

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 617.741 : 535.317

Г. А. Ленкова*(Новосибирск)***АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СФЕРИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ
МОДЕЛИ ГЛАЗА С ИНТРАОКУЛЯРНЫМИ ЛИНЗАМИ**

Предложен аналитический метод расчета сферических aberrаций модели глаза с интраокулярными линзами различных конструкций (рефракционными, дифракционными, гибридными). Метод позволяет представить aberrации оптических элементов глаза и характеристическое уравнение дифракционного компонента гибридной линзы в явном виде, т. е. в зависимости от параметров элементов и схемы глаза. Показано, что aberrации роговицы на порядок больше aberrаций рефракционного хрусталика и компонента гибридной конструкции. Введение безразмерного корректирующего коэффициента в характеристическое уравнение дифракционного компонента обеспечивает компенсацию aberrаций роговицы и рефракционного компонента.

Введение. Интраокулярная линза (ИОЛ) – это искусственный хрусталик глаза [1]. В настоящее время широко распространены операции по замене поврежденного катарактой естественного хрусталика на ИОЛ. Обычная ИОЛ представляет собой рефракционную линзу, выполненную из биологически совместимого материала.

Известно, что рефракционные линзы обладают собственными сферическими aberrациями даже при идеальном изготовлении их поверхностей. Для исправления этого недостатка в [2] предлагается изготавливать ИОЛ с асферическими поверхностями, но при этом не принимаются во внимание aberrации роговицы. Другая возможность устранения aberrаций ИОЛ заключается в применении дифракционной оптики [3]. В последнем случае ИОЛ выполняется в виде гибридной (дифракционно-рефракционной) линзы. Путем изменения радиусов зон дифракционного компонента компенсируются aberrации не только рефракционной составляющей ИОЛ, но также и роговицы глаза. Однако в работе [3] не рассматривается отдельно влияние каждого оптического элемента – роговицы, рефракционной и дифракционной составляющих ИОЛ на aberrации модели глаза.

Цель статьи – провести последовательный аналитический расчет модели глаза с рефракционной и гибридной интраокулярными линзами и определить aberrационный вклад всех оптических элементов. Это позволит сравнить степень влияния aberrаций того или иного элемента на качество изображения, проанализировать возможные пути снижения aberrаций, а также получить аналитически характеристическое уравнение дифракционного компонента гибридной ИОЛ.

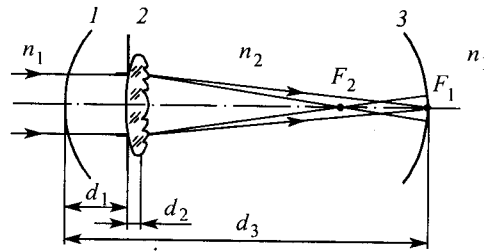


Рис. 1. Модель глаза с бифокальной гибридной интраокулярной линзой: 1 – роговица, 2 – ИОЛ, 3 – сетчатка; d_1 – расстояние от роговицы до ИОЛ, d_2 – толщина ИОЛ, d_3 – длина оптической оси глаза; F_1 , F_2 – фокальные точки для дальнего и ближнего зрения; n_1 , n_2 – показатели преломления воздуха, водянистой влаги и стекловидного тела

1. Модель глаза. Оптическая схема глаза (рис. 1) включает роговицу, хрусталик и сетчатку. Пространство между роговицей и хрусталиком заполнено водянистой влагой, а между хрусталиком и сетчаткой находится стекловидное тело. На рисунке представлена модель глаза с искусственным хрусталиком в виде бифокальной дифракционно-рефракционной ИОЛ.

Общепринятой моделью глаза считается схематический глаз по Гультранду [4]. Наши расчеты проводились на основе его параметров, но с некоторыми изменениями. Для упрощения аналитического рассмотрения роговица, образуемая поверхностями с радиусами кривизны, равными 7,7 и 6,8 мм, заменялась преломляющей поверхностью с усредненным радиусом кривизны, что обеспечивало аналогичную преломляющую силу. Расстояние от вершины роговицы до передней поверхности ИОЛ выбрано равным расстоянию от вершины роговицы до ядра естественного хрусталика. В табл. 1 приводятся оптические характеристики модели глаза, которые применялись при расчетах. Исследование aberrаций проводилось в монохроматическом свете для двух конструкций ИОЛ: однофокусной рефракционной и бифокальной гибридной (дифракционно-рефракционной).

2. Геометрические и волновые aberrации. Качество изображения принято характеризовать величиной волновых aberrаций. Изображение считается близким к идеальному, если отступление волновой поверхности от сферы не превышает $1/4$ длины волны (критерий Рэлея). Далее будут рассматриваться только сферические aberrации.

Если сначала рассчитать геометрические aberrации (например, продольную сферическую aberrацию $\Delta S'_y$), а затем перейти к волновым h_y , то они могут быть определены из следующего соотношения [5]:

$$h_y = - \int_0^y \Delta S'_y \frac{y}{S'^2} dy, \quad (1)$$

где y – высота входа луча; S' – расстояние от задней главной плоскости оптического элемента до изображения на оси в параксиальной области.

2.1. Сферические aberrации роговицы. Роговица глаза в первом приближении имеет сферическую форму. Только начиная приблизительно с диаметра зрачка, равного 4 мм, она становится постепенно асферической [6]. Так как качество интраокулярных линз принято оценивать по Международному стандарту ISO [7] на диаметре 3 мм, то полагаем при расчетах, что поверхность роговицы сферическая.

Т а б л и ц а 1

Оптические параметры		
Наименование	Обозначение	Значение
Длина волны, мкм	λ_0	0,5893
Показатели преломления		
Воздух	n_1	1
Водянистая влага и стекловидное тело	n_2	1,336
Хрусталик (из ПММА)	n_3	1,491
Роговица		
Усредненный радиус кривизны, мм	r_1	7,805
Заднее фокусное расстояние, мм	f_1	31,03
Оптическая сила, дптр	D_1	43,05
Хрусталик		
Радиус кривизны ВП-линзы, мм	r_2	8,995
Радиусы кривизны ДВ-линзы, мм	r_{21}, r_{22}	$\pm 17,99$
Заднее фокусное расстояние линзы, мм	f_2	77,53
Оптическая сила бифокальной ИОЛ (дптр): при дальнем зрении, при ближнем зрении	D_f D_n	17,23 23,4
Толщина, мм	d_2	0,7
Фокусное расстояние дифракционного компонента, мм	f_3	216,526
Расстояние от вершины роговицы		
Первая поверхность ИОЛ, мм	d_1	4,15
Главная плоскость роговицы, мм	d_0	-0,05
Сетчатка, мм	d_3	24

Продольная сферическая aberrация $\Delta S'_{1y}$ роговицы, представленной в виде одной преломляющей поверхности, может быть вычислена в первом приближении по следующей формуле, полученной на основе [5]:

$$\Delta S'_{1y} = -y_1^2 (S'_1)^2 a_0 / 2n_c^3, \quad (2)$$

где $\Delta S'_1$ – смещение изображения относительно параксиальной области; y_1 – высота входа луча в роговицу; $a_0 = (n_c - 1)(\rho_1 - \sigma_1)^2 [\rho_1 - (n_c + 1)\sigma_1]$; $n_c = n_2/n_1$ (n_1, n_2 – показатели преломления воздуха и внутренней среды глаза);

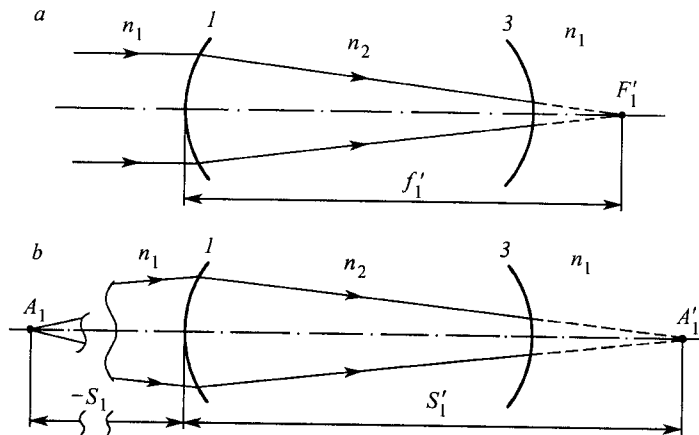


Рис. 2. Формирование точечного изображения за роговицей при положении предмета в бесконечности (а) и на конечном расстоянии (б): F'_1, f'_1 – задние фокальная точка и фокусное расстояние роговицы; A_1, S_1 – предмет и его расстояние до роговицы; A'_1, S'_1 – изображение и его расстояние от роговицы

$\rho_1 = 1/r_1$ (r_1 – усредненный радиус кривизны роговицы); $\sigma_1 = 1/S_1$ (S_1, S'_1 – расстояния от точечного объекта и изображения до роговицы). Подставляя (2) в (1), получаем

$$h_{1y} = y_1^4 a_0 / 8n_c^3. \quad (3)$$

Рассмотрим две характерные ситуации: предмет в бесконечности ($S_1 = -\infty$) (рис. 2, а) и на конечном расстоянии S_1 (рис. 2, б). В первом случае ($\sigma_1 = 0$) промежуточное изображение будет формироваться в фокальной области роговицы и $\Delta S'_{1y}$ переходит в отклонение $\Delta f'_{1y}$ от параксиального фокусного расстояния f'_1 , а формулы (2) и (3) принимают вид:

$$\Delta f'_{1y} = -y_1^2 (f'_1)^2 a_{0f} / 2n_c^3, \quad (2f)$$

$$h_{1yf} = y_1^4 a_{0f} / 8n_c^3, \quad (3f)$$

где $a_{0f} = (n_c - 1)\rho_1^3$. Во втором случае смещение изображения и волновая aberrация определяются по формулам (2) и (3).

Подставляя в (2) и (2f) значения символов из табл. 1, получаем для $S_1 = -250$ мм (расстояние наилучшей видимости) и для $S_1 = -\infty$ (дальнее зрение) следующие значения:

$$\Delta S'_{1y} = -1,979 \cdot 10^{-1} y^2, \quad (2a)$$

$$\Delta f'_{1y} = -1,427 \cdot 10^{-1} y^2. \quad (2fa)$$

Волновые aberrации для второго (см. рис. 2, б) и первого (см. рис. 2, а) случаев в соответствии с (3) и (3f) составят:

$$h_{1y} = 4,227 \cdot 10^{-5} y^4, \quad (3a)$$

$$h_{1yf} = 3,705 \cdot 10^{-5} y^4. \quad (3fa)$$

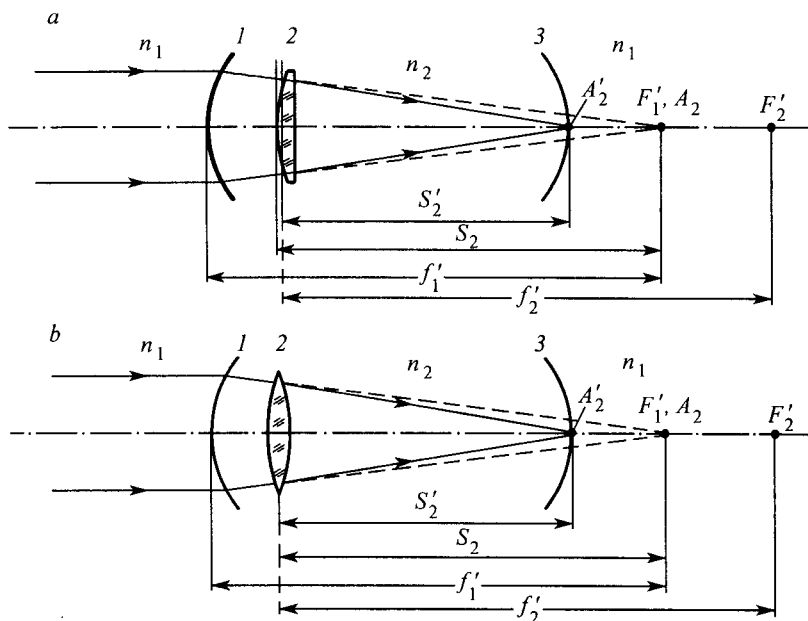


Рис. 3. Формирование точечного изображения за рефракционной ВП ИОЛ (а) и ДВ ИОЛ (б) при положении предмета перед роговицей в бесконечности: F'_2, f'_2 – задние фокальная точка и фокусное расстояние рефракционной ИОЛ; A_2, S_2 – предмет и его расстояние от ИОЛ; A'_2, S'_2 – изображение и его расстояние от ИОЛ

Из сравнения (2а) и (2fa), (3а) и (3fa) видно, что при ближнем зрении aberrации роговицы несколько больше, чем при дальнем.

2.2. *Сферические aberrации рефракционной линзы.* ИОЛ внутри глаза работает как рефракционная линза в сходящемся световом пучке. Предмет A_2 для ИОЛ располагается за линзой (рис. 3).

В общем случае аналитическое выражение продольной сферической aberrации $\Delta S'_{2y}$ рефракционной линзы может быть представлено на основании [5] в виде

$$\Delta S'_{2y} = -y_2^2 (S'_2)^2 b_0 / 2n_i^3, \quad (4)$$

где y_2 – высота входа луча в линзу;

$$b_0 = (n_i - 1)(\rho_{21} - \rho_{22}) \{ n_i^3 (\rho_{21} - \rho_{22})^2 - n_i (\rho_{21} - \rho_{22}) \times \\ \times [(\rho_{21} - \sigma_2)(2n_i + 1) - n_i \sigma_2] + (\rho_{21} - \sigma_2)[(\rho_{21} - \sigma_2)(n_i + 2) - 2n_i \sigma_2] \};$$

$n_i = n_3/n_2$ (n_2, n_3 – показатели преломления внутренней среды глаза и материала ИОЛ); $\rho_{21} = 1/r_{21}, \rho_{22} = 1/r_{22}$ (r_{21}, r_{22} – радиусы кривизны поверхностей ИОЛ); $\sigma_2 = 1/S_2$ (S_2, S'_2 – расстояния от предмета и изображения до линзы). При $S_2 = \infty$ ($\sigma_2 = 0$) $\Delta S'_{2y}$ (см. (4)) переходит в отклонение $\Delta f'_{2y}$ от фокусного расстояния f'_2 рефракционной линзы:

$$\Delta f'_{2y} = -y_2^2 (f'_2)^2 b_{0f} / 2n_i^3, \quad (4f)$$

Т а б л и ц а 2

S_1	S'_1	S_2	S'_2	S_3	S'_3
$-\infty$	31,03	26,83	19,93		
-250	34,21	30,01	21,63	21,00	19,15

где

$$b_{0f} = (n_i - 1)(\rho_{21} - \rho_{22})[n_i^3(\rho_{21} - \rho_{22})^2 - n_i(\rho_{21} - \rho_{22})\rho_{21}(2n_i + 1) + \rho_{21}^2(n_i + 2)].$$

Подставляя (4) и (4f) в (1), получим

$$h_{2y} = y_2^4 b_0 / 8n_i^3, \quad (5)$$

$$h_{2yf} = y_2^4 b_{0f} / 8n_i^3. \quad (5f)$$

Рассмотрим aberrации двух наиболее распространенных форм ИОЛ (выпукло-плоской (ВП) и двояковыпуклой (ДВ)), имеющих равные фокусные расстояния и, следовательно, равные оптические силы. Aberrации определялись для предметов перед глазом на расстояниях $S_1 = -\infty$ и $S_1 = -250$ мм. Соответствующие расстояния (в мм) изображения от роговицы S'_1 и этого же изображения как предмета от главной плоскости линзы S_2 , рассчитанные на основании данных табл. 1, приведены в табл. 2. Значения продольных и волновых сферических aberrаций ($\Delta S'_{2y}$ и h_{2y}), вычисленные по формулам (4) и (5) для ВП- и ДВ-линз с параметрами, указанными в табл. 1, приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что для той и другой формы линз продольные aberrации $\Delta S'_{2y}$ при $S_1 = -\infty$ незначительно меньше, чем при $S_1 = -250$ мм (приблизительно на 12 и 35 %). Однако в обоих случаях aberrации ВП-линз в несколько раз меньше, чем ДВ-линз: в первом – в 4,06, а во

Т а б л и ц а 3

Aberrации	ВП ИОЛ		ДВ ИОЛ	
	$S_1 = -\infty$	$S_1 = -250$ мм	$S_1 = -\infty$	$S_1 = -250$ мм
$\Delta S'_{2y} / y^2$	$-8,208 \cdot 10^{-3}$	$-9,927 \cdot 10^{-3}$	$-3,333 \cdot 10^{-2}$	$-3,450 \cdot 10^{-2}$
h_{2y} / y^4	$5,166 \cdot 10^{-6}$	$5,305 \cdot 10^{-6}$	$2,098 \cdot 10^{-5}$	$1,842 \cdot 10^{-5}$
$\Delta f'_{2y} / y^2$	$-3,864 \cdot 10^{-1}$ в среде		$-1,569 \cdot 10^{-1}$ в среде	
$\Delta f'_{2y} / y^2$	$-6,594 \cdot 10^{-2}$ в воздухе		$-9,254 \cdot 10^{-2}$ в воздухе	
h_{2yf} / y^4	$1,605 \cdot 10^{-5}$ в среде		$6,526 \cdot 10^{-6}$ в среде	
h_{2yf} / y^4	$4,912 \cdot 10^{-5}$ в воздухе		$6,893 \cdot 10^{-5}$ в воздухе	

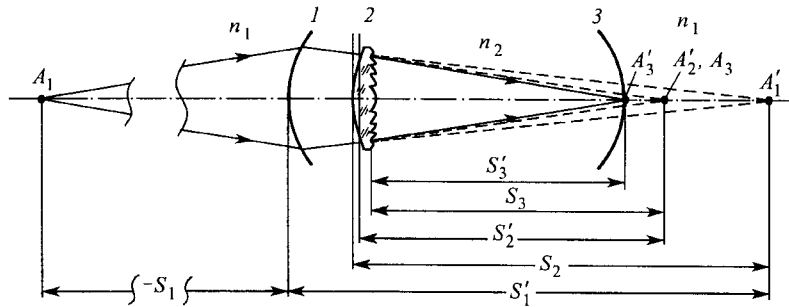


Рис. 4. Формирование изображения за бифокальной гибридной ИОЛ при положении предмета A_1 перед роговицей на конечном расстоянии S_1 ; 1 – роговица, 2 – ИОЛ, 3 – сетчатка; A_3, S_3 – предмет и его расстояние от дифракционного компонента ИОЛ; A'_3, S'_3 – изображение и его расстояние от дифракционного компонента ИОЛ

втором – в 3,47 раза. Так как волновые aberrации пропорциональны продольным геометрическим (см. (1)), то характер соотношений волновых aberrаций h_{2y} для ВП- и ДВ-линз будет аналогичным $\Delta S'_{2y}$ (см. табл. 3).

Иногда качество изображений ИОЛ оценивают в параллельном пучке [8, 9]. Однако такой метод характеризует только качество изготовления и не подходит для сравнения собственных aberrаций ИОЛ различных конструкций. В табл. 3 приведены значения сферических aberrаций ($\Delta f'_{2y}$ и h_{2yf}) ВП- и ДВ-линз, расположенных в параллельном пучке. В отличие от данных для сходящегося пучка ($\Delta S'_{2y}$ и h_{2y}) сферические aberrации в фокальной плоскости ($\Delta f'_{2y}$ и h_{2yf}), рассчитанные на основе (4f) и (5f), в среде, наоборот, больше для ВП-линз (приблизительно в 2,46 раза), чем для ДВ-линз, а в воздухе меньше в 1,4 раза.

Следует отметить, что волновые aberrации в сходящемся пучке (h_{2y}) в среде для ВП-линз приблизительно в 3,1 раза меньше, а для ДВ-линз приблизительно в 3,2 раза больше, чем в параллельном пучке (h_{2yf}).

На основании табл. 3 можно оценить значение продольных и волновых сферических aberrаций при различных апертурах линз. Например, при $S_1 = -\infty$ и диаметре апертуры, равном 3 мм ($y = 1,5$ мм), эти величины составляют $\Delta S'_{2y} \approx -0,02$ и $-0,08$ мм, а $h_{2y} \approx 0,06$ и $0,2$ длины волны соответственно для ВП- и ДВ-линз.

2.3. Дифракционная линза. В отличие от роговицы и рефракционной линзы, обладающих собственными aberrациями, дифракционная линза может быть рассчитана таким образом, чтобы исключить возможные сферические aberrации. Внутри глаза дифракционный компонент располагается в сходящемся пучке (рис. 4). Если его зоны выполнять так же, как в обычной зонной пластинке, т. е. полагать, что радиусы зон пропорциональны корню квадратному из целых чисел, то будут наблюдаться сферические aberrации. Причем подобно рефракционной линзе при увеличении высоты входа лучей точка пересечения их с оптической осью будет приближаться к дифракционной линзе. Для приведения всех входящих лучей к одной точке схождения характеристическое уравнение должно корректироваться на величину волновой aberrации, равную [10]

$$h_{3y} = (y^4 / 8f^3)(3f^2 / S^2 + 3f / S + 1), \quad (6)$$

где f – фокусное расстояние дифракционной линзы; S – расстояние от предмета до линзы. В зависимости от того, является дифракционный элемент компонентом гибридной (дифракционно-рефракционной) ИОЛ или собственно ИОЛ, $f = f_3$ и $S = S_3$ или $f = f_2$ и $S = S_2$. Подставляя в (6) значения f_3 и S_3 из табл. 1 и 2, получим

$$h_{3y} = 4,32 \cdot 10^{-6} y^4 \quad (6a)$$

2.4. *Сферические aberrации модели глаза с рефракционной ИОЛ (дальнее зрение)*. Оптическая сила однофокусной ИОЛ обычно выбирается таким образом, чтобы на сетчатку глаза проецировалось пятно минимального рассеяния от удаленного предмета ($S_1 = -\infty$). Для параметров модели глаза, данных в табл. 1, оптическая сила ИОЛ должна составлять 17,23 дптр. Такой же оптической силой должен обладать рефракционный компонент в гибридной конструкции ИОЛ [3]. В последнем случае при дальнем зрении дифракционный компонент не участвует в формировании изображения и гибридная линза работает как чисто рефракционная.

На основании (3fa) и табл. 3 суммарные сферические волновые aberrации глаза с рефракционной ИОЛ могут быть представлены следующими выражениями соответственно для выпукло-плоской (7) и двояковыпуклой (8) линз:

$$h_y = h_{1y} + h_{2y} = (6,669 \cdot 10^{-5} + 5,166 \cdot 10^{-6}) y^4 = 7,185 \cdot 10^{-5} y^4, \quad (7)$$

$$h_y = h_{1y} + h_{2y} = (6,669 \cdot 10^{-5} + 2,098 \cdot 10^{-5}) y^4 = 8,767 \cdot 10^{-5} y^4. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) первое слагаемое представляет волновую aberrацию роговицы ($3,705 \cdot 10^{-5} y^4$), умноженную на коэффициент согласования высот входа луча в роговицу и линзу, равный 1,8 (отношение высот для параметров табл. 1 составляет 1,158). Второе слагаемое – aberrации рефракционной линзы или рефракционного компонента. При диаметре апертуры, равном 3 мм, aberrации глаза с ВП и ДВ ИОЛ составляют соответственно $\sim 0,8$ и 1 λ .

Если на основании (1) перейти от (7) и (8) к соответствующей суммарной продольной aberrации роговицы и линзы, то получим при $S'_2 = 19,93$ мм (см. табл. 2)

$$\Delta S'_{2y} = -1,141 \cdot 10^{-1} y^2, \quad (7a)$$

$$\Delta S'_{2y} = -1,392 \cdot 10^{-1} y^2. \quad (8a)$$

При этих значениях $\Delta S'_{2y}$ угловой размер пятна минимального рассеяния α , вычисленный по формуле, аналогичной (2.7) из [11]:

$$\alpha = \frac{y \Delta S'_{2y}}{2S_2'^2}, \quad (9)$$

составит $\alpha = 1,436 \cdot 10^{-4} y^3$ (ВП); $1,753 \cdot 10^{-4} y^3$ (ДВ) или при $y = 1,5$ мм $\alpha = 4,85 \cdot 10^{-4}$ ($1,67'$); $5,92 \cdot 10^{-4}$ ($2,03'$). Последние значения соответствуют угловому размеру предмета в воздухе, равному $n_2 \alpha$, т. е. $2,23'$ и $2,7'$, или расчет-

ной остроте зрения (без учета физиологии глаза), равной 0,45 (ВП) и 0,37 (ДВ).

Если для обеспечения ближнего зрения применяют бифокальные рефракционные ИОЛ, то в них часть линзы выполняется с большей оптической силой, чем требуется для дальнего зрения. Можно показать без подробного вывода, что в этом случае сферические aberrации схематического глаза для ближнего зрения будут больше, чем для дальнего. Действительно, из сравнения (3а) и (3fa) видно, что aberrации роговицы увеличиваются приблизительно на 14 %. Дополнительно с увеличением оптической силы возрастают aberrации самой ИОЛ [2, 11].

2.5. *Сферические aberrации модели глаза с гибридной (дифракционно-рефракционной) ИОЛ (ближнее зрение).* Гибридная ИОЛ [3] функционально состоит из двух компонентов: рефракционного и дифракционного. В 0-м порядке дифракции она работает как рефракционная ИОЛ (дальнее зрение, см. п. 2.4), в +1-м – оптические силы компонентов складываются. Дифракционный компонент в гибридной линзе предназначен для создания второй оптической силы (ближнее зрение). Кроме того, он может компенсировать сферические aberrации роговицы и рефракционного компонента. Для этого необходимо ввести в (6а) дополнительно волновые aberrации роговицы h_{1y} и рефракционной линзы h_{2y} . В результате с учетом (3а), табл. 3 и (6а) получим суммарное значение поправочного члена h_y в виде

$$\begin{aligned} h_y &= h_{1y} + h_{2y} + h_{3y} = (7,195 \cdot 10^{-5} + 5,305 \cdot 10^{-6} + 4,32 \cdot 10^{-6})y^4 = \\ &= 8,158 \cdot 10^{-5} y^4. \end{aligned} \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) (aberrации роговицы) больше значения h_{1y} из (3а) в 1,7 раза. Этот коэффициент вводится для согласования высот входа луча в роговицу и линзу. На основании параметров оптической схемы (см. табл. 1) отношение высот при ближнем зрении равно 1,142. Аналитическое выражение h_y не приводится ввиду его сложности особенно при конечных значениях S_1 ($S_1 = -250$ мм). На рис. 5 представлены изменения волновых aberrаций h_{1y} , h_{2y} , h_{3y} и h_y (λ) и продольной сферической aberrации $\Delta S'_y$ (дптр), соответствующей h_y , в зависимости от высоты входа луча в ИОЛ (y).

Структура колец дифракционного элемента, формирующего безaberrационное изображение, в данном случае определяется из следующего соотношения [10]:

$$k\lambda = (y^2/2f_3) - c(y^4/8f_3^3), \quad (11)$$

где $\lambda = \lambda_0/n_2$ (λ , λ_0 – длины волн в среде и вакууме; n_2 – показатель прелом-

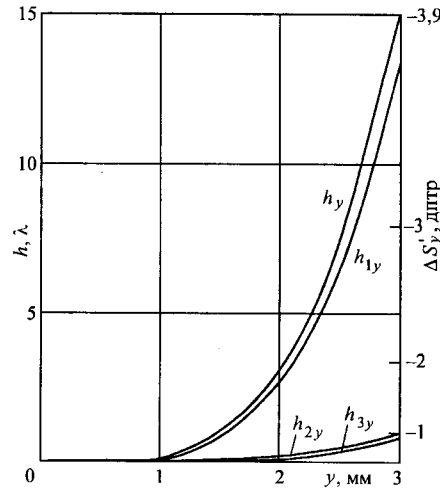


Рис. 5. Изменение продольной $\Delta S'_y$ и волновой (h) aberrаций в зависимости от высоты входа луча в ИОЛ (y)

ления среды). Коэффициент c характеризует отклонение топологии зон в сравнении с обычной дифракционной линзой, для которой $c = 1$. В нашей трактовке $c(y^4/8f_3^3) = h_y$, и, следовательно, при значениях h_y из (10) и f_3 из табл. 1 будем иметь $c = 6622$. Подставляя c и f_3 в (11), получаем характеристическое уравнение

$$k\lambda_0 = 3,085 \cdot 10^{-3} y^2 - 1,089 \cdot 10^{-4} y^4. \quad (12)$$

Если в (11) положить $c = 1$, то это приведет к волновым aberrациям h_y в изображении на сетчатке, равным $(6622 - 1)y^4/8f_3^3$, что соответствует при $y = 1,5; 2; 3$ мм $h_y = 1; 2,2; 11,2$ мкм ($\sim 2; 4; 20\lambda$).

Уравнение (12) практически совпадает с результатом, полученным при лучевом расчете бифокальной гибридной ИОЛ на ЭВМ по программе DEMOS [3]. Расхождение составляет лишь $-1,44 \cdot 10^{-5} y^4$, что соответствует сферической aberrации, равной $0,1\lambda$ на диаметре 3 мм (стандарт ISO [7]), а на диаметре 5 мм -1λ при допуске $\pm 3\lambda$. Таким образом, аналитический расчет дает довольно точный результат для формулы зон дифракционного компонента. Кроме того, подтверждается возможность представления роговицы в виде одной преломляющей поверхности с усредненным радиусом кривизны.

3. Анализ волновых aberrаций схематического глаза с интраокулярными линзами. Как следует из (7) и (8), в модели глаза с рефракционной линзой/компонентом (дальнее зрение) преобладают сферические aberrации роговицы (первое слагаемое). Aberrации рефракционной ИОЛ (второе слагаемое) меньше соответственно в 12,9 раза или 3,2 раза в зависимости от формы ИОЛ (ВП или ДВ). Из формул (7) и (8) видно также, что aberrации ДВ-линзы больше в 4,1 раза, чем ВП-линзы, хотя общая aberrация увеличивается в выражении (8) по сравнению с (7) приблизительно на 22 %.

В работе [2] анализируются aberrации ИОЛ в среде в сходящемся пучке в зависимости от формы поверхностей. Показано, что наилучшие результаты при стандартной оптической силе (21 дптр) имеют ИОЛ с отношением радиусов кривизны передней и задней поверхности меньше чем 1 : 3, для более сильных линз предпочтительнее формы с отношением от 1 : 6 до 1 : 7, для слабых линз удовлетворительные результаты достигаются при любой геометрии линз. Для уменьшения собственных aberrаций рефракционных линз в [2] предлагается заменить сферические поверхности ИОЛ на асферические. Анализ aberrаций асферических ИОЛ проводился в [2] на основе модели глаза, в которой действие роговицы имитировалось дифракционно-ограниченным, т. е. безaberrационным, объективом. Таким образом, aberrации роговицы не учитывались, хотя, как показано выше, они могут быть на порядок больше, чем собственные aberrации ИОЛ. Путем асферизации ИОЛ можно было бы компенсировать также aberrации роговицы, но, насколько нам известно, в опубликованной литературе об этом не сообщается. Следует сказать, что, несмотря на привлекательность ИОЛ с асферическими поверхностями, изготовление последних существенно усложняет процесс производства и повышает стоимость ИОЛ.

Более перспективной представляется компенсация aberrаций с помощью дифракционной оптики. Как показано в разд. 2.5, при формировании изображений близких предметов с помощью гибридной ИОЛ aberrации роговицы больше aberrаций рефракционного компонента приблизительно в

13,6 раза (ср. первое и второе слагаемое в (10)). Путем правильного подбора коэффициента c в характеристическом уравнении (11) полностью компенсируются aberrации роговицы и рефракционного компонента и изображение становится идеальным в отличие от изображения удаленных предметов.

В принципе, острота дальнего зрения также может быть улучшена с помощью дифракционной оптики. Например, фазовый профиль дифракционного элемента в гибридной конструкции можно выполнить так, чтобы свет направлялся в +1-й (дальнее зрение) и +2-й (ближнее зрение) порядки или в ± 1 -й порядки. Как видно из выражений (7) и (10), суммарные aberrации роговицы и рефракционного компонента при $S_1 = -\infty$ и $S_1 = -250$ мм мало отличаются ($\sim 10\%$). Следовательно, коэффициенты c в характеристических уравнениях дифракционных элементов в первой и второй конструкции для ближнего и дальнего зрения будут близки по значению друг другу и достаточно будет ввести в уравнение зон среднее значение c .

Следует отметить, что все расчеты проводились для монохроматического света, для стандартной длины волны $\lambda_0 = 0,5893$ мкм. В белом свете характер aberrаций глаза будет зависеть от конструкции ИОЛ. Например, в гибридной ИОЛ с положительным дифракционным компонентом [3] хроматические aberrации роговицы, рефракционного и дифракционного компонентов частично взаимно компенсируются, но тем не менее на диаметре 3 мм расчетные вторичные угловые aberrации составляют $\sim 1,5'$. В конструкции ИОЛ с ± 1 -ми порядками хроматические aberrации дифракционного и рефракционного элементов в +1-м порядке частично компенсируются, а в -1-м — увеличиваются. Последнее является недостатком такой конструкции, наряду с преимуществом относительно компенсации aberrаций роговицы одновременно для ближнего и дальнего зрения.

Рассмотренный аналитический метод расчета характеристического уравнения дифракционного компонента ИОЛ и aberrаций модели глаза может рекомендоваться как предварительный расчет для ИОЛ различных конструкций. Окончательное заключение о преимуществах той или иной конструкции ИОЛ можно дать на основании aberrационных расчетов в белом свете с применением лучевых методов путем определения модуляционно-передаточных функций, распределения интенсивности в пятне минимального рассеяния и т. д.

Важное значение имеет выбор оптической силы дифракционного компонента относительно суммарной оптической силы роговицы и рефракционного компонента, причем не только в связи с компенсацией хроматических aberrаций, но также из-за размера центральных зон. Чем больше фокусное расстояние компонента, тем меньше зон располагается в апертуре зрачка глаза и меньше концентрация световой энергии на оси в фокальной плоскости. Необходимая степень компенсации хроматических aberrаций зависит также от физиологических особенностей глаза.

Заключение. Предложен аналитический метод, позволяющий быстро и достаточно точно рассчитать геометрические и волновые aberrации модели глаза с рефракционными, дифракционными и гибридными ИОЛ, а также определить характеристическое уравнение дифракционного компонента гибридной ИОЛ. Особенность метода заключается в том, что aberrации и характеристическое уравнение представляются в явном виде, т. е. в зависимости от параметров оптических элементов и схемы глаза. Введение коррекционного коэффициента в уравнение обеспечивает компенсацию aberrаций роговицы, рефракционного и дифракционного компонентов. Возможности

метода иллюстрируются на примере стандартной модели глаза, однако метод можно применять и для любых других параметров глаза.

Анализ сферических aberrаций оптических элементов схематического глаза с интраокулярными линзами показал, что преимущественное влияние на качество изображения оказывает роговица, aberrации которой могут быть на порядок больше, чем aberrации рефракционного искусственного хрусталика. Проведено сравнение волновых сферических aberrаций выпукло-плоских и двояковыпуклых ИОЛ. Показано, что в среде в сходящемся пучке (внутри глаза) угловые aberrации ВП ИОЛ в 4,1 раза меньше, чем aberrации ДВ ИОЛ. Получено характеристическое уравнение для вычисления радиусов зон дифракционного компонента гибридной бифокальной ИОЛ.

Автор выражает признательность В. П. Коронкевичу за обсуждение статьи и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров С. Н. Имплантация искусственного хрусталика. М.: Медицина, 1977.
2. Meunier P. MTF optimization in IOL design // Proc. of Ophthalmic Lens Design and Fabrication II. Los Angeles, California: SPIE. 1994. 2127. P. 15.
3. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Исаков И. А. и др. Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза // Автометрия. 1997. № 6. С. 26.
4. Овчинникова Б. В., Полонская А. А., Полякова И. П. Оптическая модель глаза // Опт. журн. 1996. № 3. С. 74.
5. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. М.: ОГИЗ, 1946.
6. Lotmar W. Theoretical eye model with aspherics // JOSA. 1971. 61, N 11. P. 1522.
7. ISO/DIS 11979-2. Optics and Optical Instruments – Intraocular Lenses. Pt. 2: Optical Properties and their Methods, 1996.
8. Ленкова Г. А., Коронкевич В. П., Исаков И. А. и др. Исследование оптического качества интраокулярных линз // Автометрия. 1997. № 3. С. 18.
9. Grossman L. W., Faaland R. W. Minimum resolution specification of intraocular lens implants using the modulation transfer function // Appl. Opt. 1993. 32, N 19. P. 3497.
10. Ленкова Г. А. К вопросу о безабберационных дифракционных линзах // Автометрия. 2000. № 3. С. 126.
11. Ленкова Г. А. Оптические характеристики интраокулярных линз в воздухе, воде и кювете // Автометрия. 1997. № 3. С. 35.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: lenkova@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
29 апреля 1999 г.*