, \quad \Delta s' = 0,000 \text{ мм},$$

где  $u$  — апертурный угол линзы в пространстве изображений.

*Расчет коэффициента  $S_{II}$ .* Для однородной среды коэффициент

$$\bar{S}'_{II} = h_1 P_1 \frac{\Delta\beta_1}{\Delta\alpha_1} + h_2 P_2 \frac{\Delta\beta_2}{\Delta\alpha_2},$$

для неоднородной —

$$\bar{S}''_{II} = K_1 h_1^3 H_1 + K_2 h_2^3 H_2.$$

Для составляющей  $\tilde{S}_{i,k}$  коэффициенты рассчитываются как

$$\tilde{S}_{II,1} = n_z h_2 \tilde{\alpha}_2^2 \beta_2 - n_2 h_1 \alpha_2^2 \beta_2;$$

$$\tilde{S}_{II,2} = \int_0^d n_0(z) \alpha^3(z) \beta(z) dz;$$

$$\tilde{S}_{II,3} = \int_0^d -2n_1(z) h(z) \alpha(z) [h(z) \beta(z) + H(z) \alpha(z)] dz,$$

$$\tilde{S}_{II,4} = \int_0^d -8n_2(z) h^3(z) H(z) dz.$$

Суммарная величина коэффициента  $S_{II}$ :

$$S_{II} = \bar{S}'_{II} + \bar{S}''_{II} + \tilde{S}_{II,1} + \tilde{S}_{II,2} + \tilde{S}_{II,3} + \tilde{S}_{II,4}.$$

Таблица 1

Коэффициент $S_I$	Коэффициент $S_{II}$
$\bar{S}'_I = 28,072$	$\bar{S}'_{II} = -0,744$
$\bar{S}''_I = -27,182$	$\bar{S}''_{II} = -0,114$
$\tilde{S}_{I,1} = 0,606$	$\tilde{S}_{II,1} = 0,203$
$\tilde{S}_{I,2} = 0,254$	$\tilde{S}_{II,2} = 0,244$
$\tilde{S}_{I,3} = 0,776$	$\tilde{S}_{II,3} = 0,366$
$\tilde{S}_{I,4} = -2,527$	$\tilde{S}_{II,4} = 0,039$
$S_I = 0,000$	$S_{II} = -0,004$

Анализ составляющих коэффициентов  $S_I$  и  $S_{II}$ , приведенных в табл. 1, показывает, что исправление сферической aberrации произошло за счет взаимной компенсации коэффициентов  $\bar{S}'_I, \bar{S}''_I$ , имеющих разные знаки, а исправление комы — за счет компенсации коэффициентов  $\bar{S}'_{II}, \bar{S}''_{II}$  и  $\tilde{S}_{II,1}, \tilde{S}_{II,2}, \tilde{S}_{II,3}, \tilde{S}_{II,4}$ . Суммарные величины коэффициентов  $S_I$  и  $S_{II}$  имеют близкие к нулю значения, что свидетельствует об апланатической коррекции aberrаций. Результаты расчета в программной среде OPAL продольной ( $\Delta s'$ ) и поперечной ( $\Delta y'$ ) сферической aberrаций, а также отклонения от условия изопланазии ( $\eta$ ) неоднородной и однородной линз приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

$m_{зр}$ , мм	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %
2,500	-0,0014	-0,0001	-0,0072
2,165	-0,0007	-0,0000	-0,0041
1,767	-0,0003	-0,0000	-0,0018
1,250	-0,0000	-0,0000	-0,0005
0,000	0,0000	0,0000	0,0000

Таблица 3

$m_{зр}$ , мм	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %
2,500	-0,2306	-0,0279	-0,0950
2,165	-0,1724	-0,0180	-0,0682
1,767	-0,1145	-0,0097	-0,0435
1,250	-0,0571	-0,0034	-0,0208
0,000	0,0000	0,0000	0,0000

Анализ табл. 2 и 3 показывает, что наличие линейной сфероконцентрической неоднородности показателя преломления линзы в области первой поверхности позволяет в 150 раз уменьшить сферическую aberrацию и более чем в 10 раз уменьшить отклонение от условия изопланазии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вычислительная оптика: Справочник / М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др.; Под общ. ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.
2. Инструкция к пакету программ OPAL [Электронный ресурс]: <www.aco.ifmo.ru>.
3. Инструкция к программе Zemax [Электронный ресурс]: <www.zemax.com>.
4. Buchdahl H. A. Optical Aberration Coefficients. N.Y., Dover, 1968. P. 1—18.
5. Moore D. T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction // JOSA. 1971. Vol. 62, N 7. P. 886—894.
6. Sands P. J. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses // JOSA. 1970. N 60. P. 1436.



7. Сушков А. Л. Монохроматические аберрации градиентов как базовых элементов жестких эндоскопов: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
8. Сушков А. Л. Параметры сфероконцентрического распределения показателя преломления в сферической и прямоугольной системах координат // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 12. С. 54—60.

***Сведения об авторе***

***Александр Леонидович Сушков*** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра оптико-электронных приборов научных исследований; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов  
научных исследований

Поступила в редакцию  
10.03.10 г.