

УДК 617.741 : 535.317

Г. А. Ленкова

(Новосибирск)

**ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ
В ВОЗДУХЕ, ВОДЕ И КЮВЕТЕ**

Рассмотрено влияние параметров интраокулярных линз (ИОЛ) и окружающей среды на собственные сферические аберрации. Выведены аналитические соотношения для взаимного преобразования оптических характеристик ИОЛ, расположенных в воздухе, воде или кювете. Для сравнительной оценки оптического качества ИОЛ выбран размер кружка минимального рассеяния в области фокусировки лучей. Показано, что методика измерений упрощается, а чувствительность измерений функций рассеяния точки ФРТ и волновых аберраций повышается, если исследовать ИОЛ в воздухе, а затем результаты измерений приводить к реальным условиям.

Введение. Интраокулярные линзы (ИОЛ) (искусственные хрусталики глаза) имплантируются в глаз после удаления поврежденных или пораженных катарактой естественных хрусталиков [1]. При этом результат операции определяется не только мастерством хирурга-офтальмолога, но также оптическим качеством линз.

Традиционные методы контроля оптических характеристик ИОЛ основаны на измерении разрешающей способности. Например, в [2] производится оценка изображения линзой набора решеток с разным периодом штрихов. В [3] ИОЛ исследуются на основе анализа модуляционной передаточной функции (МПФ). В качестве образца сравнения рекомендуется МПФ идеальной линзы, расфокусированной на $1/2$ длины волны.

Качество изображения, создаваемого ИОЛ, зависит в общем от погрешности изготовления и конструктивных особенностей (кривизны поверхностей, диаметра, материала, оптической силы). Известно, что линзы, даже с идеально выполненными сферическими и плоскими поверхностями, обладают сферическими аберрациями [4]. Особенно заметны эти аберрации при высокой рефракции, поэтому выбор МПФ идеальной линзы для оценки качества ИОЛ, как предлагается в [3], подходит не во всех случаях. На разрешающую способность влияют также условия, в которых испытывается ИОЛ (в воздухе, воде, кювете), и дифракция на краях линзы или диафрагмы. Следует отметить, что в известных методах качество ИОЛ проверяется в целом, и поэтому не ясно, какая часть аберраций вызвана именно погрешностями изготовления.

Цель работы — рассмотреть аналитически влияние на оптическое качество ИОЛ отдельно каждого из факторов: внутренних параметров (кривизна поверхностей, диаметр, рефракция ИОЛ), окружающей среды и дифракции. Анализ собственных аберраций позволит определить качество изображения, присущее линзе, которое нельзя улучшить, совершенствуя технологию изготовления.

По форме ИОЛ бывают плосковыпуклые (ПВ), двояковыпуклые (ДВ) и менисковые. Далее, для краткости, будут анализироваться конкретно только первые два типа линз, причем второй тип — с равными радиусами кривизны поверхностей. В принципе на основе выведенных общих соотношений и формул можно рассмотреть любые формы линз.

В реальных условиях хрусталик располагается между роговицей и сетчаткой в окружении глазной жидкости, которая имеет коэффициент преломления, близкий к коэффициенту преломления воды. Очевидно, что идеальные таний в воздухе является увеличение оптической силы, а следовательно, собственных aberrаций, и предлагают помещать ИОЛ в кювету с водой. Однако использование кюветы приводит к большим неудобствам при испытаниях. Кроме того, кювета может вносить дополнительные aberrации как плоскопараллельная пластинка.

По нашему мнению, увеличение оптической силы при испытании ИОЛ в воздухе, наоборот, является преимуществом, так как при этом увеличивается чувствительность метода. Ниже будет показано, что aberrации ИОЛ, измеренные в воздухе, могут быть легко преобразованы в aberrации в среде (вода или внутриглазная жидкость). Последнее позволяет без особых затрат правильно оценить качество ИОЛ в реальных условиях.

1. Оптическая сила (рефракция) и фокусное расстояние ИОЛ в воздухе, среде и за кюветой. Рассмотрим, как влияют условия эксперимента на параметры линзы. Заметим, что геометрические параметры ИОЛ (кривизна поверхностей, диаметр, толщина) остаются постоянными. В отличие от этого фокусное расстояние f и оптическая сила Φ зависят от соотношения коэффициентов преломления окружающей среды и материала, из которого выполнена линза.

Оптической силой компонента (сферической поверхности на границе раздела двух сред) или линзы как компонента более сложной системы называют соотношение [6]

$$\Phi_i = n_{i+1} / f_i, \quad (1.1)$$

где i — номер компонента; Φ_i , $f_i = n_{i+1} / (n_{i+1} - n_i) \rho_i$ — оптическая сила и заднее фокусное расстояние i -го компонента; n_i , n_{i+1} — коэффициенты преломления среды до и после i -го компонента; $\rho_i = 1/R_i$ — кривизна i -й поверхности (R_i — радиус кривизны).

Для линзы как простейшей двухкомпонентной системы, расположенной в среде с коэффициентом преломления n_1 , известна зависимость [6]

$$\Phi = n_1/f = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n_2, \quad (1.2)$$

где Φ , Φ_1 , Φ_2 — оптические силы линзы и компонентов (поверхностей линзы); d — расстояние между компонентами (толщина линзы); n_2 — коэффициент преломления среды между компонентами (материала, из которого сделана линза).

В развернутом виде (1.2) выражается как

$$\Phi = n_1/f = (n_2 - n_1)(\rho_1 - \rho_2) + d(n_2 - n_1)^2\rho_1\rho_2/n_2, \quad (1.3)$$

где $\rho_1 = 1/R_1$, $\rho_2 = 1/R_2$ (R_1 , R_2 — радиусы кривизны 1-й и 2-й поверхностей линзы).

Для тонкой линзы, какой является ИОЛ, $d \ll R$, поэтому получаем в среде ($n_1 \neq 1$) и в воздухе ($n_1 = 1$) соответственно:

$$\Phi = n_1/f = (n_2 - n_1)(\rho_1 - \rho_2), \quad (1.4)$$

$$\Phi = 1/f = (n_2 - 1)(\rho_1 - \rho_2), \quad (1.5)$$

где Φ и f — рефракция и фокусное расстояние в среде; Φ_1 и f_1 — то же самое в воздухе. Из (1.4) и (1.5) следует:

$$f_1 = f/k_1, \quad (1.6)$$

$$\Phi_1 = k_2\Phi, \quad (1.7)$$

$$f_1 = 1/k_2\Phi, \quad (1.8)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты взаимного преобразования f, f_1, Φ и Φ_1 , $k_1 = (n_2 - 1)n_1/(n_2 - n_1)$; $k_2 = (n_2 - 1)/(n_2 - n_1) = k_1/n_1$.

В паспорте на ИОЛ указываются значение рефракции в воде Φ и форма поверхностей. На основании этих данных можно определить параметры ИОЛ в воздухе по формулам (1.6)—(1.8) и радиусы кривизны из (1.4). Если линза плосковыпуклая ($1/\rho_1 = R_1 = R$, $1/\rho_2 = R_2 = \infty$) или двояковыпуклая ($1/\rho_1 = -1/\rho_2 = R$), то получаем соответственно:

$$R = (n_2 - n_1)/\Phi = (n_2 - n_1)f/n_1, \quad (1.9)$$

$$R = 2(n_2 - n_1)/\Phi = 2(n_2 - n_1)f/n_1. \quad (1.10)$$

Если линза помещается в кювету с водой, а измерение оптических характеристик проводится в воздухе за кюветой, то фокусное расстояние f_2 (в предположении, что слой воды значительно меньше f_2) связано с f соотношением

$$f_2 = f/n_1 = k_2f_1. \quad (1.11)$$

Подставляя (1.11) в (1.1), получаем

$$\Phi_2 = 1/f_2 = n_1/f = \Phi. \quad (1.12)$$

Следовательно, рефракция за кюветой Φ_2 остается равной рефракции в воде Φ .

Полученные соотношения (1.4)—(1.12) оптических сил, фокусных расстояний и показателей преломления позволяют определить оптические характеристики ИОЛ в реальной среде (внутри глаза), если испытания ИОЛ проводятся в воздухе или с помощью кюветы с водой.

Наиболее распространенным материалом для ИОЛ является полиметилметакрилат (ПММА). В последнее время освоено изготовление ИОЛ из лейкосапфира. Для этих двух материалов в табл. 1 приводятся значения коэффициентов в (1.4)—(1.12), выраженные через показатели преломления. Значения приведены для трех стандартных длин волн λ_F , λ_D и λ_C , которые применяются при оптических расчетах, области максимальной чувствительности глаза ($\lambda = 0,555$ мкм) и излучения He—Ne-лазера ($\lambda = 0,633$ мкм), часто используемого для проверки оптического качества линз. Как следует из табл. 1 и формул (1.6), (1.7), для ИОЛ из ПММА и лейкосапфира фокусное расстояние в воде в 4,2 и 2,4 раза больше, а рефракция в 3,2 и 1,8 раза меньше, чем эти же параметры в воздухе. Фокусное расстояние в воздухе за кюветой (см. (1.11)) в 1,3 и 1,8 раза меньше, чем в воде, и в 3,2 и 1,8 раза больше, чем просто в воздухе (без кюветы).

2. Сферические aberrации ИОЛ. Кружок минимального рассеяния. Рассмотрим собственные aberrации ИОЛ. Так как ИОЛ относятся к разряду

Т а б л и ц а 1

Параметры ИОЛ	F	D	C	Область максимальной чувствительности глаза	He-Ne-лазер	Среда, материал, границаи среды
λ , мкм	0,4861	0,5893	0,6563	0,555	0,633	
n_1	1,3401	1,336	1,3341	1,3373	1,3346	Вода
n_2^*	1,496	1,491	1,488	1,492	1,489	ПММА
$n_2 - n_1$	0,1559	0,155	0,1539	0,1549	0,1544	ПММА/вода
$n_2 - 1$	0,496	0,491	0,488	0,4922	0,489	ПММА/воздух
$(n_2 - n_1)/n_1$	0,1163	0,116	0,1154	0,1158	0,1157	ПММА/вода
k_1	4,26	4,23	4,23	4,25	4,23	Воздух/вода
k_2	3,18	3,17	3,17	3,18	3,17	Воздух/вода
κ_1	0,5876	0,5931	0,5966	0,5920	0,5954	ПММА/воздух
κ_2	1,6658	1,6648	1,6643	1,6650	1,664	ПММА/воздух
κ_1	3,46	3,47	3,49	3,48	3,48	ПММА/вода
κ_2	2,81	2,82	2,83	2,83	2,83	ПММА/вода
α_1/α	3,08	3,06	3,06	3,07	3,06	Воздух/вода ПВ
α_1/α	10,8	10,6	10,5	10,6	10,5	Воздух/вода ДВ
n_2^*	1,7758	1,768	1,7649	1,7702	1,7659	Лейкосапфир
$n_2 - n_1$	0,4357	0,432	0,4308	0,4329	0,4313	Лейкосапфир/вода
$n_2 - 1$	0,7758	0,768	0,7649	0,7702	0,7659	Лейкосапфир/воздух
$(n_2 - n_1)/n_1$	0,3251	0,3234	0,3229	0,3237	0,3232	Лейкосапфир/вода
k_1	2,39	2,37	2,37	2,38	2,37	Воздух/вода
k_2	1,78	1,77	1,78	1,78	1,78	Воздух/вода
κ_1	0,4693	0,4694	0,4695	0,4694	0,4695	Лейкосапфир/воздух
κ_2	1,8165	1,8107	1,8084	1,8123	1,8092	Лейкосапфир/воздух
κ_1	0,946	0,952	0,954	0,951	0,953	Лейкосапфир/вода
κ_2	1,717	1,719	1,719	1,718	1,719	Лейкосапфир/вода
α_1/α	2,83	2,77	2,76	2,80	2,77	Воздух/вода ПВ
α_1/α	6,04	5,92	5,91	5,97	5,91	Воздух/вода ДВ

* Значения n_2 для ПММА из [7], для лейкосапфира из [8].

тонких линз средней светосилы, то их продольные сферические aberrации могут быть представлены в виде [4]

$$\begin{aligned} \Delta S'_y = & - \left\{ y^2 [(n-1)(\rho_1 - \rho_2)] / 2n [(n-1)(\rho_1 - \rho_2) - \sigma]^2 \right\} \times \\ & \times \left\{ n^3(\rho_1 - \rho_2)^2 - n(\rho_1 - \rho_2)[(\rho_1 + \sigma)(2n+1) + n\sigma] + \right. \\ & \left. + (\rho_1 + \sigma)[(\rho_1 + \sigma)(n+2) + 2n\sigma] \right\}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где y — высота входа луча в линзу; $n = n_2/n_1$ — отношение показателей преломления материала линзы n_2 и среды n_1 ; $\Delta S'_y = S' - S'_y$ (S' и S'_y — расстояния от линзы до параксиального и действительного изображений); $\sigma = 1/S$ (S — расстояние от предмета до линзы); $\rho_1 = 1/R_1$, $\rho_2 = 1/R_2$ (R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы). Внутри глаза ИОЛ располагается за роговицей в сходящемся пучке, поэтому влияние aberrации линзы на изображение, формируемое на сетчатке глаза, следовало бы анализировать на основе (2.1). Однако для оценки оптического качества ИОЛ с целью выявления погрешностей изготовления достаточно рассмотреть более простой вариант, когда линза освещается параллельным пучком света. В этом случае $S = \infty$, $S'_y = f'_y$ и $\Delta S'_y$ преобразуется в сферическую продольную aberrацию в фокальной области $\Delta f'_y$:

$$\begin{aligned} \Delta f'_y = & - \left\{ y^2 / [2n(n-1)(\rho_1 - \rho_2)] \right\} \times \\ & \times [n^3(\rho_1 - \rho_2)^2 - n(2n+1)(\rho_1 - \rho_2)\rho_1 + (n+2)\rho_1^2]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Здесь $\Delta f'_y = f' - f'_y$ (f' , f'_y — задние фокусные расстояния для параксиальных и действительных лучей. (Далее штрих в обозначении f опускается.)

Если линза плосковыпуклая или двояковыпуклая, то при подстановке $\rho_1 = \rho = 1/R = 1/f(n-1)$, $\rho_2 = 0$ или $\rho_1 = -\rho_2 = \rho = 1/R = 1/2f(n-1)$ (2.2) переходит в (2.3) и (2.4) соответственно:

$$\Delta f_y = -\kappa_1 y^2 / R = -\kappa_1 y^2 / f(n-1), \quad (2.3)$$

$$\Delta f_y = -\kappa_2 y^2 / R = -\kappa_2 y^2 / 2f(n-1), \quad (2.4)$$

где

$$\kappa_1 = (n^3 - 2n^2 + 2) / 2n(n-1), \quad (2.5)$$

$$\kappa_2 = (4n^3 - 4n^2 - n + 2) / 4n(n-1).$$

При расположении линзы в воздухе или среде в (2.5) следует подставить $n = n_2$ или $n = n_2/n_1$ соответственно.

Полная поперечная сферическая aberrация характеризуется размером кружка рассеяния лучей в гауссовой плоскости, проходящей через параксиальный фокус. Однако минимальные сферические aberrации тонкой линзы наблюдаются, как известно [4], в плоскости, отстоящей на $\sim 3/4$ от параксиального фокуса или на $\sim 1/4$ от фокуса крайних лучей. Кружок минимального рассеяния может служить мерой оптического качества линзы. На основании (2.2) — (2.4) можно определить, что в центре этого кружка пересекаются лучи, выходящие из линзы на высоте, составляющей 0,866 радиуса линзы, а на периферии — крайние лучи с лучами, выходящими из линзы на высоте 0,5.

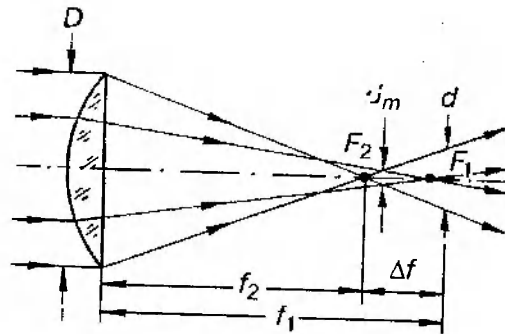


Рис. 1. Ход лучей, ограничивающих пятно минимального рассеяния

На рис. 1 показан ход лучей через линзу. Точки фокусировки центральных и крайних лучей F_1 и F_2 задают границы продольной сферической aberrации. Как следует из рисунка, полная и минимальная поперечные сферические aberrации или линейный диаметр кружка полного d и наименьшего d_m рассеяния равны соответственно:

$$\begin{aligned} d &= D\Delta f / (f_1 - \Delta f), & d_m &= D\Delta f / 4(f_1 - \Delta f), \\ d &\approx D\Delta f / f, & d_m &\approx D\Delta f / 4f, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где D — диаметр линзы; $f = f_1$ — параксиальное фокусное расстояние; $\Delta f = f_1 - f_2$ — разность фокусных расстояний для параксиальных (f_1) и крайних (f_2) лучей.

Разрешающая способность глаза (острота зрения) обычно выражается в угловой мере, поэтому удобнее сравнивать ИОЛ по угловому диаметру кружка минимального рассеяния α , который равен

$$\alpha = D\Delta f / 4f^2. \quad (2.7)$$

Подставляя (2.3) и (2.4) при $y = D/2$ в (2.7), получим выражение α через радиус кривизны R и параксиальный фокус f для плосковыпуклой и двояковыпуклой линз последовательно в виде

$$\alpha_1 = -\kappa_1 D^3 (n-1)^2 / 16R^3 = -\kappa_1 D^3 / 16(n-1)f^3, \quad (2.8)$$

$$\alpha_2 = -\kappa_2 D^3 (n-1)^2 / 4\kappa^3 = -\kappa_2 D^3 / 32(n-1)f^3. \quad (2.9)$$

Если линза расположена в воздухе, то, подставляя $i = f_1 = 1/k_2\Phi$ (см. (1.8)) в (2.8) и (2.9), получим

$$\alpha_1 = -\kappa_1 D^3 k_2^2 \Phi^2 / 16(n_2 - 1), \quad (2.10)$$

$$\alpha_2 = -\kappa_2 D^3 k_2^2 \Phi^2 / 32(n_2 - 1), \quad (2.11)$$

где D — диаметр линзы (мм); Φ — рефракция в воде (дптр), в коэффициентах κ_1 и κ_2 (см. (2.5)) $n = n_2$.

На основании (2.5), (2.8) и (2.9) можно показать, что размеры кружков минимального рассеяния в воздухе α_1 и среде α связаны между собой соотношением

$$\alpha_1 / \alpha = (\kappa_1 / \kappa) k_1^2, \quad (2.12)$$

где κ_1 и κ_2 — значения κ_1 и κ_2 (см. (2.5)) в воздухе ($n = n_2$) и среде ($n = n_2/n_1$) соответственно, а $k_1 = (n_2 - 1)n_1/(n_2 - n_1)$.

В табл. 1 приводятся значения κ_1 и κ_2 для плосковыпуклых и двояковыпуклых линз из ПММА и лейкосапфира, расположенных в воздухе и среде (вода), а также значения α_1/α . Как видно из табл. 1, все эти коэффициенты мало зависят от длины волны. В среднем кружок рассеяния в воде меньше, чем в воздухе, для плосковыпуклых линз в 3,1 и 2,8 раза, а для двояковыпуклых — в 10,6 и 5,9 раза соответственно для линз из ПММА и лейкосапфира.

3. Волновые aberrации ИОЛ. Качество ИОЛ может оцениваться по отклонению волнового фронта, проходящего через ИОЛ, от сферической или плоской формы. В связи с этим представляет интерес сопоставить угловой размер кружка минимального рассеяния с величиной волновой aberrации. Полная волновая aberrация h может быть рассчитана на основе интегрального уравнения [4]

$$h_y = - \int_0^y (\Delta f_y y / f^2) dy. \quad (3.1)$$

Подставляя Δf_y из (2.2) и $f = 1/(n - \rho_1 - \rho_2)$ в (3.1) и интегрируя, получим

$$h_y = [y^4(n-1)(\rho_1 - \rho_2)/8n][n^3(\rho_1 - \rho_2)^2 - n(2n+1)\rho_1(\rho_1 - \rho_2) + (n+2)\rho_1^2]. \quad (3.2)$$

Для краткости выразим h_y через Δf_y и f :

$$h_y = -[y^2(n-1)^2(\rho_1 - \rho_2)^2/4]\Delta f_y = -(\Delta f_y/4f)y^2, \quad (3.3)$$

где Δf_y соответствует (2.2)–(2.4); f — параксиальное фокусное расстояние.

Определим волновую aberrацию относительно референтной сферы с центром в точке на оптической оси в плоскости кружка минимального рассеяния. Для этого необходимо вычислить следующий интеграл, аналогичный (3.1), но со смещением $\xi = 0,75\Delta f$:

$$h_y = - \int_0^y [(\Delta f_y - \xi)y/f^2] dy. \quad (3.4)$$

В подынтегральном выражении (3.4) первый член Δf_y зависит от y (см. (2.2)), а второй ξ — постоянная величина, пропорциональная максимальному значению Δf_y , равному $\Delta f = f_1 - f_2$, поэтому результат интегрирования получаем в виде

$$h_y = -(\Delta f_y/4f^2)y^2 + (3\Delta f/8f^2)y^2. \quad (3.5)$$

При $y = D/2$ волновая aberrация h равна

$$h = (\Delta f/8f^2)(D^2/4). \quad (3.6)$$

Сравнивая (3.3) при $y = D/2$ и (3.6), видим, что в последнем случае волновая aberrация в 2 раза меньше и имеет обратный знак.

Из сравнения (2.7) и (3.6) следует, что α и h связаны между собой соотношением

$$h = -\alpha D/8. \quad (3.7)$$

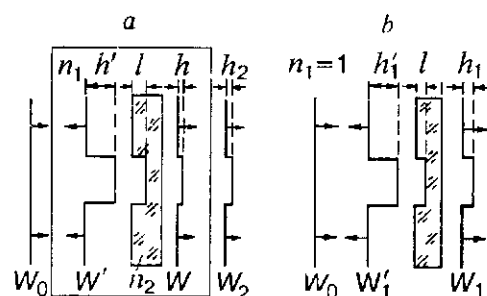


Рис. 2. Оптический элемент, расположенный в среде или кювете (а) и в воздухе (b).
Волновые фронты: W_0 — падающий; W, W_1, W_2 — прошедшие; W', W_1' — отраженные

Отметим, что α — это не угловая абберация в принятом представлении, а угловой диаметр пятна минимального рассеяния.

Аналогично (2.10) и (2.11) можно выразить волновую абберацию для плосковыпуклой и двояковыпуклой линз через рефракцию Φ в виде

$$h_1 = [\kappa_1 k_2^3 / 128(n_2 - 1)] \Phi^3 D^4 10^{-9}, \quad (3.8)$$

$$h = [\kappa_2 k_2^3 / 256(n_2 - 1)] \Phi^3 D^4 10^{-9}. \quad (3.9)$$

4. Соотношение между деформациями волнового фронта в отраженном и проходящем свете (в воздухе, среде, за кюветой). Оптическое качество ИОЛ зависит от собственных аббераций, рассмотренных выше, и аббераций, обусловленных погрешностями изготовления. Для оценки последних применяются обычно интерференционные методы, основанные на сравнении двух волновых фронтов — опорного (референтного) и отраженного от контролируемой поверхности или прошедшего через последнюю. Покажем, что в этом случае также можно проводить измерения в воздухе, а затем приводить результаты измерения к условиям среды или кюветы.

При интерференционных измерениях референтная волна согласуется по форме с волной, отраженной от объекта или прошедшей через объект. В результате интерферируют два параллельных (фактически плоскопараллельных) волновых фронта, один из которых несет информацию о дефектах измеряемой поверхности.

Пусть поверхность оптического элемента (линзы) имеет дефект глубиной l (рис. 2). Если на элемент падает плоская волна, то отраженная волна будет иметь деформацию h' [9], равную независимо от окружающих условий

$$h' = 2l. \quad (4.1)$$

В проходящем свете деформация h зависит от показателей преломления среды (n_1) и материала элемента (n_2) и составляет

$$h = l(n_2 - n_1)/n_1. \quad (4.2)$$

При исследовании элемента в воздухе ($n_1 = 1$) деформация в отраженном (h_1') и проходящем (h_1) свете равна

$$h_1' = 2l, \quad h_1 = l(n_2 - 1). \quad (4.3)$$

Если элемент помещается в кювету, то волновой фронт, выходящий из кюветы в воздух, в отраженном (h'_2) и проходящем (h_2) свете будет иметь деформацию в n_1 раз большую, чем в среде:

$$h'_2 = h_1 n_1 = 2ln_1, \quad h_2 = hn_1 = l(n_2 - n_1). \quad (4.4)$$

При определении величины деформации на интерферометре результат измерения выражается числом интерференционных полос (или длин волн) $N = hn_1/\lambda$ (λ — длина волны в вакууме; n_1 — показатель преломления среды). Число полос, соответствующее деформации волнового фронта в отраженном (N') и проходящем (N) свете, можно представить на основании (4.2)—(4.4) в среде (без индекса) и за кюветой (с индексом 2) в виде (4.5), а в воздухе (с индексом 1) в виде (4.6):

$$N' = N'_2 = 2ln_1/\lambda, \quad N = N_2 = l(n_2 - n_1)/\lambda, \quad (4.5)$$

$$N_1 = 2l/\lambda, \quad N_1 = l(n_2 - 1)/\lambda. \quad (4.6)$$

Из (4.5) следует, что в среде и за кюветой наблюдается одинаковая деформация в длинах волн как в отраженном, так и в проходящем свете. В воздухе число полос в отраженном свете в n_1 раз меньше, чем в среде:

$$N'_1 = N' / n_1. \quad (4.7)$$

Если поверхность контролируется в отраженном свете в воздухе (N'_1), а результаты измерения приводятся к условиям проходящего света, то соответствующее число полос в среде (N), воздухе (N_1) и за кюветой (N_2) будет равно:

$$N = N_2 = N'_1(n_2 - n_1)/2, \quad (4.8)$$

$$N_1 = N'_1(n_2 - 1)/2. \quad (4.9)$$

Из (4.3)—(4.9) следует, что величина деформации и число полос в отраженном (h' , N') и проходящем (h , N) свете связаны между собой в среде (без индекса) и за кюветой (с индексом 2) одинаковыми соотношениями:

$$h/h' = h_2/h'_2 = (n_2 - n_1)/2n_1, \quad (4.10)$$

$$N/N' = N_2/N'_2 = (n_2 - n_1)/2n_1,$$

а в воздухе (с индексом 1) соотношением

$$h_1/h'_1 = N_1/N'_1 = (n_2 - 1)/2. \quad (4.11)$$

Деформация волнового фронта, измеренная в проходящем свете в воздухе (h_1 , N_1), может быть пересчитана в деформацию в среде (h , N) на основании (4.2)—(4.6) по формулам

$$h = h_1/k_1, \quad N = N_1/k_2, \quad (4.12)$$

где $k_1 = (n_2 - 1)n_1/(n_2 - n_1)$, $k_2 = (n_2 - 1)/(n_2 - n_1)$.

В табл. 2 приводятся значения коэффициентов пересчета деформаций (или волновых aberrаций) по формулам (4.8)—(4.12) для ИОЛ из ПММА и

Таблица 2

Материал	n_2	$2n_1/(n_2 - n_1)$ (4.10)	$2/(n_2 - n_1)$ (4.8)	$2/(n_2 - 1)$ (4.9), (4.11)	k_1	k_2
ПММА	1,489	17,28	12,95	4,09	4,23	3,17
Лейкосапфир	1,7659	6,19	4,64	2,61	2,37	1,78

лейкосапфира. Из таблицы видно, что «чувствительность» определения волновых aberrаций в проходящем свете в среде как бы повышается, если измерения деформаций поверхности проводятся в отраженном свете. Если линза расположена в кювете с водой, то «чувствительность» повышается в 17,3 и 6,2 раза в зависимости от материала (n_2), а если в воздухе, то в 13 и 4,6 раза. Во втором случае (линза в воздухе) повышение меньше в 1,3 раза, чем в первом (линза в кювете), но этого вполне достаточно для того, чтобы проводить испытание линз в воздухе без кюветы, вводящей дополнительные помехи в интерференционную картину и усложняющей процедуру измерений.

5. Дифракционное размытие изображения. Выше были рассмотрены геометрические сферические aberrации ИОЛ. При этом не учитывались дифракционные явления. Как известно [4], дифракционный угловой диаметр сфокусированного пятна по уровню нулевой интенсивности определяется по формуле Эйри и равен

$$\alpha_d = 2,44 \lambda / D n_1, \quad (5.1)$$

где D — диаметр линзы; λ — длина волны в вакууме; n_1 — показатель преломления среды.

В зависимости от конструкции ИОЛ (радиусы кривизны поверхностей, диаметр, показатель преломления материала) и окружающей среды будет преобладать размытие изображения из-за сферических aberrаций или дифракционных явлений. И та и другая причина нарушения резкости изображения всегда присутствуют и должны учитываться при контроле качества линз.

6. Анализ и сравнение aberrаций. Из (5.1) следует, что угловой дифракционный размер точечного изображения обратно пропорционален диаметру линзы D в первой степени. В отличие от этого угловой диаметр кружка минимального рассеяния зависит прямо пропорционально от D , причем в третьей степени (см. (2.10) и (2.11)), и, кроме того, от рефракции Φ также в третьей степени. На основании (2.10), (2.11) и (5.1) можно определить предельно достижимое качество изображения ИОЛ, обусловленное собственными aberrациями.

Большинство ИОЛ изготавливается из полиметилметакрилата, поэтому остановимся на рассмотрении оптических характеристик ИОЛ именно для ПММА. Параллельно будут приведены некоторые данные для ИОЛ из лейкосапфира — материала со значительно более высоким показателем преломления.

Контроль линз удобно проводить в свете He—Ne-лазера ($\lambda = 0,633$ мкм). Подставляя в (2.10) и (2.11) значения k_1 , k_2 и k_3 из табл. 1 для этой длины волны, получим выражение углового диаметра кружка минимального рассеяния для плосковыпуклых (6.1) и двояковыпуклых (6.2) ИОЛ из ПММА в воздухе:

$$\alpha_1 = -2,417 D^3 \Phi^3 10^{-9}, \quad (6.1)$$

$$\alpha_2 = -3,379 D^3 \Phi^3 10^{-9}, \quad (6.2)$$

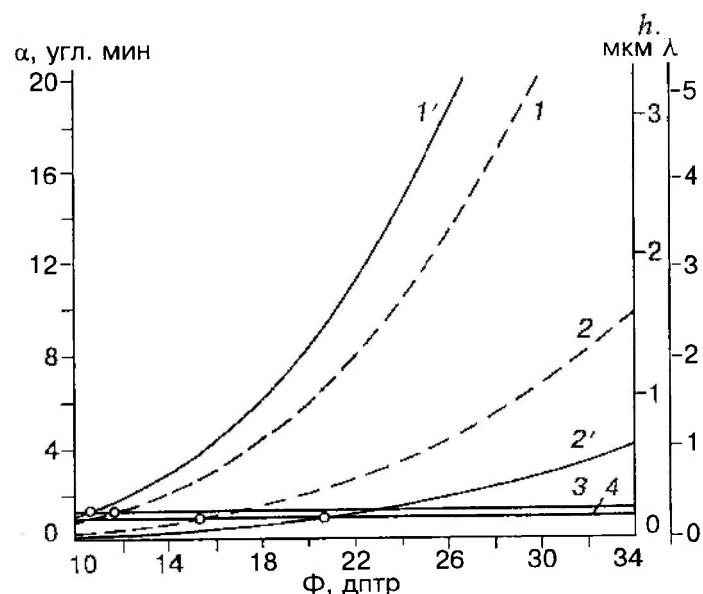


Рис. 3. Зависимость кружка минимального рассеяния α и собственных волновых aberrаций h ИОЛ в воздухе (1) и в воде (2) от рефракции Φ (в воде).

Диаметр апертуры 4,5 мм; 1, 2 — плосковыпуклые ИОЛ; 1', 2' — двояковыпуклые; 3, 4 — линии, соответствующие диаметру дифракционного кружка в воздухе и в воде

где D — диаметр линзы (мм); Φ — рефракция в воде (дптр). Для вычисления волновых aberrаций умножаем (6.1) и (6.2) на $D/8$ в соответствии с (3.10):

$$h_1 = -0,302D^4\Phi^3 10^{-9}, \quad (6.3)$$

$$h = -0,422D^4\Phi^3 10^{-9}. \quad (6.4)$$

Значения α и h в среде (в воде) определялись на основании (6.1)—(6.4) и соотношения (2.12).

На рис. 3 приведены графики $\alpha = f(\Phi)$ для $D = 4,5$ мм для плосковыпуклых и двояковыпуклых линз из ПММА, расположенных в воздухе и воде. Справа указаны две оси (в мкм и в числе длин волн) для функций $h = f(\Phi)$, на которых масштаб выбран так, чтобы функции $h = f(\Phi)$ совмещались с $\alpha = f(\Phi)$.

Дифракционный размер изображения изменяется в зависимости от окружающей среды значительно меньше, чем α и h (ср. (5.1) и табл. 2). Для линз диаметром 3; 4 и 4,5 мм дифракционный размер составляет в воздухе и за кюветой 1,77; 1,33; 1,18', а в воде в $\sim 1,34$ раза (n_1) меньше (соответственно -1,33; 1,0; 0,88'). На рис. 3 дифракционный угловой диаметр (в воде и в воздухе) показан для $D = 4,5$ мм в виде линий, параллельных оси абсцисс, так как он не зависит от рефракции Φ .

Подставляя в (6.1) и (6.2) значения α , равные размеру дифракционного кружка α_d , можно определить значения рефракций Φ , начиная с которых угловой диаметр пятна минимального рассеяния, определяемый собственными сферическими aberrациями, будет преобладать над дифракционным уширением точечного изображения. В табл. 3 приводятся граничные значения рефракций, рассчитанные для ИОЛ из ПММА и лейкосапфира, расположенных в воде (аналог глазной жидкости) и в воздухе.

Согласно каталогам, интраокулярные линзы выпускаются с рефракцией в пределах $2 \div 34$ дптр. Как следует из табл. 3, все линзы из лейкосапфира в этом диапазоне не имеют собственных сферических aberrаций. Для линз из ПММА (диаметром 4,5 мм) эти aberrации становятся заметными в реальных

Т а б л и ц а 3

Диаметр, мм	Ф в воде, дптр			
	пв	дв	пв	дв
	ПММА в воде		ПММА в воздухе	
3	26 (24,5)	35,5 (33)	20 (18,5)	18 (16,5)
4	18 (16,5)	24 (22,5)	13,5 (12,5)	12 (11,5)
4,5	15,5 (14,5)	20,5 (19)	11,5 (11)	10,5 (9,5)
	Лейкосапфир в воде		Лейкосапфир в воздухе	
3	57 (53)	59 (55)	44,5 (42)	36 (33,5)
4	39 (36,5)	40 (37,5)	30,5 (28,5)	24,5 (23)
4,5	33 (31)	34,5 (32)	26 (24,5)	21 (19,5)

условиях, начиная с 15,5, а в воздухе — с 10,5 дптр. Эти значения рефракций попадают в область наибольшей потребности ИОЛ (16 ÷ 21 дптр). С уменьшением диафрагмы (зрачка) размер точечного изображения приближается к дифракционному пределу. При диаметре 3 мм линзы из ПММА с рефракцией меньше, чем 26 (двояковыпуклые) и 35,5 (плосковыпуклые) дптр, имеют сферические aberrации на уровне дифракционного изображения.

В оптике принято считать качество изображения дифракционно-ограниченным, если волновые aberrации не превышают $1/4$ длины волны. Если оценивать ИОЛ по этому принципу, то граничные значения рефракции немного уменьшаются. Исходя из (3.7), можно определить, что волновая aberrация $\lambda/4$ ($\lambda = 0,633$ мкм) соответствует угловому диаметру пятна минимального рассеяния, равному в воздухе и за кюветой 1,45; 1,09; 0,97', а в воде 1,09; 0,81; 0,72'. Значения рефракции, ниже которых ИОЛ дают дифракционно-ограниченное изображение, приводятся в табл. 3 в скобках.

Следует отметить, что естественный хрусталик компенсирует aberrации роговицы и по своей природе обладает сферическими aberrациями против правила [10, 11]. Это выражается в том, что преломляющая способность периферических зон хрусталика, начиная с некоторого диаметра (3 мм), уменьшается. В отличие от этого рефракция искусственного хрусталика (ИОЛ) в направлении от центра к краям непрерывно увеличивается. В результате даже идеально изготовленная ИОЛ будет вносить aberrации при работе внутри глаза. Возможные погрешности изготовления обычно дополнительно увеличивают преломляемость лучей в периферической области. Отсюда ясно, что погрешности изготовления должны быть минимальными, чтобы не усугублять влияние собственных aberrаций ИОЛ, которые противоположны по знаку aberrациям естественного хрусталика.

Заключение. Рассмотрено влияние геометрических параметров интраокулярной линзы и среды, окружающей ИОЛ, на собственные сферические aberrации. Представление об aberrациях, присущих самой линзе, позволит при исследовании оптического качества ИОЛ оценивать вклад в aberrации, обусловленный погрешностями изготовления. Выведены аналитические соотношения для взаимного преобразования оптических характеристик (фокусных расстояний, рефракций) и параметров оптического качества (волновых aberrаций, углового диаметра пятна минимального рассеяния) ИОЛ при изменении окружающих условий (в воздухе, воде, кювете). Показано, что испытания ИОЛ можно проводить в воздухе, а затем результаты измерений приводить к реальным условиям. При этом повышается чувствительность измерений и значительно упрощается методика испытаний. Рассчитаны значения ре-

фракций, ниже которых ИОЛ имеют дифракционно-ограниченное качество изображения.

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. ANSI Z80. 7-1984. American national standard for ophthalmics-intraocular lenses — optical and physical requirements. N. Y.: American National Standards Institute, 1984.
3. 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.
4. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. М.: ОГИЗ, 1946.
5. Овчинников Б. В., Полонская А. А., Полякова И. П. Оптическая модель глаза человека // Оптический журн. 1996. № 3. С. 74.
6. Апенко М. И., Дубовик А. С. Прикладная оптика. М.: Наука, 1982.
7. Торбин И. Д., Даминов Ю. Ф. Прозрачные полимеры // ОМП. 1974. № 10. С. 72.
8. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965.
9. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984.
10. Сергиенко Н. М. Офтальмологическая оптика. М.: Медицина, 1991.
11. Hage S. G., Bervy F. Contribution of the crystalline lens to the spherical aberration of the eye // JOSA. 1973. 63, N 2. P. 205.

Поступила в редакцию 13 февраля 1997 г.