

УДК 617.741 : 535.317

Г. А. Ленкова, В. П. Коронкевич, И. А. Искаков,  
В. П. Косых, В. А. Лабусов

(Новосибирск)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

Разработаны методы проверки оптического качества интраокулярных линз (ИОЛ), основанные на интерференционном измерении деформаций волнового фронта, отраженного от поверхностей линзы, и на измерении диаметра пятна минимального рассеяния в изображении линзой точечного источника света. Экспериментальные установки построены на основе интерферометра типа Физо. В отличие от других методов, где используется кювета с водой, в предложенных методах контроль ИОЛ проводится в воздухе, а затем результаты измерений приводятся к реальным условиям (в среде). При этом упрощается процедура проверки ИОЛ и повышается чувствительность измерений параметров функции рассеяния точки в 3—10 раз, а волновых аберраций в 4—13 раз в зависимости от материала линзы.

**Введение.** Ежегодно в мире имплантируется несколько миллионов интраокулярных линз (ИОЛ) [1], которые заменяют естественные хрусталики глаза, пораженные катарактой. В настоящее время существует большое число разнообразных моделей ИОЛ, отличающихся конструкцией опорных элементов, формой поверхностей, материалом и т. д. В каждом случае ИОЛ подбираются индивидуально, на основании предварительных измерений параметров глаза больного. При этом основной характеристикой ИОЛ является оптическая сила (рефракция). Однако острота зрения после операции зависит, наряду с другими факторами, не только от правильного выбора ИОЛ, но также и от ее оптического качества. В паспорте на ИОЛ сведения о последнем обычно отсутствуют, хотя они, возможно, позволили бы понять часть результатов операций с пониженной остротой зрения, особенно при имплантации ИОЛ с высокой рефракцией.

Наша цель заключалась в разработке методов контроля ИОЛ, позволяющих оценивать оптическое качество линз в общем и с учетом их конструктивных особенностей и погрешностей изготовления. Объектами для экспериментальной проверки методов служили несколько ИОЛ из полиметилметакрилата (ПММА) и лейкоапфира, изготовленных различными зарубежными и отечественными фирмами. Приводимые результаты измерений используются только для иллюстрации возможностей методов и не могут характеризовать продукцию той или иной фирмы.

1. Критерий оптического качества ИОЛ. Критерием оптического качества линз могут служить различные параметры, например, функция рассеяния точки (ФРТ), размер пятна минимального рассеяния, разрешающая способность и т. п. По стандарту, принятому в США, контролируется среднеквадратичное отклонение волнового фронта от идеального, разрешение, астигматизм и сферическая аберрация [2].

В [3] исследуется модуляционная передаточная функция (МПФ) ИОЛ. Изображение одномерной щели, формируемое ИОЛ, проецируется на решет-

ку фотодиодов. МПФ получается путем фурье-преобразования сигнала с фотодиодов, скорректированного на темновой ток и ширину щели. Для имитации реальных условий ИОЛ помещается в водную ячейку. На основании МПФ рассчитываются три характеристики оптического качества: число Штреля, площадь под МПФ (интеграл) и относительное значение МПФ (контраст) при частоте 30 периодов/град. Указанная частота соответствует нормальной остроте зрения, равной в различных шкалах измерений 1; 1' или 20/20. В качестве возможного стандарта на ИОЛ предлагается МПФ идеальной линзы, расфокусированной на 1/2 длины волны. В этом случае число Штреля, интеграл и контраст МПФ составляют 0,30; 0,50; 0,34.

Недостаток большинства методов заключается в том, что качество ИОЛ проверяется в целом, включая погрешности изготовления и аберрации, присущие самой линзе, обусловленные кривизной поверхностей, диаметром, рефракцией и т. д. Наличие собственных аберраций ставит под сомнение правильность выбора МПФ идеальной линзы, расфокусированной на 1/2 длины волны, в качестве эталона одновременно для всех ИОЛ. В [3] отмечается, что допуски на основе этого критерия слишком жесткие для ИОЛ с рефракцией  $> 20$  дптр и диаметром  $> 3$  мм, но это заключение подробно не анализируется. Для полной характеристики ИОЛ необходимо определить, в какой степени ее оптическое качество зависит от всех вышеперечисленных причин.

В [4] рассмотрено аналитически влияние отдельно каждого из факторов: формы линзы, оптической силы, окружающей среды и т. д. Выведены формулы для расчета коэффициентов взаимного преобразования оптических характеристик (фокусных расстояний, рефракции) и параметров качества (волновых аберраций, 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 измерения приводить к реальным условиям. При этом упрощается процедура измерений и повышается чувствительность метода.

Мы выбрали в качестве параметров, характеризующих оптические свойства ИОЛ, деформацию волнового фронта в отраженном и проходящем свете и угловой диаметр пятна минимального рассеяния [4]. Именно для этих параметров и были разработаны методы измерений.

**2. Интерференционный контроль деформаций волнового фронта.** Качество изготовления поверхностей ИОЛ оценивалось по форме волнового фронта светового пучка He—Ne-лазера ( $\lambda = 0,633$  мкм), отраженного от передней и задней (через толщу материала) поверхности линзы. В последнем случае волновой фронт дополнительно деформировался вследствие сферических аберраций, присущих самой линзе.

Линзы располагались в измерительном плече интерферометра типа Физо, состоящего из одночастотного He—Ne-лазера, коллиматора, светоделительной пластины и фотодиодной матрицы. Плоский волновой фронт  $W_0$ , выходящий из коллиматора, частично отражается от светоделительной пластины 1 (рис. 1, *a*), возвращается обратно и образует референтную (опорную) волну  $W_1$ . Прошедшая через пластину часть волнового фронта поступает в измерительное плечо интерферометра. При исследовании сферических поверхностей, вместо светоделительной пластины, устанавливается объектив 1 (рис. 1, *b*) со светоделительным покрытием на передней поверхности. Волновой фронт  $W_2$ , отраженный от исследуемой поверхности 2, интерферирует с референтным  $W_1$ . Интерференционная картина проецируется на фотодиодную матрицу и наблюдается на экране монитора. Сферические поверхности ИОЛ освещались сходящимся или расходящимся пучком с угловой апертурой, выбранной таким образом, чтобы полностью заполнялась диафрагма перед линзой. Плоские поверхности освещались параллельным пучком. На рис. 1, *c*, *d* показан ход лучей в измерительном плече интерферометра при отражении волны от задней поверхности плосковыпуклых (ПВ) и двояковыпуклых (ДВ) ИОЛ.

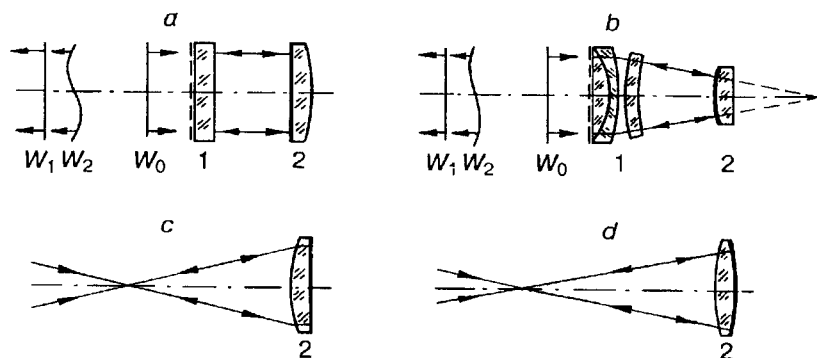


Рис. 1. Схема интерференционного контроля поверхностей ИОЛ:  
1, 2 — интерферометр Физо;  $W_0$  и  $W_1, W_2$  — входящий и выходящие волновые фронты

Как было показано в [4], деформацию волнового фронта в отраженном ( $h', N'$ ) и проходящем ( $h, N$ ) свете в среде (реальные условия внутриглазной жидкости) можно выразить через деформацию волнового фронта, измеренную в отраженном свете в воздухе ( $h'_1, N'_1$ ), как

$$h' = h'_1, \quad N' = N'_1 n_1, \quad (1)$$

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

где  $h$  и  $N$  — деформация волнового фронта, представленная в линейной мере и через число длин волн;  $n_1, n_2$  — показатели преломления среды и материала линзы. Деформации волнового фронта в проходящем свете в среде ( $h, N$ ) и в воздухе ( $h_1, N_1$ ) связаны между собой соотношением

$$h = h_1/k_1, \quad N = N_1/k_2, \quad (3)$$

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

В табл. 1 приведены коэффициенты преобразования деформаций волнового фронта  $h_1$  и  $N_1$  из воздуха в реальные условия ( $n_1 = 1,3346$  — показатель преломления глазной жидкости, подобной воде) для ИОЛ из ПММА и лейкосапфира. Все коэффициенты рассчитывались на основании формул (1)—(3) для  $\lambda = 0,633$  мкм.

Из табл. 1 следует, что для линз из ПММА волновые aberrации в проходящем свете в среде ( $N$ ) меньше, чем aberrации, измеренные в отраженном ( $N'_1$ ) и проходящем ( $N_1$ ) свете в воздухе в 12,95 и 3,17 раза соответственно. Для линз из лейкосапфира  $N$  меньше  $N'_1$  и  $N_1$  в 4,64 и 1,78 раза. Таким образом,

Таблица 1

Материал ИОЛ	$n_2$	$h'_1/h$	$N'_1/N$	$k_1$	$k_2$	$\kappa_1$	$\kappa_2$	$\alpha_1/\alpha$
ПММА	1,4890	17,28	12,95	4,23	3,17	0,60 (3,48)	1,66 (2,83)	3,06 (ПВ) 10,52 (ДВ)
Лейко-сапфир	1,7659	6,19	4,64	2,37	1,78	0,47 (0,95)	1,81 (1,72)	2,77 (ПВ) 5,91 (ДВ)

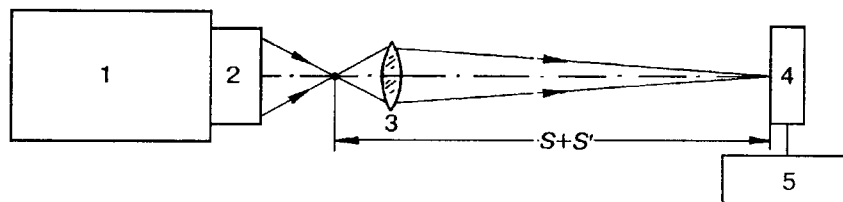


Рис. 2. Схема установки для измерения ФРТ и диаметра пятна минимального рассеяния: 1, 2 — интерферометр Физо с He—Ne-лазером; 2 — пластина или объектив со светоделительным покрытием; 3 — исследуемая линза; 4 — фотодиодная матрица; 5 — монитор

измеряя в воздухе, мы как бы существенно повышаем точность определения aberrаций в среде.

**3. Метод измерения углового диаметра пятна минимального рассеяния.** Обычно при исследовании функции рассеяния точки линза освещается коллимированным пучком света. Распределение интенсивности в изображении точки сканируется непосредственно или после увеличения в 600—1000 раз. При этом требуется коллиматор, микрообъектив высокого качества и точное сканирующее устройство [5].

Мы проводили измерения ФРТ и диаметра пятна минимального рассеяния на том же интерферометре, на котором контролировалось качество поверхностей без применения дополнительной высокократно увеличивающей оптики. Для получения точечного источника использовалось измерительное плечо интерферометра в схеме с объективом. Гарантией качества этого источника являлось то, что волновые aberrации объектива по аттестату не превышают 0,05 интерференционной полосы. Точечный источник из фокуса объектива проецировался с помощью ИОЛ в плоскость фотодиодной матрицы с большим увеличением (100—200 раз) (рис. 2). При таком увеличении можно считать, что линза формирует изображение практически в «бесконечности», т. е. качество изображения оценивается в обратном ходе лучей по сравнению с вышеупомянутой схемой с коллимированным пучком. Aberrации линзы наблюдаются в изображении точечного источника, причем увеличенного самой же линзой.

Покажем, что результаты измерения aberrаций по предложенному методу и в схеме с коллимированным пучком аналогичны друг другу. Пусть источник света  $A$  расположен на расстоянии  $S$  от линзы перед фокусами  $F_1$  и  $F_2$  для параксиальных и крайних лучей соответственно (рис. 3). На основании известной формулы, связывающей расстояние от линзы до предмета  $S$  и от линзы

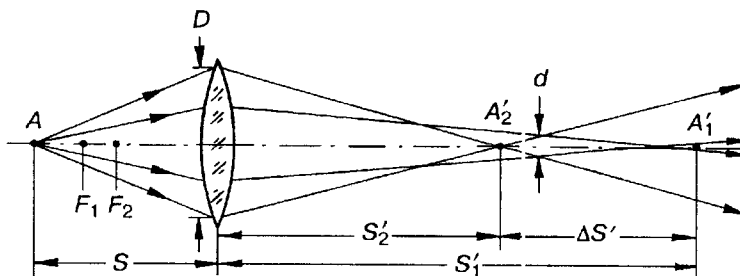


Рис. 3. Ход лучей, ограничивающих пятно минимального рассеяния  $d$ :  $A$  — точечный источник света;  $A_1'$ ,  $A_2'$  — изображения источника, формируемые центральными (параксиальными) и крайними лучами соответственно

до изображения  $S'$  с фокусным расстоянием  $f$ , составляем тождество для параксиальных и крайних лучей ( $f$  и  $S'$  соответственно с индексами 1 и 2):

$$(1/f_1) - (1/S'_1) = (1/f_2) - (1/S'_2). \quad (4)$$

Вводя обозначения:  $\Delta f = f_1 - f_2$ ,  $f^2 = f_1 f_2$ ,  $\Delta S' = S'_1 - S'_2$ ,  $(S')^2 = S'_1 S'_2$ , получаем

$$\Delta S' = \Delta f (S'/f)^2 = \Delta f \gamma^2. \quad (5)$$

Таким образом, расстояние между изображениями в параксиальных и крайних лучах  $\Delta S'$  прямо пропорционально разности фокусных расстояний  $\Delta f$ , а также среднему увеличению оптической схемы  $\gamma$  в квадрате.

Полагая  $\Delta f \ll f$  и  $S' \gg f$ , можно считать, что  $\gamma$  в пределах  $S'_1 \div S'_2$  сохраняет постоянное значение, а угловой диаметр кружка минимального рассеяния в плоскости изображения подобно пятну рассеяния в фокальной плоскости [4] равен (см. рис. 3)

$$\alpha = d/S' = D\Delta S'/4(S')^2, \quad (6)$$

где  $d$ ,  $D$  — диаметры кружка минимального рассеяния и линзы соответственно. Подставляя (5) в (6), получаем

$$\alpha = D\Delta f/4f^2. \quad (7)$$

Из (7) следует, что угловой диаметр кружка минимального рассеяния в схеме с изображением точечного источника на расстоянии  $S \gg f$  и в схеме с коллимированным пучком (ср. (2.7) в [4]) имеет одинаковое значение, причем независимо от  $\gamma$ .

**4. Анализ и сравнение расчетных aberrаций ИОЛ.** Аналогично обычным линзам ИОЛ обладают собственными сферическими aberrациями. В [4] выведены аналитические формулы, связывающие угловой диаметр пятна минимального рассеяния и рефракцию для плосковыпуклых ( $\alpha_1$ ) и двояковыпуклых ( $\alpha_2$ ) линз:

$$\alpha_1 = -\kappa_1 \frac{D^3 k_2^3 \Phi^3}{16(n_2 - 1)} 10^{-9}, \quad (8)$$

$$\alpha_2 = -\kappa_2 \frac{D^3 k_2^3 \Phi^3}{32(n_2 - 1)} 10^{-9}, \quad (9)$$

где  $D$  — диаметр линзы (мм);  $\Phi$  — рефракция в воде (дптр);  $k_2 = \frac{(n_2 - 1)}{(n_2 - n_1)}$ ;  $n_1$ ,  $n_2$  — показатели преломления среды (воды) и материала линзы соответственно:

$$\kappa_1 = \frac{n^3 - 2n^2 + 2}{2n(n - 1)}, \quad \kappa_2 = \frac{4n^3 - 4n^2 - n + 2}{4n(n - 1)}.$$

Здесь  $n = n_2/n_1$  — отношение показателей преломления материала  $n_2$  и окружающей среды  $n_1$ . Значения коэффициентов  $k_2$ ,  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ , вычисленные для линз из ПММА и лейкосапфира при  $\lambda = 0,633$  мкм, приведены в табл. 1. При этих значениях коэффициентов и  $D = 4,5$  мм имеем из (8) и (9):

$$\alpha_1 = -220,27 \cdot 10^{-9} \Phi^3, \quad \alpha_2 = -307,88 \cdot 10^{-9} \Phi^3 \text{ ПММА/воздух,} \\ (-71,98 \cdot 10^{-9} \Phi^3), \quad (-29,27 \cdot 10^{-9} \Phi^3) \text{ ПММА/вода,} \quad (10)$$

$$\alpha_1 = -19,52 \cdot 10^{-9} \Phi^3, \quad \alpha_2 = -37,62 \cdot 10^{-9} \Phi^3 \text{ лейкосапфир/воздух,} \\ (-7,05 \cdot 10^{-9} \Phi^3), \quad (-6,36 \cdot 10^{-9} \Phi^3) \text{ лейкосапфир/вода.} \quad (11)$$

В (10), (11) и в табл. 1 даны значения  $k$  и  $\alpha$  (без скобок и в скобках), рассчитанные для линз, расположенных в воздухе и в воде соответственно. В табл. 1 приведены также соотношения размерев кружков минимального рассеяния в воздухе ( $\alpha_1$ ) и в воде ( $\alpha$ ).

Волновые aberrации линзы  $h$  относительно референтной сферы с центром в точке, расположенной на оси и в плоскости пятна минимального рассеяния, характеризующего геометрические aberrации, присущие самой линзе, связаны с угловым диаметром этого пятна соотношением [4]

$$h = -\alpha D/8. \quad (12)$$

Например, при  $D = 4,5$  мм и  $\alpha = 1'$  имеем  $h = 0,164$  мкм ( $\sim \lambda/4$ ).

Изображение точечного источника расширяется также вследствие дифракции лучей на краях линзы или диафрагмы. Дифракционный угловой диаметр  $\alpha_d$  сфокусированного пятна по уровню нулевой интенсивности, как известно, определяется по формуле Эйри

$$\alpha_d = 2,44\lambda/Dn_1, \quad (13)$$

где  $n_1$  — показатель преломления среды;  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

В зависимости от диаметра линзы, конструкции и величины рефракции (см. (8), (9), (13)) преобладает дифракционное или aberrационное размытие изображения. При  $D = 4,5$  мм (диаметр диафрагмы в наших экспериментах) угловые диаметры пятен минимального рассеяния превосходят дифракционное размытие изображения, начиная с рефракций, указанных в табл. 2. Данные таблицы рассчитаны на основании (8)—(13) и коэффициентов табл. 1. В скобках указаны значения рефракций, при которых собственные волновые aberrации составляют четверть длины волны. Это граничные значения  $\Phi$ , ниже которых ИОЛ будут давать дифракционно-ограниченное изображение.

5. Экспериментальные результаты. Для проверки предложенных методов исследовались ИОЛ нескольких фирм-изготовителей России, США, Китая (по лицензии США). Линзы изготовлены из полиметилметакрилата и лейкосапфира. Параметры линз приведены в табл. 3. Фокусные расстояния  $f$  линз в воздухе и радиусы кривизны поверхностей  $R$  рассчитывались на основании следующих формул [4]:

$$f = 1/k_2\Phi, \quad (14)$$

$$R = (n_2 - n_1)/\Phi \quad (\text{ПВ}), \quad (15)$$

$$R = 2(n_2 - n_1)/\Phi \quad (\text{ДВ}), \quad (16)$$

где  $\Phi$  — рефракция ИОЛ в воде;  $k_2 = (n_2 - 1)/(n_2 - n_1)$  (см. табл. 1);  $n_1, n_2$  — коэффициенты преломления среды и материала линзы.

Т а б л и ц а 2

Материал ИОЛ	Φ в воде, дптр			
	ИОЛ в воздухе		ИОЛ в воде	
	Φоэма			
	ПВ	ДВ	ПВ	ДВ
ПММА	11,5 (11)	10,5 (9,5)	15,5 (14,5)	20,5 (19,5)
Лейкосапфир	26 (24,5)	21 (19,5)	33 (31)	34,5 (32)

Таблица 3

№ п/п	Модель	Форма	Материал	Ф в воде, дптр	$D$ (оптич.), мм	$f^*$ (в воздухе), мм	$R^*$ , мм	Фирма, страна
1	T-26	ДВ	ПММА	11	5	28,7	28,1	МНТК «Микрохирургия глаза», Россия, Москва
2	T-26	ДВ	ПММА	20	5	15,8	15,5	БЕЛОМО, Беларусь, Минск
3	CMS C1	ПВ	ПММА	19	6	16,6	8,1	"Alcon", США
4	A2604UV	ПВ	ПММА	24,5	6	12,9	6,3	"Beijing", Китай
5	LIOL 10	ПВ	Лейко-сапфир	18	5,2	31,2	24,3	ЭФКОН, Россия, Арзамас
6	МКЛ СТ-170	ПВ	Лейко-сапфир	21	5,2	26,8	20,5	АОЗТ ИОЛ, Россия, Санкт-Петербург

\* Значения, рассчитанные по формулам (14)–(16).

Испытания линз проводились в два этапа. На первом контролировалась форма поверхностей, т. е. погрешность изготовления (см. рис. 1). На втором этапе проверялось качество линзы в целом (см. рис. 2) путем измерения диаметра пятна минимального рассеяния  $\alpha$ . Затем измеренные значения сравнивались со значениями, рассчитанными по формулам (10), (11) для линз с идеальными сферическими и плоскими поверхностями (табл. 4). Измерения и расчеты проводились для диафрагмы диаметром  $D = 4,5$  мм и длины волны  $\lambda = 0,633$  мкм (He—Ne-лазер). Дифракционный угловой диаметр сфокусированного пятна рассчитывался по формуле (13) и составлял для всех ИОЛ (при  $D = 4,5$  мм) в среде ( $n_1 = 1,3346$ )  $0,88'$  и в воздухе  $1,18'$  независимо от значения рефракции.

При контроле сферических поверхностей (см. рис. 1) в измерительном плече интерферометра устанавливался объектив с относительным отверстием  $f/1,5$ . ИОЛ располагались так, чтобы центр кривизны контролируемой поверхности совпадал с фокусом объектива. Волновой фронт, отраженный от измеряемой поверхности, интерферировал с опорным (референтным), и картина интерференционных полос наблюдалась на экране монитора. Изгиб полос в долях полосы  $N_1'$  характеризовал отклонение поверхности от сферы или плоскости. С помощью стандартной программы картина полос обрабатывалась и записывалась в память компьютера, а затем выводилась на лазерном принтере на бумагу. На рис. 4 приводятся картины интерференционных полос в отраженном свете в воздухе для исследованных ИОЛ. Перевод волновых aberrаций в реальные условия  $N$  (линза в среде) осуществлялся по формулам (1), (2).

Функция рассеяния точки (распределение интенсивности в пятне минимального рассеяния) контролировалась по схеме рис. 2. Расстояние от фокуса объектива интерферометра до фотоматрицы составляло 2550 мм. Фактически это было расстояние между предметом и изображением ( $S + S' = 2550$ ;  $S, S'$  — расстояния от линзы до предмета и изображения соответственно). ИОЛ устанавливалась так, чтобы ее фокус был вблизи фокуса объектива. Затем линза перемещалась вдоль оптической оси до тех пор, пока пятно минимального рассеяния не совмещалось с фотоматрицей. Фокальные

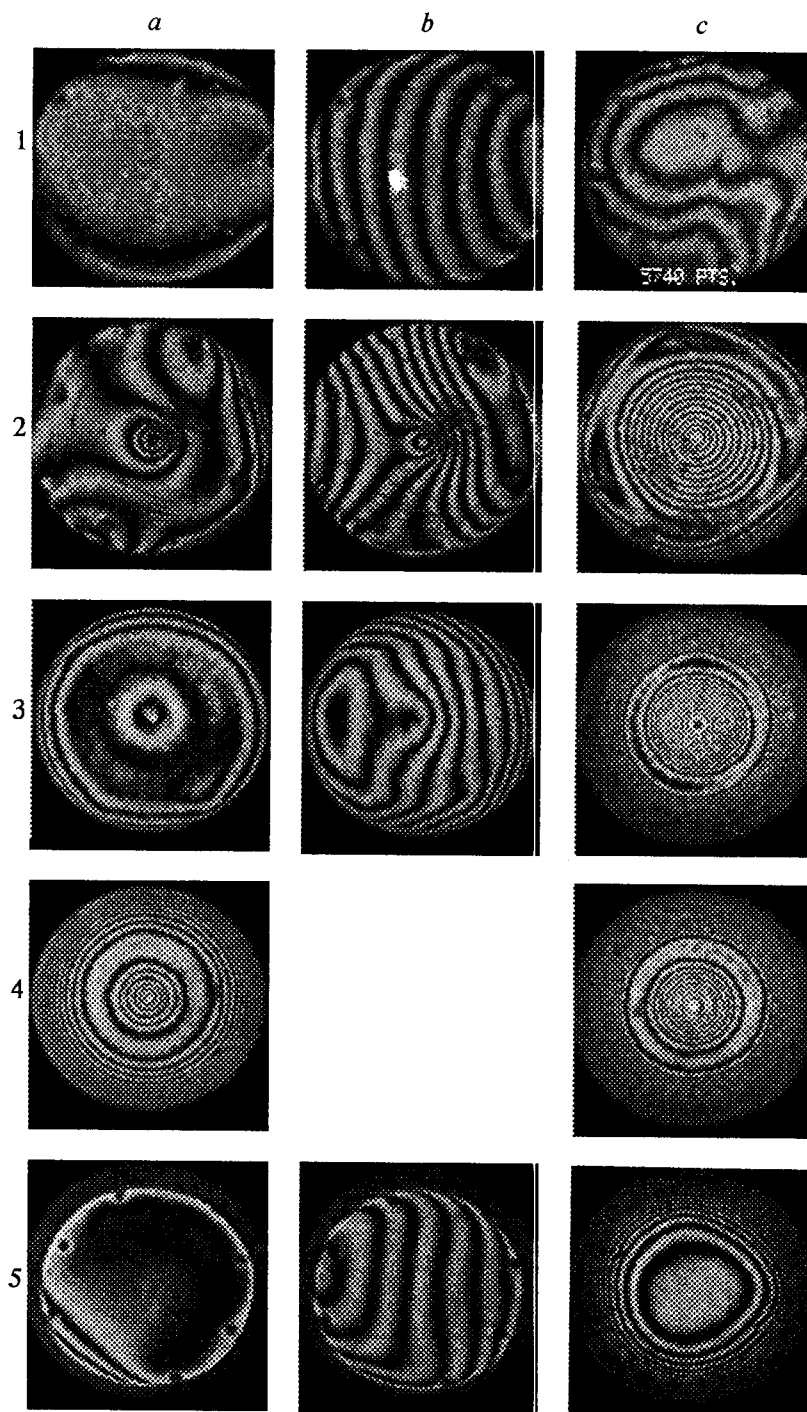
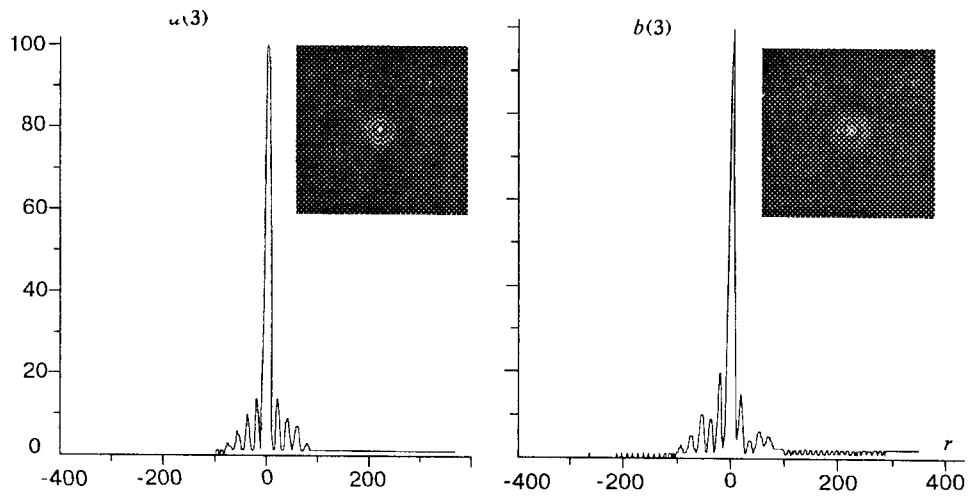
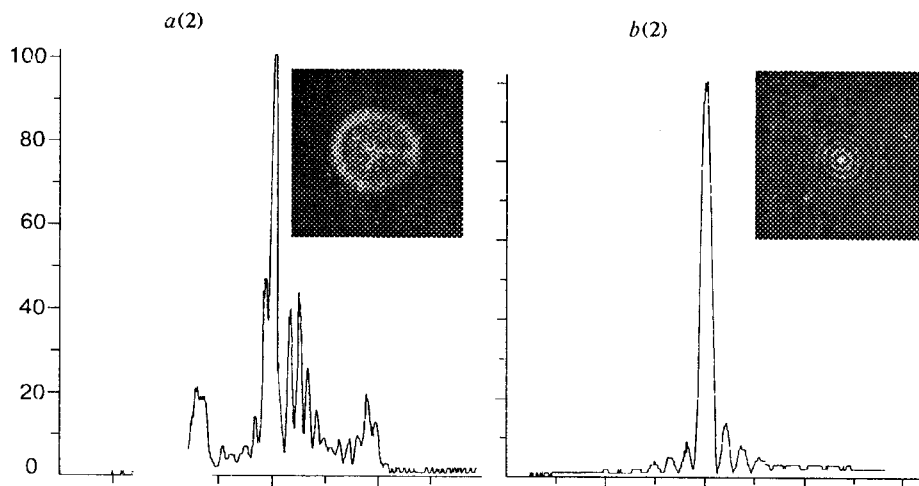
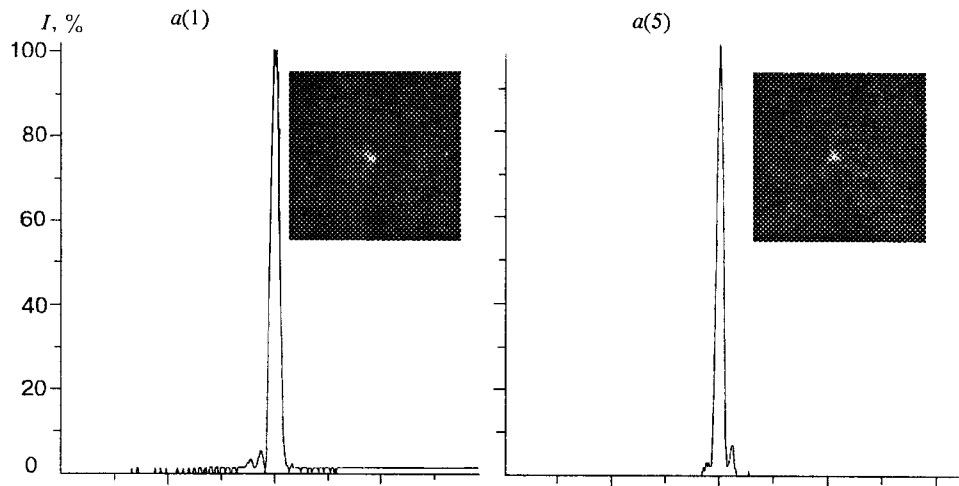


Рис. 4. Интерферограммы волновых aberrаций исследуемых поверхностей ИОЛ. Последовательность интерферограмм (сверху вниз) соответствует порядковым номерам ИОЛ в табл. 3: *a*, *b*, *c* — интерферограммы в отраженном свете от передних сферических поверхностей линз (*a* — широкие полосы, *b* — узкие) и от задних (плоских или сферических) через толщину материала (*c*)





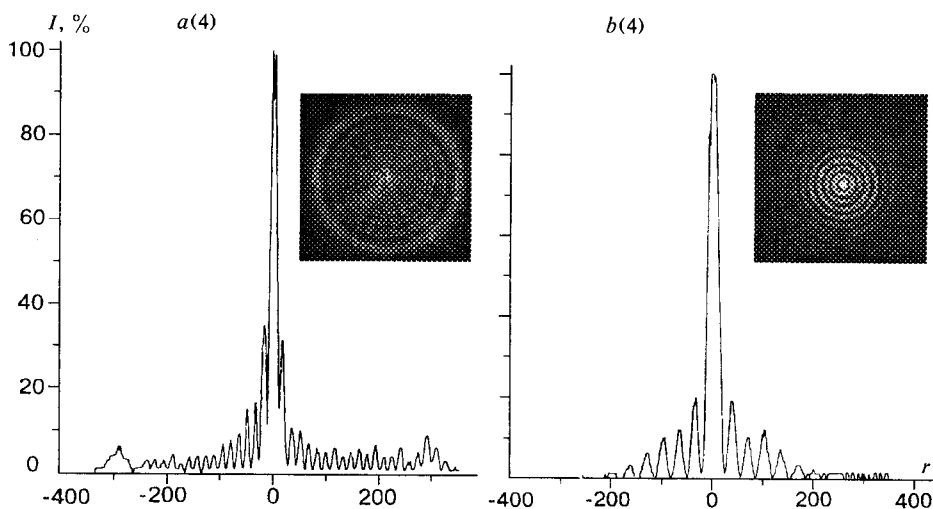


Рис. 5. Нормированные распределения интенсивности в плоскости кружка минимального рассеяния (а) и вблизи параксиального фокуса (б).  
Номера распределений в скобках соответствуют порядковым номерам ИОЛ в табл. 3, 4;  $r$  — расстояние от центра функции рассеяния точки

расстояния линз (см. табл. 3) были значительно меньше, чем  $S'$ , поэтому достаточно точно можно считать, что  $S \approx f$ , а линейное увеличение  $\gamma$  равно

$$\gamma = S'/f \approx (2550 - f)/f \approx 2550/f. \quad (17)$$

Изображение пятна минимального рассеяния проецировалось на фотодиодную матрицу с  $1024 \times 1024$  элементами. Расстояние между элементами равнялось 25 мкм. Разброс по чувствительности между элементами не превышал 10 %, число градаций яркости составляло 256. В наших экспериментах дифракционный размер изображения точечного источника составлял в воздухе 1,18' или 0,875 мм и, следовательно, регистрировался 35 элементами фотоматрицы. Это достаточно высокое разрешение. Максимальный линейный размер пятна минимального рассеяния достигал 22,1' (см. табл. 4) или 16,4 мм ( $\sim 656$  элементов).

На рис. 5 показаны функции рассеяния точки в плоскости пятна минимального рассеяния и вблизи параксиального фокуса, нормированные по максимальной интенсивности  $I$  (в процентах). Плоские участки графиков при низких значениях интенсивности обусловлены целочисленным преобразованием ФРТ с градацией интенсивности 1 %. Шаг шкалы по оси абсцисс составляет 25 мкм ( $\pm 400$  делений соответствуют  $\pm 10$  мм).

Диаметры пятен рассеяния измерялись по графикам рис. 5 на уровне интенсивности 2 % от максимума. Угловой диаметр пятен  $\alpha$  определялся путем деления измеренных значений на  $(2550 - f)$  мм. В табл. 4 приведены значения  $\alpha_c$  (4-й столбец), рассчитанные по формулам (10), (11) с учетом дифракции, и значения  $\alpha_i$  (5-й столбец), полученные экспериментально в воздухе. В скобках приводятся значения  $\alpha$  для среды. При расчетах дифракционный размер вводился по уровню интенсивности 2 %. На основании [6] он составляет 0,87 от размера по нулевому уровню, т. е. 1,03' (в воздухе) и 0,77' (в воде).

Следует отметить, что в экспериментальные значения входит дифракционное размытие изображения, собственные сферические aberrации линзы и погрешность изготовления. Вычитая из экспериментальных данных расчетные с учетом дифракции, получаем погрешность изготовления  $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_c$  (6-й столбец).

Таблица 4

№ п/п	Ф в воде, дптр	Форма, материал	Значение $\alpha$ в воздухе (в воде), угл. мин		$\Delta\alpha$ в воздухе (в воде), угл. мин
			Расчетное $\alpha_c$	Экспериментальное $\alpha_l$	
1	11	ДВ ПММА	2,44 (0,90)	2,88 (0,95)	0,44 (0,05)
2	20	ДВ ПММА	9,41 (1,57)	13,23 (1,91)	3,82 (0,34)
3	19	ПВ ПММА	6,23 (2,50)	6,2 (2,50)	0,03 (0,00)
4	24,5	ПВ ПММА	12,13 (4,40)	22,1 (7,66)	9,97 (3,26)
5	18	ПВ Лейкосапфир	1,42 (0,91)	1,93 (1,10)	0,51 (0,09)
6	21	ПВ Лейкосапфир	1,66 (1,00)	1,93 (1,10)	0,27 (0,10)

Экспериментальные данные приводились к среде (в скобках 5-го столбца) следующим образом: отнималось значение дифракционного размера в воздухе на уровне 2 % (1,03'), остаток делился на коэффициент  $\alpha_1/\alpha$  (см. табл. 1), затем прибавлялось значение дифракционного размера в среде (0,77').

Из табл. 4 видно, что погрешность изготовления первых трех моделей ИОЛ из ПММА и ИОЛ из лейкосапфира (5-я и 6-я модели) меньше по значению, чем дифракционный размер точки изображения, равный 0,77'. Четвертая модель ИОЛ имеет погрешность в 3 раза больше дифракционного предела. Полученные результаты хорошо коррелируют с измерениями формы поверхностей ИОЛ (см. рис. 4). Так, для четырех линз лучшего качества отступление поверхностей от сферы и плоскости в отраженном свете в воздухе составляет не более 0,5 полосы ( $N'_1 = 0,5$ ), что соответствует для ПММА и лейкосапфира в проходящем свете в воде  $N'_1/12,95$  и  $N'_1/4,64$  (см. табл. 1), т. е. меньше 0,1 полосы. Такое отступление практически не влияет на качество изображения линз. Для двух менее качественных линз (2-я и 4-я модели) отступление от идеальных поверхностей составляет в воздухе 4—15 полос или 0,3—1,2 полосы в среде.

Интересно сравнить погрешность изготовления с собственными сферическими aberrациями (4-й и 6-й столбцы табл. 4). Для первой и третьей линз погрешность изготовления практически отсутствует, для пятой и шестой — в 10, а для второй — в 5 раз меньше собственных aberrаций, для четвертой — близка к собственным aberrациям по значению.

Следует заметить, что для некоторых исследованных ИОЛ (вторая, третья и четвертая линзы из ПММА с рефракцией 19—24,5 дптр в табл. 4) даже расчетный угловой диаметр кружка минимального рассеяния  $\alpha$  в воде превышает значение нормальной остроты зрения (1') в 1,6—4,4 раза (см. значения  $\alpha$  в скобках в четвертой колонке табл. 4). Для таких линз погрешности в изготовлении особенно нежелательны, так как они дополнительно ухудшают качество изображения. Это видно на примере ИОЛ 2-й и 4-й моделей.

**Заключение.** Разработаны методы проверки оптического качества интраокулярных линз, основанные на интерференционном измерении деформации волнового фронта, отраженного от поверхностей линзы, и измерении диаметра пятна минимального рассеяния при изображении линзой точечного источника света. Хотя предложенные методы не затрагивают свойств глаза и направлены только на исследования оптических характеристик ИОЛ, тем не менее они дают полезную информацию для изготовителей ИОЛ и офтальмологов.

Экспериментальные оптические схемы испытания ИОЛ построены на основе интерферометра типа Физо и не требуют дополнительной высокоразрешающей оптики. Оптическое качество ИОЛ оценивалось в целом, а также с учетом собственных aberrаций и погрешностей изготовления.

Показано, что даже при идеальном изготовлении поверхностей линзы угловой диаметр пятна минимального рассеяния может превышать значение нормальной остроты зрения ( $1'$ ) в несколько раз вследствие aberrаций, присущих самой линзе.

В отличие от других методов, где используется кювета с водой, в предложенных методах контроль ИОЛ проводится в воздухе, а затем результаты измерения приводятся к реальным условиям (в среде). При этом значительно упрощается процедура проверки ИОЛ и повышается точность измерений диаметра пятна минимального рассеяния в 3—10 раз, а волновых aberrаций в 4—13 раз в зависимости от материала линзы.

#### 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. Ленкова Г. А. Оптические характеристики интраокулярной линзы в воздухе, воде и кювете // Автометрия. 1997. № 3. С. 35.
5. Ленкова Г. А., Чуринов Е. Г. Высокоапертурный микрообъектив с киноформным корректором // Автометрия. 1991. № 6. С. 70.
6. Ленкова Г. А. Особенности построения оптических схем лазерных сканирующих устройств (Ч. I) // Автометрия. 1993. № 6. С. 39.

*Поступила в редакцию 13 февраля 1997 г.*