

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.327.68 : 535.4

### ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЗРАЧКА ГЛАЗА И ФАЗОВОГО СДВИГА В ДИФРАКЦИОННОЙ СТРУКТУРЕ НА БИФОКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

Г. А. Ленкова

*Учреждение Российской академии наук*

*Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

*E-mail: lenkova@iae.nsk.su*

При уменьшении зрачка глаза возможно нарушение бифокальных свойств интраокулярной линзы (ИОЛ) — искусственного хрусталика глаза. Для преодоления этого недостатка в структуру дифракционного компонента ИОЛ вводится фазовый сдвиг. Приведены результаты аналитического исследования распределения интенсивности света на оси бифокальной ИОЛ при различных значениях диаметра зрачка глаза и фазового сдвига в дифракционном компоненте с оптической силой 4,2 дптр. Показано, что из-за расширения и асимметрии функции распределения интенсивности, возникающих при малых диаметрах зрачка, фокусы 0-го (дальнее зрение) и +1-го (ближнее зрение) порядков бифокальной ИОЛ влияют друг на друга: сближаются или расходятся, разделяются или перекрываются. Суммарное распределение интенсивности может быть непрерывным, или в нём может наблюдаться провал, величина которого зависит от диаметра зрачка и фазового сдвига. Отмечено, что оптимальный фазовый сдвиг, при котором разделение фокусов (бифокальность) начинается с диаметра зрачка  $\sim 0,9$  мм и далее при его расширении не нарушается, составляет  $180^\circ$  ( $\pi$  радиан).

*Ключевые слова:* интраокулярная линза, искусственный хрусталик глаза, дифракционно-рефракционная линза, бифокальная линза.

**Введение.** Дифракционно-рефракционная интраокулярная линза (ИОЛ) — искусственный хрусталик глаза — представляет собой обычную рефракционную линзу (рефракционный компонент), на одной из преломляющих поверхностей которой формируется кольцевая дифракционная микроструктура (дифракционный компонент) типа зонной пластинки Френеля [1, 2]. В зависимости от высоты и формы дифракционной структуры падающий свет направляется преимущественно в два или три порядка дифракции равной интенсивности (по 40,5 или 28,8 %) [3] и рефракционный компонент совместно с дифракционным образует двухфокусную или трёхфокусную дифракционно-рефракционную линзу. Если высота структуры соответствует фазовой задержке в полдлины волны ( $\lambda/2$ ), то образуются 0-й и +1-й порядки дифракции при пилообразной (киноформной) форме структуры, подобной фазовой линзе Френеля, и -1-й и +1-й порядки при бинарной (прямоугольной) форме. В последнем случае при фазовой задержке, равной  $0,32\lambda$ , световой пучок разделяется на три порядка: -1-й, 0-й и +1-й. При пилообразной структуре в 0-м порядке дифракционный компонент не влияет на преломляющую силу рефракционного компонента и ИОЛ формирует на сетчатке изображения дальних объектов, а в +1-ом порядке создаётся дополнительная оптическая сила и ИОЛ становится способной проецировать на сетчатку ближние объекты. При бинарной структуре дальние объекты формируются в -1-м порядке, а ближние — в 0-м или в 0-м и +1-м порядках в зависимости от высоты структуры.

В отличие от обычных искусственных хрусталиков дифракционно-рефракционные ИОЛ позволяют пациенту видеть ближние и дальние предметы без очков. Однако способность видеть на разных расстояниях от глаза (псевдоаккомодация) может нарушаться при ярком освещении, когда уменьшается диаметр зрачка. Это связано со структурой дифракционного компонента. В зависимости от формы профиля (пилообразной или бинарной) оптическая сила дифракционного компонента составляет  $\sim 4,2$  [1, 2] или  $\sim 2,1$  дптр. При такой оптической силе диаметр центральной зоны имеет довольно большой размер:  $\sim 1,0$  или  $\sim 1,4$  мм [4]. Последнее обстоятельство может быть причиной нарушения бифокального зрения. При сужении зрачка уменьшается число открытых зон дифракционного компонента и, следовательно, снижается эффективность бифокального функционирования. Кроме того, если диаметр зрачка глаза будет приближаться к размеру центральной зоны, то ИОЛ вообще может превратиться из бифокальной линзы в монофокальную. Для сохранения бифокальности и повышения эффективности уменьшают диаметр центральной зоны путём введения фазового сдвига в структуру дифракционного компонента [2, 5]. В результате все зоны смещаются ближе к центру и увеличивается их число в поле зрачка, площадь центральной зоны уменьшается, но площади остальных (кольцевых) остаются равными между собой. Неравенство площадей зон при малых зрачках может вызвать перераспределение интенсивности и изменения фокусных расстояний в порядках дифракции, а следовательно, внести изменения в формирование изображений дальних и ближних объектов. Определение условий, при которых не нарушается бифокальное функционирование ИОЛ, имеет существенное значение при выборе конструкции дифракционного компонента.

Цель данной работы — аналитическое исследование зависимости бифокальных свойств дифракционно-рефракционной ИОЛ, а именно изменений фокусных расстояний (или оптической силы ИОЛ) и дифракционной эффективности (соотношения интенсивностей в фокусах или порядках дифракции) при дальнем и ближнем зрении, от диаметра зрачка глаза и фазового сдвига в структуре дифракционного компонента, а также определение оптимального фазового сдвига.

**Постановка задачи.** Исследования проводились для ИОЛ, параметры которых соответствуют бифокальной дифракционно-рефракционной интраокулярной линзе марки МИОЛ-Аккорд, разработанной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск) при участии Новосибирского филиала ФГУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова» и Научно-производственного предприятия «Репер-НН» (г. Нижний Новгород) [2]. Материал линзы — олигокарбонатметакрилат (эластичный акрил) с показателем преломления 1,505 для  $\lambda_D = 0,5893$  мкм. Рефракционный компонент имеет плоско-выпуклую форму. Дифракционная структура формируется на плоской поверхности, обращённой к сетчатке. Структура имеет пилообразный профиль, характерный для большинства конструкций бифокальных ИОЛ [1, 5].

Оптическая схема модели глаза [6], которая использовалась для расчёта оптических характеристик и анализа бифокальных свойств ИОЛ, представлена на рис. 1 (1 — роговица, 2 — диафрагма, имитирующая зрачок глаза, 3 — линза МИОЛ-Аккорд). Сетчатка на рисунке не показана, а линза изображена схематично. В действительности высота дифракционной структуры линзы МИОЛ-Аккорд составляет  $\sim 1,6$  мкм, что приблизительно в 500 раз меньше толщины линзы, а число зон ( $\sim 9$ ) на диаметре зрачка, равном 3 мм, больше, чем на рисунке. На ИОЛ падает пучок света, формируемый роговицей и сходящийся в точке  $A$  на расстоянии  $f$  от линзы. После рефракционного компонента пучок разделяется на дифракционной структуре на две части, из которых одна проходит структуру без изменения направления и фокусируется в точке  $F_0$ , что соответствует 0-му порядку дифракции, а вторая часть, дополнительно преломляясь в +1-м порядке, фокусируется в точке  $F_{+1}$ .

В качестве расчётной длины волны выбрана  $\lambda = 0,5461$  мкм, рекомендуемая в [7] для контроля качества ИОЛ. Оптическая сила (рефракция) исследуемой ИОЛ соответ-

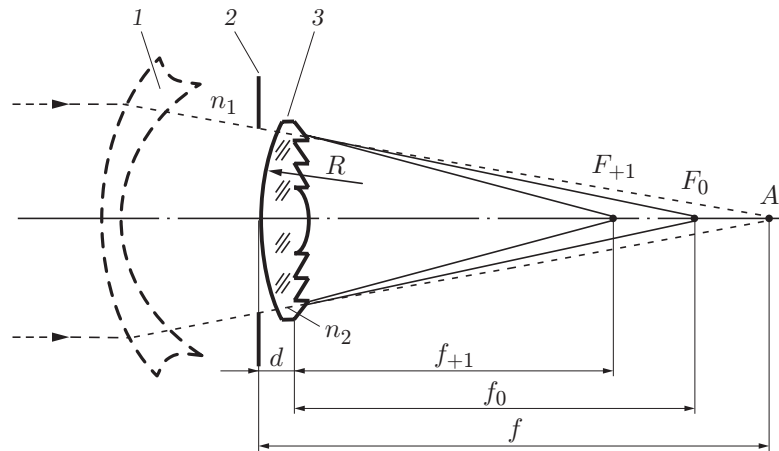


Рис. 1. Оптическая схема модели глаза

ствуется среднему значению рефракции имплантируемых ИОЛ. Радиус кривизны сферической поверхности ( $R = 8,24$  мм) выбран из стандартного ряда радиусов, толщина ИОЛ составляет  $d = 0,7$  мм. Значения показателей преломления внутриглазной жидкости  $n_1 = 1,3377$  и материала ИОЛ  $n_2 = 1,5061$ , оптическая сила  $\Phi_d = 4,2$  дптр и фокусное расстояние  $f_d = 318,96$  мм дифракционного компонента соответствуют  $\lambda = 0,5461$  мкм. Расчётные значения рефракций ИОЛ для дальнего и ближнего зрения равны  $\Phi_0 = 20,55$  и  $\Phi_{+1} = 24,75$  дптр.

При исследовании не принимались во внимание коррекционные поправки в структуре дифракционного компонента линзы МИОЛ-Аккорд. Поправки вводятся для компенсации aberrаций роговицы, стекловидного тела глаза и рефракционного компонента, но они не влияют на бифокальные свойства ИОЛ. Бифокальные свойства не зависят также от расстояния до объекта, поэтому для упрощения расчётов анализ проводился при освещении глаза параллельным пучком. Роговица на рис. 1 показана штриховой линией, так как в данном случае она служит только для формирования сходящегося пучка лучей. Расстояния  $f_0$  и  $f_{+1}$  фактически являются задними фокусными расстояниями модели глаза [6] с ИОЛ. Для вышеуказанных параметров ИОЛ  $f_0 = 20$  мм,  $f_{+1} = 18,82$  мм.

**Дифракционная структура.** Радиусы  $r_0$ ,  $r_k$  и площади  $S_0$ ,  $S_k$  центральной и кольцевых зон структуры дифракционного компонента рассчитывались по формулам, следующим из соотношения  $(k + a_0)\lambda = a_1 r_k^2$ :

$$r_0 = \sqrt{a_0 \lambda / a_1}, \quad (1)$$

$$r_k = \sqrt{(k + a_0) \lambda / a_1} = \sqrt{2 f_d (k + a_0) \lambda / n_1}, \quad (2)$$

$$S_0 = \pi r_0^2 = \pi a_0 \lambda / a_1, \quad (3)$$

$$S_k = \pi \Delta r_k^2 = \pi \lambda / a_1 = \text{const}, \quad (4)$$

где  $k$  и  $r_k$  — номер и радиус зоны ( $k = 0$  соответствует центральной зоне,  $k = 1, 2, \dots$  — номер кольцевых зон);  $\lambda$  — расчётная длина волны в вакууме;  $a_0$  — фазовый сдвиг, выраженный в долях  $\lambda$ ;  $a_1 = n_1 / 2 f_d = \Phi_d / 2000$  — коэффициент, зависящий от коэффициента преломления внутриглазной жидкости ( $n_1$ ) и фокусного расстояния ( $f_d$  в миллиметрах)

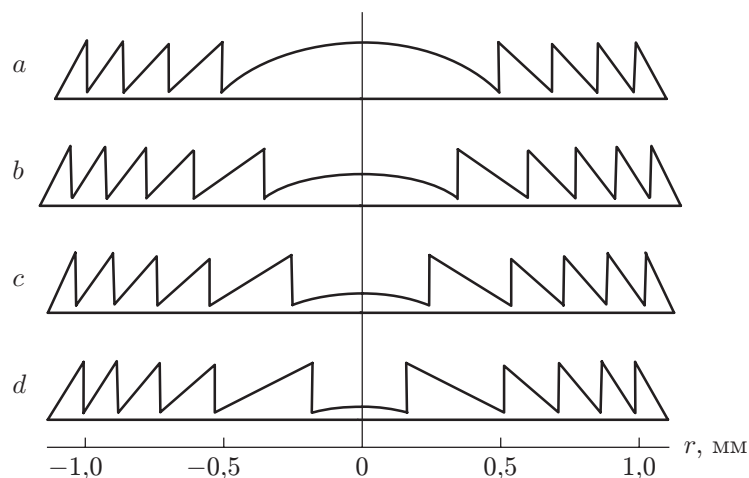


Рис. 2. Виды дифракционных структур

или оптической силы ( $\Phi_d$ ) дифракционного компонента;  $\Delta r_k = r_k - r_{k-1}$ . Для значений  $n_1$ ,  $f_d$  и  $\Phi_d$ , приведённых выше,  $a_1 = 0,002097 \text{ мм}^{-1}$ . Из формулы (2) следует, если  $a_0 = 1$ , то  $r_0 = 0,51 \text{ мм}$ ,  $r_k = 0,72$  ( $k = 1$ );  $0,88$  ( $k = 2$ );  $1,02$  ( $k = 3$ );  $1,14$  ( $k = 4$ );  $1,25 \text{ мм}$  ( $k = 5$ ) и т. д.

По формулам (1) и (2) определяются только границы зон, а высота структуры задаётся исходя из желаемой дифракционной эффективности. Из (3) и (4) следует, что площадь центральной зоны ( $S_0$ ) изменяется пропорционально  $a_0$ , а площади кольцевых ( $S_k$ ) равны постоянной величине, зависящей от  $a_1$ , т. е. от оптической силы дифракционного компонента  $f_d$ .

При  $a_0 = 1$  правая часть формулы (2) соответствует обычной дифракционной линзе, для которой характерно, что площади центральной и кольцевых зон равны друг другу. Но в этом случае диаметр центральной зоны имеет довольно большой размер, который для дифракционного компонента с  $\Phi_d = 4,2$  дптр составляет  $\sim 1 \text{ мм}$ . При диаметрах зрачка глаза такого же порядка ИОЛ становится монофокальной. Чтобы сохранить бифокальность, зоны приближают к центру путём уменьшения  $a_0$ .

На рис. 2 показаны виды дифракционных структур для  $a_0 = 1,0$  (a);  $0,5$  (b);  $0,25$  (c);  $0,125$  (d), что соответствует фазовым сдвигам в радианах  $\varphi = 2\pi$ ;  $\pi$ ;  $\pi/2$ ;  $\pi/4$ . Значение сдвига  $2\pi$  фактически равно нулевому сдвигу, но оно введено для наглядности процесса сравнения.

При уменьшении  $a_0$  радиусы ( $r_0$ ) и площади ( $S_0$ ) центральных зон уменьшаются и соответствуют в нашем случае значениям  $r_0 = 0,51$ ;  $0,36$ ;  $0,26$ ;  $0,18 \text{ мм}$  и  $S_0 = 0,82$ ;  $0,41$ ;  $0,21$ ;  $0,10 \text{ мм}^2$ . Площади кольцевых зон остаются равными площади центральной зоны при  $a_0 = 1$ . Высота структуры в центре уменьшается (см. рис. 2), а число зон увеличивается, но не более чем на одну. От вида центральной зоны и диаметра зрачка зависит распределение интенсивности вдоль и поперёк оптической оси, а следовательно, и соотношение интенсивностей в фокусах 0-го и +1-го порядков дифракции.

**Влияние диаметра зрачка на распределение интенсивности вдоль оптической оси глаза.** Диаметр зрачка глаза влияет, прежде всего, на общее число рабочих зон. При малом числе зон функция распределения интенсивности расширяется и становится возможным частичное перекрытие порядков. Кроме того, в зависимости от диаметра зрачка изменяется форма распределения интенсивности вдоль оси, так как на положение фокусов влияет дифракционная оптическая сила зрачка ( $\Phi_r$ ) как диафрагмы.

Влияние диафрагмы проявляется в следующем. При прохождении параллельного светового пучка через диафрагму некоторая часть света дифрагирует в виде сходящихся и

расходящихся пучков, которым до диафрагмы соответствуют отрицательные, а после диафрагмы положительные дифракционные фокусы (максимумы интенсивности). Расстояние от фокусов до диафрагмы

$$f_r = \pm r^2 n / N \lambda, \quad (5)$$

где  $N$  — числа Френеля, нечётные целые значения которых  $N = 1, 3, 5, \dots$  соответствуют максимумам интенсивности. Особенно заметными являются наиболее интенсивные максимумы с  $N = 1$ , формирующие оптическую силу зрачка

$$\Phi_r = n / f_r = \lambda / r^2, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус зрачка. Например, если  $r = 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5$  мм, то  $\Phi_r = 54,60; 8,74; 2,18; 0,97; 0,55; 0,24$  дптр, что соответствует дифракционным фокусным расстояниям  $f_r = 24,5; 153,1; 612,4; 1377,9; 2449,6; 5511,5$  мм. Можно отметить, что влияние дифракционной оптической силы зрачка будет заметно проявляться при  $r < 1$  мм, когда  $\Phi_r > 0,55$  дптр ( $f_r < 2449,6$  мм).

Падение на диафрагму сходящегося светового пучка равносильно установке в параллельном пучке рефракционной линзы до или после диафрагмы. При этом в область фокусировки пучка, проходящего диафрагму без отклонения, линза будет проектировать изображения дифракционных максимумов (фокусов диафрагмы) и минимумов, которые изменяют форму распределения интенсивности основного пучка. Расстояния изображений максимумов до линзы легко определить по формулам геометрической оптики:

$$S'_+ = f f_r / (f_r + f); \quad S'_- = f f_r / (f_r - f), \quad (7)$$

где  $f$  — фокусное расстояние линзы;  $f_r$  — абсолютное значение, рассчитанное по формуле (5);  $S'_+$  и  $S'_-$  — расстояния изображений положительных и отрицательных фокусов диафрагмы. Изображения  $S'_+$  расположены ближе к линзе, чем её фокус, а  $S'_-$  — дальше.

В таблице приведены данные расчётов по формуле (7) для  $f = 20$  мм (в 1-м столбце в скобках указывается число зон дифракционного компонента при указанном радиусе). Например, при  $r = 0,1$  мм изображение отрицательного фокуса диафрагмы ( $S'_-$ , 5-й столбец) проектируется на большом расстоянии ( $S'_- = 109$  мм) от линзы и практически не будет влиять на распределение интенсивности вдоль оси. Изображение положительного фокуса ( $S'_+$ , 4-й столбец) проектируется ближе фокуса линзы ( $S'_+ = 11,01$  мм). Свет, направляемый в это изображение, взаимодействует с основным пучком, и в результате общий максимум интенсивности ( $z_{\max} = 13,30$  мм) не совпадает с фокусом линзы ( $f = 20$  мм), а сдвигается в сторону линзы. С увеличением радиуса зрачка значения  $S'_+$  и  $S'_-$  приближаются к фокусному расстоянию линзы и при  $r \sim 1$  мм отличаются от него меньше, чем на 1 %.

Аналитически суммарную картину распределения интенсивности ( $U_D^2$  и  $U_K^2$ ) вдоль оси можно получить, используя дифракционное приближение Дебая или Кирхгофа [8]:

$$U_D^2 = \left( \frac{kr^2}{2f^2} \right)^2 \left( \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right)^2, \quad (8)$$

$$U_K^2 = \left( \frac{kr^2}{2zf} \right)^2 \left( \frac{\sin(u'/4)}{u'/4} \right)^2, \quad (9)$$

где  $U_D$  и  $U_K$  — амплитуды распределения интенсивности на оси в зависимости от расстояния  $z$  от линзы;  $k = 2\pi n / \lambda$  — волновое число;  $u = k(r/f)^2(z-f)$ ;  $u' = k(r/f)^2(z-f)(f/z) = u(f/z)$ .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r$ , мм	$\pm f_r$ , мм	$\Phi_r$ , дптр	$S'_+$ , мм	$S'_-$ , мм	$z_{\max}$ , мм (20)	$z_{\max}$ , мм ( $a_1$ )	$r/20$ , рад	$r/20$ , град	$(\Delta z)_D$ , мм
0,1	24,50	54,6	11,01	109,00	13,30	12,82	0,005	0,29	32,66
0,2	97,98	13,65	16,61	25,13	19,08	18,52	0,01	0,57	8,16
0,3	220,46	6,07	18,34	22,00	19,80	19,20	0,015	0,86	3,63
0,4	391,93	3,41	19,03	21,08	19,94	19,34	0,02	1,15	2,04
0,5 ( $\sim 1$ зона)	612,39	2,18	19,37	20,68	19,98	19,36	0,025	1,43	1,31
0,6	881,84	1,52	19,56	20,46	19,98	19,90	0,03	1,72	0,91
0,7 ( $\sim 2$ зоны)	1200,28	1,11	19,67	20,34	20,00	19,86	0,035	2,01	0,67
0,8	1567,71	0,85	19,75	20,26	20,00	19,98	0,04	2,29	0,51
0,9 ( $\sim 3$ зоны)	1984,14	0,67	19,80	20,20	20,00	19,92	0,045	2,58	0,40
1,0 ( $\sim 4$ зоны)	2449,55	0,55	19,84	20,16	20,00	19,98	0,05	2,86	0,33

Приближение Дебая (8) справедливо только при больших диаметрах диафрагмы. В этом случае главный максимум наблюдается в точке  $z_{\max} = f$ , а минимумы ( $z_{\min}$ ) располагаются приблизительно симметрично относительно этой точки на расстояниях

$$(\Delta z)_D = \pm(f - z_{\min}) = \pm(2\lambda/n)(f/r)^2, \quad (10)$$

где  $(\Delta z)_D$  — фактически продольная полуширина распределения интенсивности. В 10-м столбце таблицы приведены расчётные значения  $(\Delta z)_D$ , из которых видно, что только при  $r > 0,5$  продольная полуширина меньше расстояния между фокусами  $f_0 = 20$  мм и  $f_{+1} = 18,82$  мм, равного 1,18 мм.

При малых диафрагмах следует применять приближение Кирхгофа. На рис. 3 приведены графики распределения интенсивности, рассчитанной по формуле (9), из которых видно, что при  $r < 0,5$  мм (рис. 3, *a—c*) наблюдается асимметричность. По направлению к линзе интенсивность модулирует и быстро падает, а в противоположном направлении — полого уменьшается, причём главный максимум  $z_{\max}$  сдвигается по направлению к линзе. При  $r > 0,5$  мм (рис. 3, *d*) распределение становится почти симметричным и, начиная с этого значения  $r$ , уже можно применять приближение Дебая.

Для определения  $z_{\max}$  в области приближения Кирхгофа производную  $dU_K/dz$  приравняем к нулю и получим

$$\operatorname{tg}(u'/4) = (u'/4)(f/z). \quad (11)$$

Уравнение (11) не имеет аналитического решения. Значения  $z = z_{\max}$ , удовлетворяющие ему, можно определить графическим или итеративным методом. В 6-м столбце таблицы приведены значения  $z_{\max}$  в зависимости от  $r$ , рассчитанные для  $f = 20$  мм; в 8-м и 9-м столбцах указаны значения апертуры. При увеличении радиуса диафрагмы значение  $z_{\max}$  приближается к  $f$ . При угловой апертуре  $0,86^\circ$  ( $r = 0,3$  мм)  $z_{\max} = 19,8$  мм, что меньше  $f$  на 1 %. При  $r > 0,5$  мм максимум интенсивности практически совпадает с

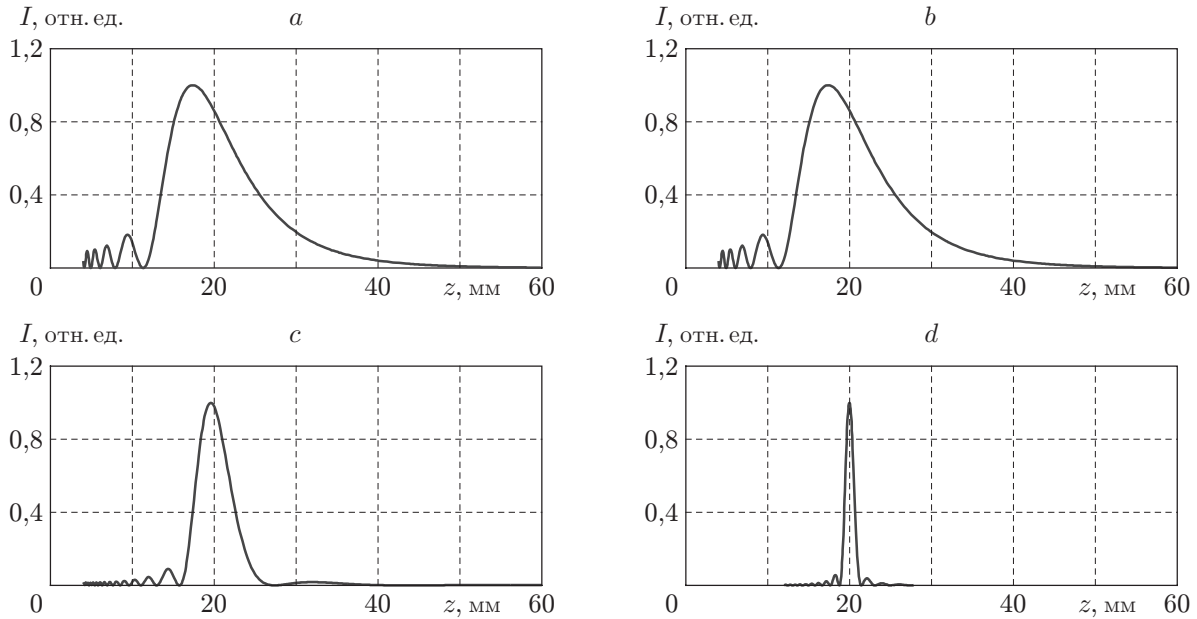


Рис. 3. Графики распределения интенсивности вдоль оси  $z$  при значениях радиуса диафрагмы:  $r = 0,1$  мм,  $z_{\max} = 13,30$  мм ( $a$ );  $r = 0,15$  мм,  $z_{\max} = 17,4$  мм ( $b$ );  $r = 0,25$  мм,  $z_{\max} = 19,6$  мм ( $c$ );  $r = 0,5$  мм,  $z_{\max} = 20$  мм ( $d$ )

фокусом ( $z_{\max} = f$ ). Если после линзы устанавливается дифракционный компонент ( $a_1 = 0,002097 \text{ мм}^{-1}$ ), то  $z_{\max}$  (0-й порядок, см. таблицу, 7-й столбец) уменьшается при тех же значениях  $r$  (например,  $z_{\max} = 19,2$  мм для  $r = 0,3$ ), а при  $r > 0,5$  мм колеблется в пределах 0,7–0,1 % относительно  $f$ . Непостоянство значения  $z_{\max}$  объясняется влиянием дифракции +1-го порядка.

**Распределение интенсивности вдоль оси дифракционно-рефракционной линзы.** В результате расширения и асимметрии функций распределения интенсивности фокусы 0-го и +1-го порядков дифракционно-рефракционной ИОЛ могут расходиться, сближаться или совпадать, а суммарное распределение быть непрерывным или с провалом, величина которого зависит от диаметра зрачка и фазового сдвига в дифракционной структуре.

При диаметрах диафрагм меньше 1 мм ( $r \leq 0,5$  мм) и без фазового сдвига ( $a_0 = 1$  или 0) разделение на пучки 0-го и +1-го порядков отсутствует, так как радиус диафрагмы сравним с радиусом центральной зоны ( $r_0 = 0,51$  мм). Разделение на порядки дифракции начинается при диаметрах больше 1 мм ( $r > 0,5$  мм), когда открыто больше одной зоны. Однако в интервале  $r = 0,5\text{--}0,8$  мм, где полуширина  $(\Delta z)_D = 1,31\text{--}0,5$  мм (см. таблицу, 10-й столбец) каждого из порядков сравнима с расстоянием между фокусами ( $f_0 - f_{+1} = 1,18$  мм), порядки будут влиять друг на друга. При введении фазового сдвига диаметр центральной зоны уменьшается и разделение на порядки начинается уже при  $r < 0,5$  мм.

В качестве примера на рис. 4,  $a\text{--}d$  показаны графики суммарного распределения интенсивности при  $r = 0,5$  мм в зависимости от фазового сдвига  $a_0$ . Графики строились с использованием системы Microsoft Excel. Данные для графиков рассчитывались на основе программы, разработанной П. С. Завьяловым. Из рисунка следует, что при  $a_0 = 1,0$  ( $a$ ) и  $0,125$  ( $d$ ) функции распределения интенсивности в фокусах 0-го и +1-го порядков практически полностью совпадают, при  $a_0 = 0,5$  ( $b$ ) разделены (провал 100 %), а при  $a_0 = 0,25$  ( $c$ ) частично совпадают (провал 50 %). При этом изменяются значения фокусных расстояний ( $f_0$  и  $f_{+1}$ ). В подписи под рисунком приводятся значения  $f_0$  и  $f_{+1}$ , а в скобках указываются

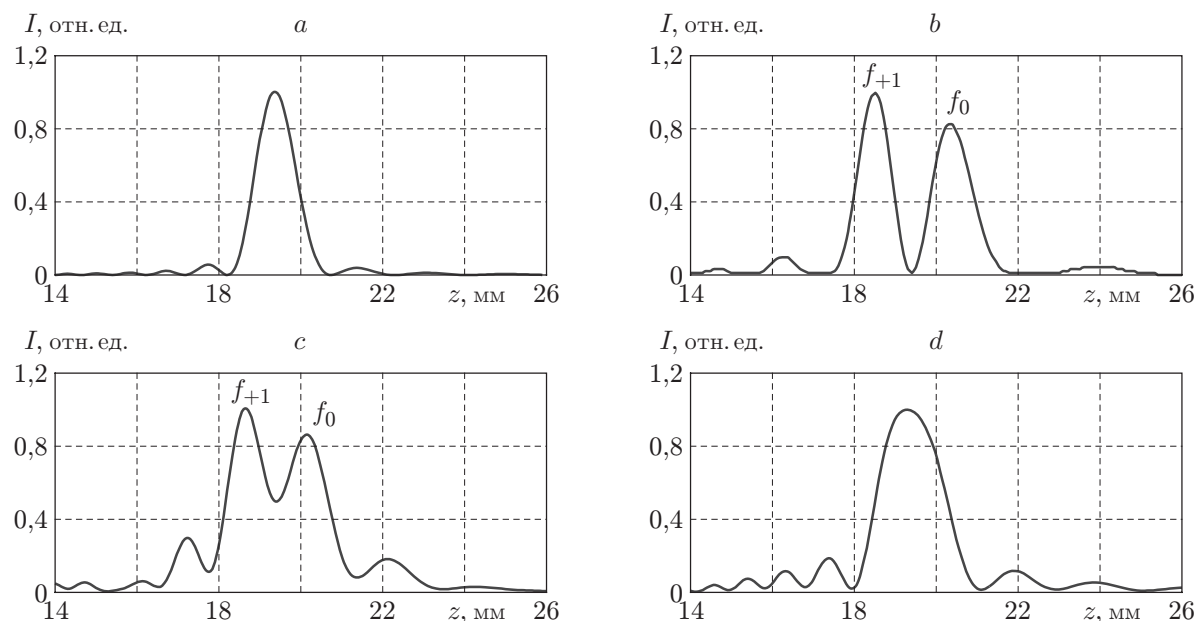


Рис. 4. Графики распределения интенсивности вдоль оси  $z$  при  $r = 0,5$  мм,  $a_1 = 0,002097$  и значениях фазового сдвига  $a_0$ :  $a$  —  $a_0 = 1$ ,  $f_0 = f_{+1} = 19,36$  мм ( $\Delta\Phi_0 = +2,21$  дптр,  $\Delta\Phi_{+1} = -1,98$  дптр);  $b$  —  $a_0 = 0,5$ ,  $f_0 = 20,34$  мм ( $\Delta\Phi_0 = -1,12$  дптр),  $f_{+1} = 18,48$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = +1,31$  дптр);  $c$  —  $a_0 = 0,25$ ,  $f_0 = 20,14$  мм ( $\Delta\Phi_0 = -0,47$  дптр),  $f_{+1} = 18,64$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = +0,69$  дптр);  $d$  —  $a_0 = 0,125$ ,  $f_0 = f_{+1} = 19,28$  мм ( $\Delta\Phi_0 = +2,49$  дптр,  $\Delta\Phi_{+1} = -1,70$  дптр)

отклонения оптических сил  $\Delta\Phi_0$  и  $\Delta\Phi_{+1}$  от их номинальных значений. Эти отклонения будут одинаковыми как для ИОЛ, так и для модели глаза, т. е. для ИОЛ в сходящемся пучке.

На рис. 5,  $a$ — $d$  приведены графики, иллюстрирующие изменения фокусных расстояний  $f_{+1}$  и  $f_0$  и разностей оптических сил в  $+1$ -м ( $\Phi_{+1}$ ) и  $0$ -м ( $\Phi_0$ ) порядках для  $a_0 = 1,0$ ;  $0,5$ ;  $0,25$ ;  $0,125$ , соответствующих фазовым сдвигам в радианах  $\varphi = 2\pi$ ;  $\pi$ ;  $\pi/2$ ;  $\pi/4$ , в зависимости от радиуса зрачка  $r$ . Изменение особенно заметно при малых фазовых сдвигах  $a_0$ : сначала фокусное расстояние  $f_{+1}$  уменьшается, а  $f_0$  увеличивается, т. е. оптическая сила в  $+1$ -м порядке возрастает, а в  $0$ -м снижается; затем изменения происходят в противоположных направлениях.

В отсутствие фазового сдвига ( $a_0 = 1$  или  $0$ ,  $r_0 = 0,51$  мм) бифокальные свойства ИОЛ проявляются уже при радиусе зрачка  $r = 0,6$  мм (см. рис. 5,  $a$ ). При этих параметрах в суммарной функции распределения интенсивности образуется провал 50 %. Введение фазового сдвига  $\varphi = \pi$  радиан ( $a_0 = 0,5$ ,  $r_0 = 0,36$  мм) вызывает провал 50 % уже при  $r = 0,43$  мм (см. рис. 5,  $b$ ). Для  $r = 0,5$  мм (см. также рис. 4,  $b$ ), когда открыты две зоны: центральная и первая кольцевая ( $r_1 = 0,51$  мм), наблюдается полное разделение порядков (провал 100 %). Дальнейшее расширение зрачка изменяет провал в распределении интенсивности в пределах 80–100 %. Уменьшение фазового сдвига до  $\varphi = 0,5$  и  $\varphi = 0,25\pi$  радиан ( $a_0 = 0,25$  и  $0,125$ ,  $r_0 = 0,26$  и  $0,18$  мм) приводит к тому, что разделение фокусов  $0$ -го и  $+1$ -го порядков начинается с  $r = 0,30$  и  $0,21$  мм (см. рис. 5,  $c, d$ ). Однако при увеличении  $r$  в последних двух случаях фокусы сначала существенно расходятся (при  $a_0 = 0,25$  до  $f_0 = 21,75$  и  $f_{+1} = 17,4$  мм, т. е. изменяются по отношению к номиналу на 8,75 и 7,54 %, а при  $a_0 = 0,125$  до  $f_0 = 23,8$  и  $f_{+1} = 15,66$  мм, т. е. на 19,0 и 16,8 %),



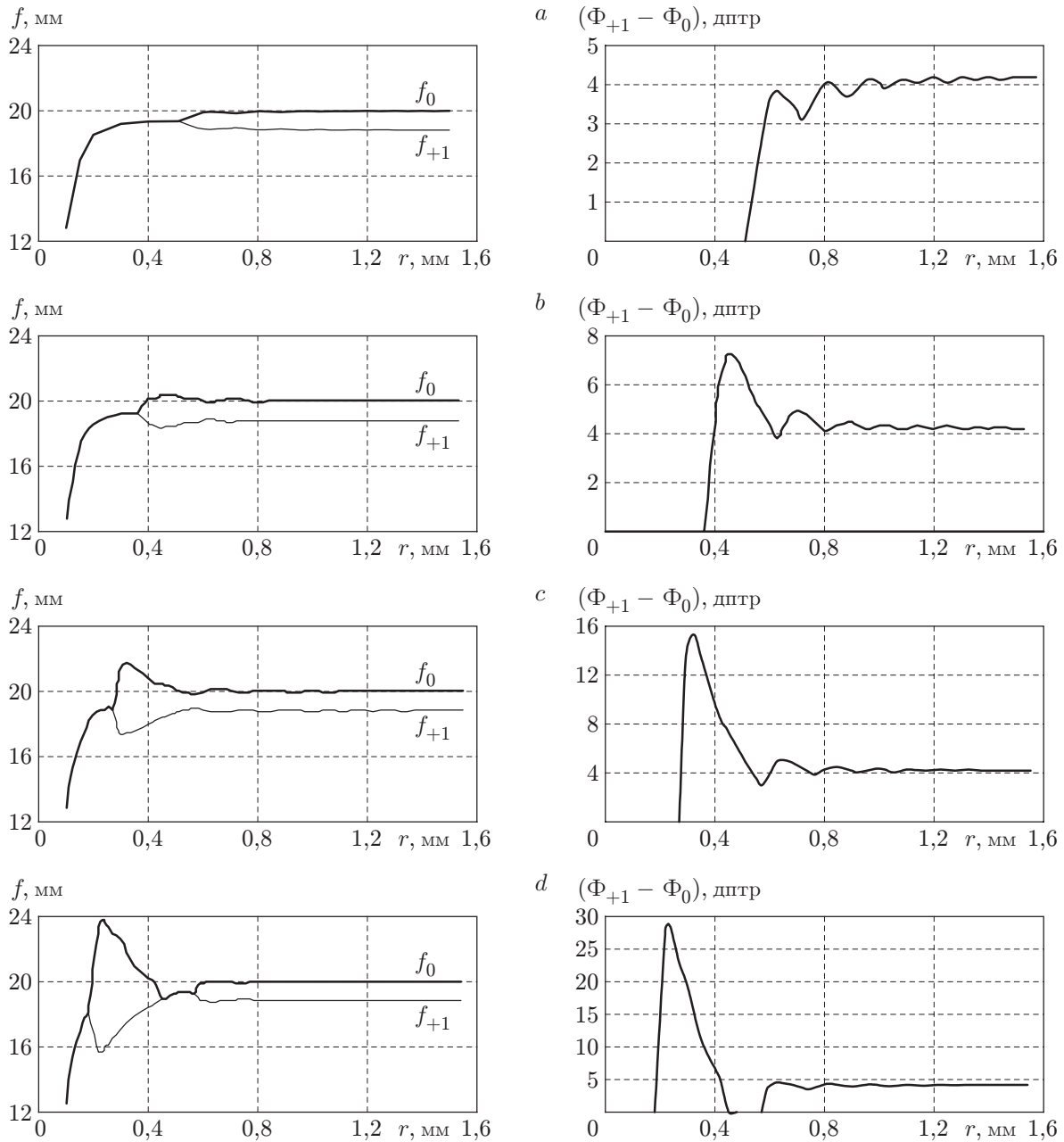


Рис. 5. Графики изменения фокусных расстояний  $f_{+1}$ ,  $f_0$  и разностей оптических сил  $\Phi_{+1}$ ,  $\Phi_0$  в зависимости от  $r$  при фазовых сдвигах:  $a_0 = 1,0$  (a),  $0,5$  (b),  $0,25$  (c),  $0,125$  (d)

затем начинают сближаться, а при  $a_0 = 0,125$  даже совпадают в интервале  $r = 0,43$ – $0,57$  мм. В области совпадения фокусов бифокальность исчезает и, следовательно, ИОЛ работает как монофокальная линза. Если принять во внимание, что номинальные значения фокусных расстояний 0-го и +1-го порядков лежат внутри полуширины суммарной функции распределения интенсивности (см. рис. 4, d), то можно сказать, что ИОЛ работает как мультифокальная или линза с большой глубиной фокуса, соизмеримой с разностью  $f_0 - f_{+1} = 1,18$  мм. Расширение зрачка ( $r > 0,57$  мм) приводит к разделению фокусов и восстановлению бифокальности (см. рис. 5, d).

Из анализа рис. 5 можно заключить, что оптимальным является фазовый сдвиг  $\varphi =$

$= \pi$  радиан ( $a_0 = 0,5$ , см. рис. 5, *b*), при котором разделение фокусов начинается с  $r < 0,4$  мм, фокусные расстояния незначительно отклоняются от номинальных значений (не более 0,5 %) и только вблизи  $r = 0,5$  мм отклонение составляет  $\sim 1,7-1,8$  % ( $f_0 = 20,34$  мм,  $f_{+1} = 18,48$  мм). При диаметре диафрагмы больше 1,2 мм ( $r > 0,6$  мм) разделение фокусов, т. е. бифокальность, наблюдается во всех случаях независимо от фазового сдвига.

Рис. 6, *a—d* иллюстрирует изменения функции распределения интенсивности вдоль оси при фазовом сдвиге  $\varphi = \pi$  радиан ( $a_0 = 0,5$ ) в зависимости от радиуса зрачка  $r$ . При увеличении радиуса уменьшается ширина распределения в каждом из порядков, в результате снижается взаимное влияние порядков, а положения максимальных значений интенсивности приближаются к номинальным значениям фокусных расстояний. Ширина распределения интенсивности уменьшается также из-за интерференционного эффекта. С увеличением радиуса открывается больше зон и растёт число интерферирующих лучей, от которого зависит ширина функции распределения, аналогичного многолучевой интерференции.

Распределение интенсивности на всех графиках нормировано по отношению к интенсивности в максимуме +1-го порядка. Следует отметить, что интенсивность на оси в +1-м порядке больше, чем в 0-м, хотя при заданной высоте дифракционной структуры дифракционные эффективности должны быть равны. Это объясняется тем, что под эффективностью подразумевается полное количество света, направляемого в каждый порядок дифракции, а на графиках сравниваются значения максимальных интенсивностей на оси. Интенсивность на оси зависит от плотности энергии в распределении каждого из порядков, поэтому она обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния. Расчёты показывают, что в областях, где порядки не перенакладываются, соотношение интенсивностей в фокусах соответствует квадрату отношения фокусных расстояний  $(f_{+1}/f_0)^2 = 0,886$ ,

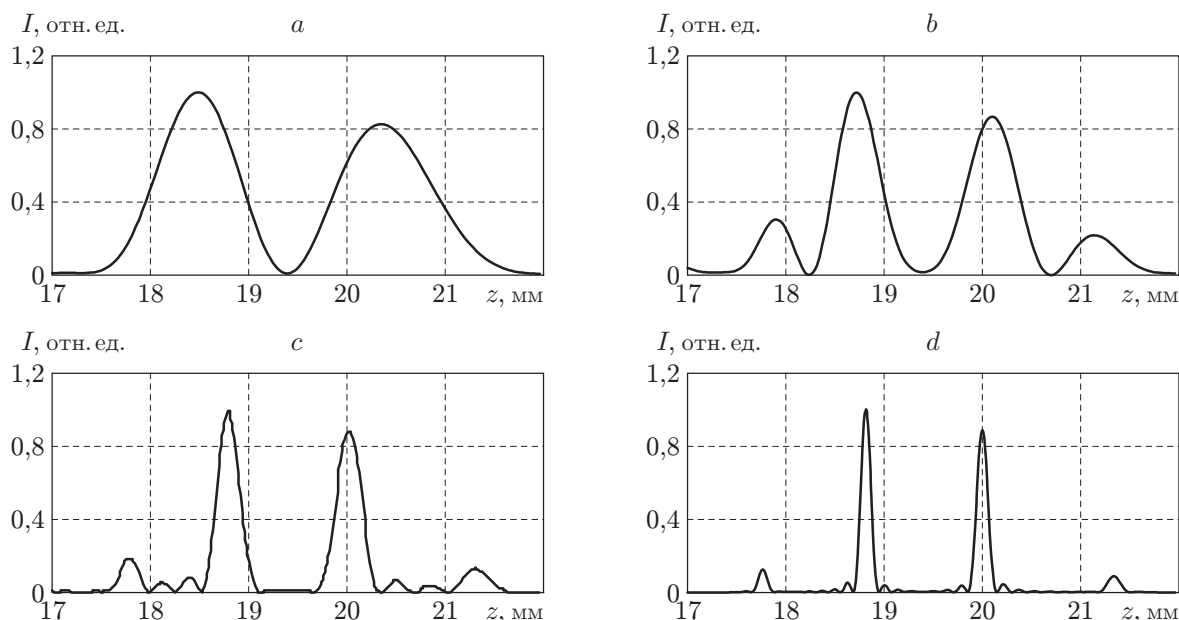


Рис. 6. Графики распределения интенсивности вдоль оси  $z$  при  $a_0 = 0,5$ ,  $a_1 = 0,002097$  и значениях  $r$ : *a* —  $r = 0,5$  мм,  $f_0 = 20,34$  мм ( $\Delta\Phi_0 = -1,12$  дптр),  $f_{+1} = 18,48$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = +1,31$  дптр); *b* —  $r = 0,7$  мм,  $f_0 = 20,02$  мм ( $\Delta\Phi_0 = -0,07$  дптр),  $f_{+1} = 18,80$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = +0,08$  дптр); *c* —  $r = 1,0$  мм,  $f_0 = 20,02$  мм ( $\Delta\Phi_0 = -0,07$  дптр),  $f_{+1} = 18,80$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = +0,08$  дптр); *d* —  $r = 1,5$  мм,  $f_0 = 20,00$  мм ( $\Delta\Phi_0 = 0$  дптр),  $f_{+1} = 18,82$  мм ( $\Delta\Phi_{+1} = 0$  дптр)

причём независимо от величины фазового сдвига.

Все исследования проводились для дифракционного компонента с оптической силой 4,2 дптр, в котором диаметр центральной зоны в отсутствие фазового сдвига ( $a_0 = 1,0$ ) равен  $\sim 1,0$  мм. В дифракционном компоненте с меньшей оптической силой (2,1 дптр) диаметр центральной зоны при  $a_0 = 1,0$  равен  $\sim 1,4$  мм, а при  $a_0 = 0,5$  составляет  $\sim 1,0$  мм. В последнем случае разделение фокусов, независимое от фазового сдвига, будет наблюдаться начиная только с диаметра диафрагмы  $\sim 1,7$  мм, что сравнимо с минимальным диаметром зрачка. Возможно, уменьшение оптической силы дифракционного компонента приведёт к изменению оптимального фазового сдвига и к ограничению области применения таких компонентов. Для более точного определения зависимости фазового сдвига от оптической силы дифракционного компонента необходимы дальнейшие исследования.

**Заключение.** В данной работе проведены аналитические исследования влияния диаметра зрачка глаза и фазового сдвига в дифракционном компоненте с оптической силой в 4,2 дптр на распределение интенсивности света по оси бифокальной дифракционно-рефракционной интраокулярной линзы. Показано, что при уменьшении диаметра зрачка могут нарушаться бифокальные свойства ИОЛ. Суммарное распределение интенсивности, соответствующее фокусам 0-го (дальнее зрение) и +1-го (ближнее зрение) порядков может быть непрерывным или с провалом, величина которого зависит от диаметра диафрагмы (зрачка) и фазового сдвига. Увеличение диаметра зрачка приводит к уменьшению ширины распределения интенсивности в каждом из порядков, разделению порядков и восстановлению бифокальности ИОЛ. При этом дифракционная эффективность, или соотношение интенсивностей в 0-м и +1-м порядках, соответствует расчётному значению независимо от фазового сдвига.

Введение фазового сдвига в дифракционную структуру ИОЛ приводит к тому, что разделение фокусов (бифокальность) происходит при меньшем диаметре зрачка. Показано, что оптимальным является фазовый сдвиг, равный  $\pi$  радиан ( $a_0 = 0,5$ ), для которого бифокальность наблюдается начиная с диаметра  $\sim 0,8$  мм ( $r \sim 0,4$  мм) и далее не нарушается, а фокусные расстояния отклоняются от номинальных значений не более, чем на 0,5 %. При диаметре диафрагмы больше 1,2 мм ( $r > 0,6$  мм) фокусы 0-го и +1-го порядков разделяются независимо от фазового сдвига.

Из результатов исследований можно сделать вывод, что для нормальных глаз с минимальным диаметром зрачка 1,8–2,0 мм величина фазового сдвига, или размер центральной зоны, не имеет принципиального значения для дифракционной структуры с оптической силой 4,2 дптр. Однако, если по какой-либо причине диаметр реального зрачка или искусственной диафрагмы, установленной перед глазом, меньше 1,2 мм, когда становится возможным наложение порядков и значительное отклонение фокусных расстояний от номинальных значений, то необходимо учитывать влияние фазового сдвига на бифокальные свойства ИОЛ. В случае дифракционной структуры с меньшей оптической силой введение фазового сдвига потребуется, вероятно, даже для глаз с нормальным зрачком.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Корольков В. П. и др. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Оптический журнал. 2007. 74, № 12. С. 34–39.
2. Ленкова Г. А., Корольков В. П., Коронкевич В. П. и др. Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Автометрия. 2008. 44, № 4. С. 75–88.
3. Ленкова Г. А. Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // Автометрия. 1995. № 5. С. 16–24.
4. Ленкова Г. А. Хроматические aberrации дифракционно-рефракционных интраокулярных линз в модели глаза // Автометрия. 2009. 45, № 2. С. 99–114.

- 
5. **Pat. 5116111 US.** Multifocal diffractive ophthalmic lens /M. J. Simpson, J. A. Futhey. Publ. May 26, 1992, Appl. N 07/653613.
  6. **Ленкова Г. А., Мызник М. М.** Сферохроматические aberrации модели глаза с бифокальными гибридными интраокулярными линзами // Автометрия. 2001. № 5. С. 85–95.
  7. **ГОСТ Р 52038-2003 (ИСО 11979-2-99).** Имплантаты офтальмологические. Интраокулярные линзы. Ч. 2. Оптические свойства и методы испытаний. М.: Госстандарт России, 2003.
  8. **Stamnes J. J., Spjelkavik B.** Focusing at small angular apertures in the Debye and Kirchhoff approximations // Opt. Commun. 1981. **40**, N 2. P. 81–85.

*Поступила в редакцию 19 января 2010 г.*

---