

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
И ПРОЦЕССОВ**

УДК 617.741 : 535.317

Г. А. Ленкова, М. М. Мызник

(Новосибирск)

**СФЕРОХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ МОДЕЛИ ГЛАЗА
С БИФОКАЛЬНЫМИ ГИБРИДНЫМИ
ИНТРАОКУЛЯРНЫМИ ЛИНЗАМИ**

Проведено исследование сферохроматических aberrаций модели глаза с бифокальными гибридными (дифракционно-рефракционными) интраокулярными линзами (ИОЛ). Показана возможность применения одного и того же дифракционного компонента для обеспечения ближнего зрения при изменениях основной оптической силы ИОЛ (дальнее зрение) и рефракции роговицы в пределах наиболее распространенных значений. Качество изображения оценивалось по пятну минимального рассеяния и числу Штреля. Установлено, что качество изображения ближних объектов, получаемых с помощью бифокальной ИОЛ, во всех рассмотренных случаях лучше или на уровне изображения дальних объектов, формируемых рефракционной составляющей, т.е. на уровне качества изображения монофокальных рефракционных ИОЛ.

Введение. Имплантация традиционного (однофокусного) искусственного хрусталика, называемого также интраокулярной линзой (ИОЛ), сопровождается почти полной потерей аккомодации глаза [1]. Пациент хорошо видит вдаль, а для чтения ему необходимы очки. Проблема коррекции ближнего зрения в данном случае может быть решена при помощи бифокальных и многофокальных ИОЛ рефракционного или гибридного (дифракционно-рефракционного) типа [2].

В последнее время большой интерес вызывают гибридные бифокальные ИОЛ. Это объясняется тем, что в отличие от рефракционных конструкций в гибридных эффективность работы на двух фокусах (для ближнего и дальнего зрения) не зависит от диаметра зрачка глаза. Гибридные линзы образуются сферической и плоской поверхностями с дифракционной структурой на последней и изготавливаются, подобно обычным ИОЛ, методом тиснения в полимерных биологически совместимых материалах. Дифракционно-рефракционные ИОЛ включены в каталоги и применяются в некоторых странах при операциях по удалению катаракты.

Особенность бифокальных гибридных ИОЛ заключается в том, что дополнительная оптическая сила (ближнее зрение) создается дифракционным

элементом, обладающим хроматическими аберрациями, которые противоположны по знаку аберрациям рефракционной составляющей. Последнее обстоятельство приводит к частичной компенсации хроматических аберраций. Преимущество гибридных ИОЛ также в том, что дифракционная структура может быть рассчитана с учетом сферических аберраций роговицы и рефракционного компонента, обеспечивающего основную оптическую силу (дальнее зрение) [3].

Исследованию бифокальных гибридных ИОЛ посвящено большое число работ, например [2, 4], но в них не анализируется зависимость характеристик дифракционного компонента, создающего дополнительную рефракцию, от оптических параметров глаза. Для чисто рефракционных бифокальных ИОЛ подобные исследования проводились в [5, 6]. Показано, что при всех возможных вариациях параметров глаза дополнительная рефракция для обеспечения ближнего зрения изменяется в пределах от 3,5 до 5,0 дптр. Если выбранное значение этой рефракции остается постоянным при изменении основной (дальнее зрение) оптической силы, определенной на основании измерений преломляющей силы роговицы, длины глаза и расстояния ИОЛ от вершины роговицы, то значение отклонения расстояния наилучшего зрения от расчетного не будет превышать в среднем ± 25 мм (приблизительно ± 10 %). Такое отклонение практически мало заметно для глаза. Для более точного поддержания расстояния ближнего зрения достаточно рассчитать дополнительную рефракцию с градацией 0,5 дптр (3,5; 4; 4,5; 5 дптр). Вопросы качества изображения в [5, 6] не рассматривались.

Для упрощения технологии изготовления бифокальной ИОЛ желательно использовать один и тот же штамп для дифракционной структуры независимо от параметров глаза или в определенном диапазоне их изменения. Естественно, что это должно сопровождаться некоторым ухудшением качества изображения на сетчатке. Поэтому представляет практический интерес исследовать, в каких пределах допустимо отклонение параметров глаза от положенных в основу расчета дифракционного компонента.

Цель статьи – компьютерный анализ качества изображения модели глаза с бифокальными гибридными (дифракционно-рефракционными) ИОЛ при вариации параметров глаза относительно расчетных.

Анализ проводился на основе программного комплекса DEMOS [7]. Качество изображения оценивалось в трех длинах волн, две из которых равны стандартным значениям, принятым для расчета обычных оптических систем ($\lambda_F = 0,4861$ мкм, $\lambda_C = 0,6563$ мкм), а третья близка к области максимальной чувствительности глаза ($\lambda_e = 0,5461$ мкм). Последняя длина волны соответствует рекомендациям Международного стандарта на ИОЛ [8]. Дифракционный компонент рассчитывался именно для этой длины волны.

Возможно, было бы целесообразнее проводить исследования в спектральных областях, характерных для трех видов колбочек – рецепторов сетчатки, на которых основывается современная теория цветного зрения [9]. Однако значения длин волн, соответствующие максимальной чувствительности колбочек, не стандартизованы, а в опубликованных работах не совпадают друг с другом.

1. Критерии качества изображения. Наиболее полное представление о качестве изображения оптической системы дает оптическая передаточная функция, и в частности ее модуль – модуляционная передаточная функция (МПФ), которая показывает, как изменяется контраст пространственных частот в изображении относительно объекта. Качество ИОЛ по стандарту [8,

10] рекомендуется оценивать по значению МПФ в монохроматическом свете при частоте 100 мм^{-1} . МПФ получают обычно фурье-преобразованием функции рассеяния точки (ФРТ), параметры которой также могут служить критериями качества изображения. Этими критериями являются пятно минимального рассеяния (ПМР) и число Штреля (интенсивность на оси в плоскости наблюдения, нормированная к максимальной интенсивности безаберрационного, дифракционно ограниченного изображения).

Если ФРТ регистрируется в плоскости ПМР, то, как известно, сферические aberrации для этой плоскости будут минимальными, хотя число Штреля может быть низким. Плоскость, в которой число Штреля имеет максимальное значение (дифракционный фокус), не совпадает с плоскостью ПМР, но с увеличением числа Штреля повышается разрешение в области высоких пространственных частот, т. е. лучше различаются контуры предметов. При наличии малых сферических aberrаций дифракционный фокус располагается посередине между фокусами параксиальных и краевых лучей, а плоскость ПМР отстоит от параксиального фокуса на $3/4$ отрезка в направлении к линзе.

В отличие от обычных оптических систем глаз при рассматривании предметов непрерывно сканирует не только в плоскости, но и по глубине пространства предметов. Чтобы изображение оставалось четким на сетчатке, глаз с естественным хрусталиком аккомодирует, т. е. изменяет преломляющую способность. Ранее считалось, что аккомодация глаза осуществляется за счет изменения радиусов кривизны наружных поверхностей естественного хрусталика (схемы Гельмгольца и Гульстранда [11]), а также радиусов кривизны ядра хрусталика (более поздняя схема Гульстранда [12]). Однако аккомодация, достигающая иногда 3 дптр, наблюдается также у лиц с интраокулярной коррекцией. Это объясняется наличием физиологического астигматизма, присущего в разной степени каждому глазу [13], или способностью глаза изменять длину оптической оси приблизительно на $\pm 1 \text{ мм}$ [14].

Если принять во внимание, что имплантация ИОЛ не приводит к полной потере аккомодации, то интересно проанализировать качество изображения точки на сетчатке при отклонении параметров глаза от расчетных значений, допуская, что длина оптической оси глаза может изменяться при восприятии изображений в каждой из трех длин волн.

Критериями качества ИОЛ были выбраны параметры ФРТ: ПМР и число Штреля. На наш взгляд, эти критерии более других соответствуют физиологическим свойствам глаза и позволяют нагляднее анализировать качество изображения не только в монохроматическом, но и в белом свете (в данном случае в трех длинах волн, характерных для видимого диапазона).

2. Расчетные параметры модели глаза. На рис. 1. показана оптическая схема модели глаза с бифокальной гибридной ИОЛ. Здесь 1 – роговица; 2 – зрачок (апертурная диафрагма); 3 – ИОЛ; 4 – сетчатка; R_1, R_2 – радиусы кривизны внешней и внутренней поверхности роговицы; R_3 – радиус кривизны сферической поверхности ИОЛ; l, L – расстояния ИОЛ и сетчатки от вершины роговицы; A_1 – точечный предмет, расположенный от роговицы на расстоянии ближнего зрения S_1 ; A_2 – изображение предмета на сетчатке; n_1, n_2, n_3, n_4 – показатели преломления воздуха, роговицы, внутриглазной жидкости и материала ИОЛ соответственно. На рисунке совмещены две схемы хода лучей: из бесконечности (пунктирные линии) и с конечного расстояния (сплошные линии).

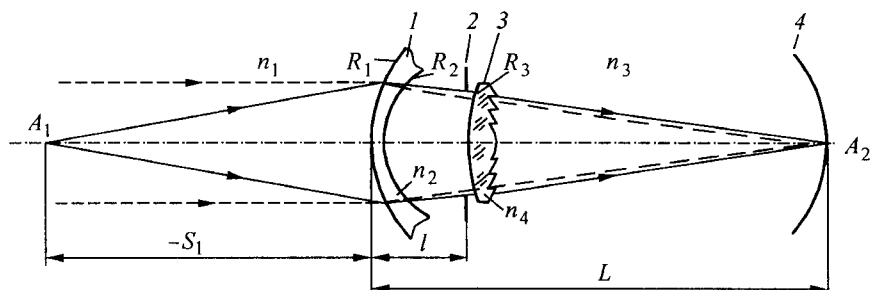


Рис. 1. Оптическая схема модели глаза с бифокальной гибридной ИОЛ

Предварительно для определенных параметров глаза рассчитывались оптические силы рефракционного (дальнее зрение) и дифракционного (дополнительный для ближнего зрения) компонентов и характеристическое уравнение дифракционной структуры последнего. Расчеты проводились на длине волны $\lambda_e = 0,5461$ мкм, показатели преломления равнялись для роговицы $n_2 = 1,3777$, внутриглазной жидкости и стекловидного тела $n_3 = 1,3377$, ИОЛ из олигокарбонатметакрилата $n_4 = 1,5061$.

В основу расчета положены следующие параметры модели глаза по схеме Гультранда [11]: $R_1 = 7,7$, $R_2 = 6,8$, $l = 4,15$, $L \approx 24$ мм. Диаметр зрачка глаза (апертурная диафрагма) в соответствии с Международным стандартом [8] составлял 3 мм. Величина радиуса кривизны рефракционной части ИОЛ (R_3) выбиралась из ряда стандартных значений так, чтобы пятно минимального рассеяния для дальнего зрения располагалось от вершины роговицы на расстоянии L , близком к 24 мм. Для данного условия подходящим оказалось значение $R_3 = 8,89$ мм, что соответствует основной оптической силе ($D_{\text{ИОЛ}}$), равной 18,93, т. е. приблизительно 19 дптр. При этом значении R_3 определялась оптимизированная длина оси глаза. В результате получено $L = 23,42$ мм. Оптическая сила дифракционного компонента ($\Delta D_{\text{ИОЛ}}$), рассчитанная с учетом последнего значения L , составляет 5 дптр (соответствует фокальному расстоянию в среде, равному 267,3 мм), а характеристическое уравнение имеет вид

$$k\lambda = 0,0025032r^2 - 0,00012238r^4, \quad (1)$$

где k – номер зоны (или число длин волн), λ – длина волны в вакууме, r – радиус кольцевой зоны. Первый член в (1) характеризует оптическую силу дифракционного компонента, а второй – сферическую абберрацию, компенсирующую абберрацию роговицы и рефракционного компонента [3].

Оптимизированная длина оси глаза определялась для удаленного точечного предмета ($S_1 = -\infty$), а характеристическое уравнение – для предмета, расположенного на расстоянии от роговицы $S_1 = -330$ мм (ближнее зрение).

3. Исследование качества изображения модели глаза с гибридной ИОЛ. Исследования проводились при изменении двух параметров модели глаза: основной оптической силы бифокальной ИОЛ и рефракции роговицы. Оптическая сила ИОЛ варьировалась в пределах (19 ± 3) дптр (область наибольшей потребности ИОЛ) путем изменения радиуса кривизны передней поверхности (R_3) в области стандартных значений приблизительно на ± 1 мм относительно первоначально выбранного значения ($R_3 = 8,89$ мм). Рефракция роговицы варьировалась в пределах 36–50 дптр (область возможных зна-

чений) за счет изменения радиуса кривизны внешней поверхности роговицы R_3 .

При изменении одного из параметров все остальные, за исключением длины оптической оси глаза L , оставались постоянными и соответствовали расчетным значениям, определенным в разд. 2. Длина оси глаза L оптимизировалась каждый раз по пятну минимального рассеяния на длине волны $\lambda_e = 0,5461$ мкм методом наименьших квадратов, полагая, что предмет находится в бесконечности ($S_1 = -\infty$). При полученном значении L рассчитывались радиусы пятен рассеяния (r'_{\max}) и числа Штреля для двух других длин волн ($\lambda_F = 0,4861$ и $\lambda_C = 0,6563$ мкм; $n_2 = 1,3801, 1,3741$; $n_3 = 1,3401, 1,3341$; $n_4 = 1,509, 1,501$, где каждое первое значение n соответствует λ_F , второе – λ_C) при $S_1 = -\infty$ и для всех трех длин волн при $S_1 = -330$ мм. Распределение интенсивности в ФРТ нормировалось по отношению к интенсивности в центре безабберационного изображения точки отдельно для каждой длины волны. Зависимость чувствительности глаза от длины волны не принималась во внимание. Следует заметить, что оптимизация L не противоречит обычной процедуре определения рефракции ИОЛ, так как значение последней вычисляется на основании измерений длины глаза L и рефракции роговицы пациента. В нашем случае L согласуется с рефракциями ИОЛ и роговицы.

На рис. 2 и 3 представлены графики изменений радиусов пятен минимального рассеяния r'_{\max} (a, c) и чисел Штреля (b, d) на расстояниях L , соответствующих плоскости ПМР для $\lambda_e = 0,5461$ мкм и $S_1 = -\infty$, в зависимости от радиуса кривизны сферической поверхности гибридной ИОЛ (R_3) и рефракции роговицы (D_p). Значения r'_{\max} и чисел Штреля рассчитывались в трех длинах волн для конкретных параметров в выбранных пределах.

Из рис. 2 следует, что пятно рассеяния при $S_1 = -\infty$ на длинах волн, не соответствующих расчетной длине волны $\lambda_e = 0,5461$ мкм, увеличивается приблизительно в 2 раза, а число Штреля в синей области увеличивается прибли-

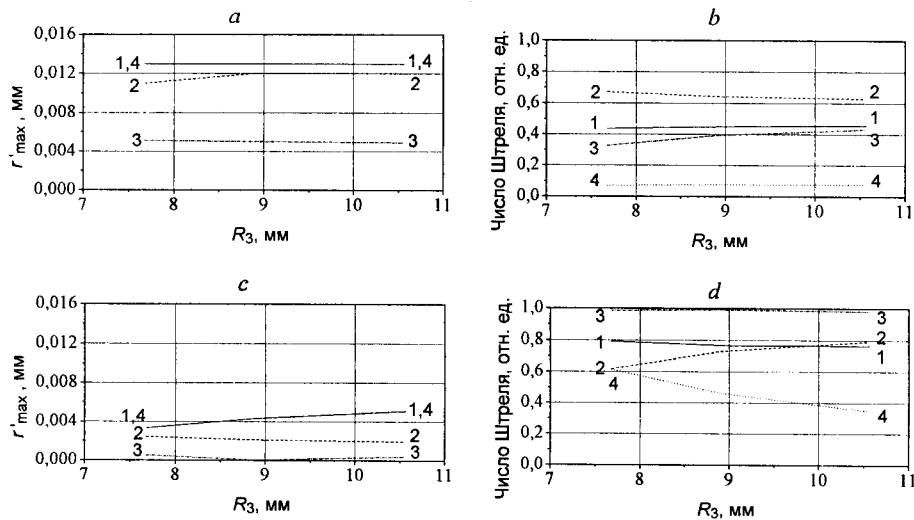


Рис. 2. Графики изменений радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a, c) и числа Штреля (b, d) в плоскости, соответствующей ПМР для $\lambda_e = 0,5461$ мкм, в зависимости от радиуса кривизны сферической поверхности гибридной ИОЛ (R_3) для длин волн: полихроматическая λ_n (кривая 1), $\lambda_F = 0,4861$ (2), $\lambda_e = 0,5461$ (3), $\lambda_C = 0,6563$ мкм (4) при $S_1 = -\infty$ (a, b), $S_1 = -330$ мм (c, d)

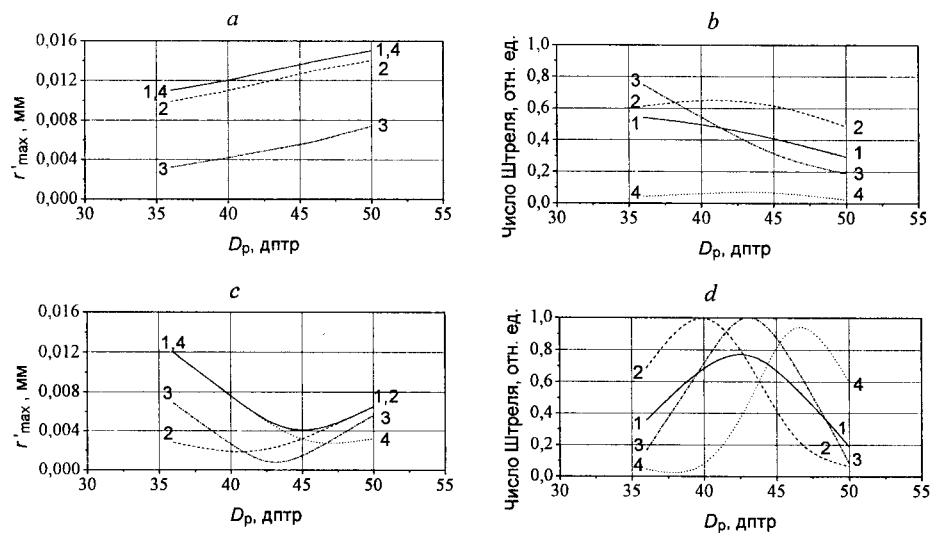


Рис. 3. Графики изменений радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a, c) и числа Штреля (b, d) в плоскости, соответствующей ПМР для $\lambda_e = 0,5461$ мкм, в зависимости от рефракции роговицы (D_p). Далее обозначения те же, что и на рис. 2

зительно в 1,5 раза, в то время как в красной уменьшается приблизительно в 5 раз. При $S_1 = -330$ мм характеристики качества изображения заметно улучшаются: уменьшается r'_{\max} и увеличивается число Штреля. Последнее объясняется тем, что дифракционный компонент ИОЛ компенсирует сферические aberrации роговицы и рефракционного компонента. Изменение рефракции роговицы (см. рис. 3) в большей степени влияет на величину пятна рассеяния и число Штреля, в особенности при $S_1 = -330$ мм. Если в первом случае (см. рис. 2) максимальное значение r'_{\max} и минимальное число Штреля составляют 13 мкм и 0,07 соответственно, то во втором (см. рис. 3) – 15 мкм и 0,02. Однако, как показали расчеты, результаты которых здесь не приводятся, при оптимизации L отдельно на каждой длине волны характеристики качества изображения улучшаются. Причем изменение L в зависимости от длины волны не превышает $\pm 0,2$ мм, т. е. находится в пределах физиологического астigmatизма и возможного изменения длины глазного яблока.

Результаты расчетов показали, что число Штреля при некоторых параметрах имеет довольно низкое значение даже при оптимизации L по пятну минимального рассеяния на соответствующих длинах волн. Это объясняется тем, что при наличии сферических aberrаций максимальное число Штреля наблюдается не в плоскости пятна минимального рассеяния, а в дифракционном фокусе. Поэтому в дальнейшем были проведены исследования изменений r'_{\max} и числа Штреля вдоль оптической оси глаза L .

На рис. 4–9 приводятся графики изменений r'_{\max} и числа Штреля в зависимости от L для каждой из трех длин волн и общей (полихроматической) длины волны λ_n . Для удаленного источника ($S_1 = -\infty$) графики (см. рис. 4) соответствуют расчетным параметрам: $R_3 = 8,89$ мм, $D_p = 43,05$ дптр. Эти графики характеризуют только рефракционную часть глаза, на которую не влияет дифракционный компонент. Так как при изменении параметров область оптимизированных L перемещается вдоль оси глаза, а взаимное расположение графиков для разных длин волн в основном остается прежним, то

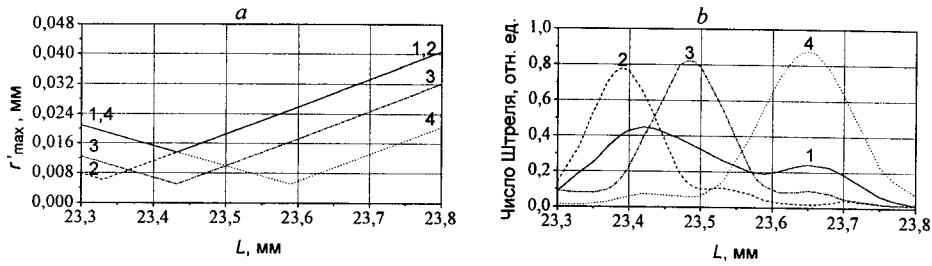


Рис. 4. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a) и числа Штреля (b) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -\infty$: $R_1 = 7,7$ мм ($D_p = 43,05$ дптр), $R_3 = 8,89$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 19$ дптр): $\lambda_{\text{п}}$ (кривая 1), $\lambda_F = 0,4861$ (2), $\lambda_e = 0,5461$ (3), $\lambda_{\text{с}} = 0,6563$ мкм (4)

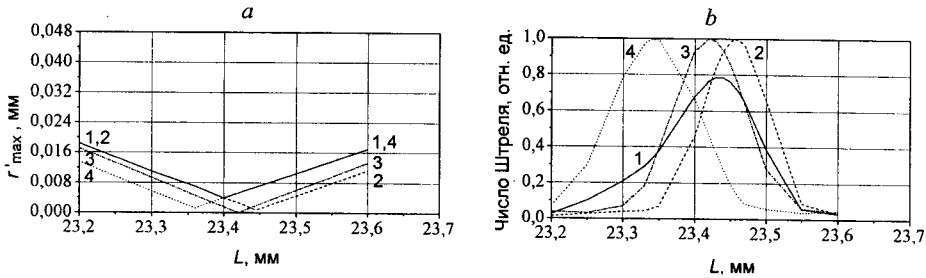


Рис. 5. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a) и числа Штреля (b) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -330$: $R_1 = 7,7$ мм ($D_p = 43,05$ дптр), $R_3 = 8,89$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 19$ дптр). Значения кривых те же, что и на рис. 4

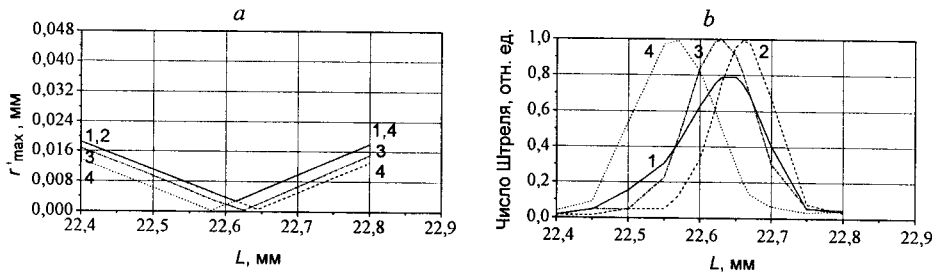


Рис. 6. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a) и числа Штреля (b) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -330$: $R_1 = 7,7$ мм ($D_p = 43,05$ дптр), $R_3 = 7,68$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 22$ дптр). Значения кривых те же, что и на рис. 4

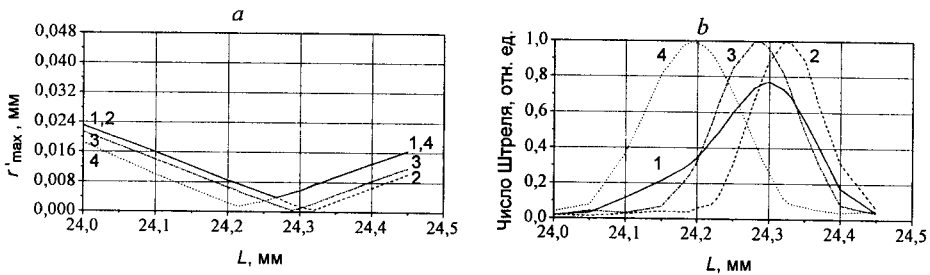


Рис. 7. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (a) и числа Штреля (b) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -330$: $R_1 = 7,7$ мм ($D_p = 43,05$ дптр), $R_3 = 10,56$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 16$ дптр). Значения кривых те же, что и на рис. 4

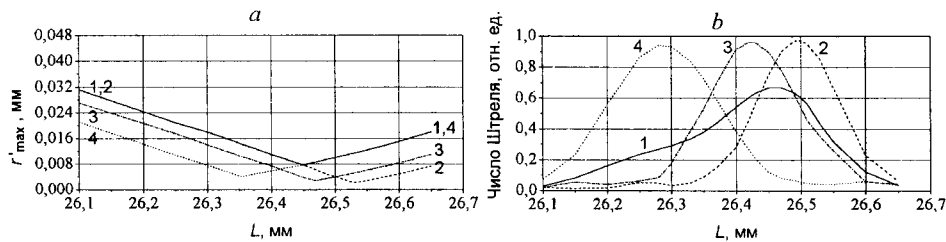


Рис. 8. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (а) и числа Штреля (б) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -330$; $R_1 = 9,04$ мм ($D_p = 36$ дптр), $R_3 = 8,89$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 19$ дптр). Значения кривых те же, что и на рис. 4

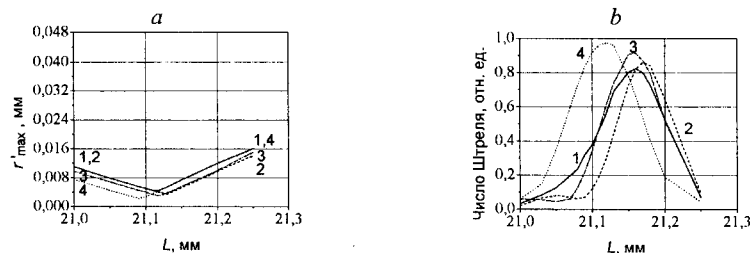


Рис. 9. Изменения радиуса пятна рассеяния r'_{\max} (а) и числа Штреля (б) в зависимости от длины оптической оси глаза L при $S_1 = -330$; $R_1 = 6,77$ мм ($D_p = 50$ дптр), $R_3 = 8,89$ мм ($D_{\text{ИОЛ}} = 19$ дптр). Значения кривых те же, что и на рис. 4

для других параметров графики при $S_1 = -\infty$ не приводятся. На рис. 5–9 показаны графики изменений r'_{\max} и числа Штреля при $S_1 = -330$ мм для всех параметров (расчетных и измененных).

Из графиков на рис. 4 и 5 следует, что при $S_1 = -\infty$ максимальное расстояние между пятнами минимального рассеяния для трех длин волн составляет $\sim 0,25$ мм, а между плоскостями с максимальными значениями числа Штреля – $0,26$ мм, причем несовпадение плоскостей первой и второй характеристик для всех трех длин волн составляет $0,06$ – $0,07$ мм. При $S_1 = -330$ мм аналогичные расстояния равны $0,09$ и $0,12$ мм, а несовпадение плоскостей $0,01$ – $0,02$ мм. Улучшение характеристик объясняется влиянием дифракционного компонента. Следует отметить, что наблюдается некоторая хроматическая перекомпенсация, в результате которой пик кривой числа Штреля для $\lambda_c = 0,6563$ мкм оказывается впереди пика кривой для $\lambda_e = 0,5461$ мкм, а для $\lambda_f = 0,4861$ мкм – позади, т. е. картина, обратная той, что наблюдается при $S_1 = -\infty$.

Результаты анализа всех графиков на рис. 4–9 для наглядности представлены в таблице. В колонках 4–7 приводятся расстояния ΔL_1 между плоскостями, в которых наблюдаются ПМР и максимальное число Штреля для каждой длины волны, в двух последних колонках – максимальные расстояния между ПМР (ΔL_2 , 8-я колонка) и между пиками кривых числа Штреля (ΔL_3 , 9-я колонка) для трех длин волн.

Из графиков на рис. 4–9 и таблицы видно, что при изменении основной оптической силы (см. рис. 6, 7, 3-я и 4-я строки таблицы), а также рефракции роговицы в сторону возрастания (см. рис. 9, 6-я строка таблицы) величины ΔL_1 , ΔL_2 и ΔL_3 сравнимы с теми, которые получены для расчетных параметров (см. рис. 5, 2-я строка таблицы). Только при уменьшении рефракции ро-

Номер рисунок	$D_{\text{ИОЛ}}$, дптр	D_p , дптр	ΔL_1 , мм				ΔL_2 , мм	ΔL_3 , мм
			λ , мкм					
			полихро- матическая	0,4861	0,5461	0,6563		
			$S_1 = -\infty$					
4	19	43	0	0,06	0,06	0,07	0,25	0,26
$S_1 = -330$ мм								
5	19	43	0,03	0,01	0,0	-0,02	0,09	0,12
6	22	43	0,04	0,01	0,005	0,0	0,08	0,09
7	16	43	0,03	0,01	-0,01	-0,025	0,105	0,14
8	19	36	0,02	-0,03	-0,05	-0,075	0,175	0,22
9	19	50	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05
-	22	36	-	0,17	0,20	0,23	0,92	0,98
-	16	36	-	0,20	0,22	0,27	1,15	1,21
-	22	50	-	0,05	0,16	0,18	0,58	0,71
-	16	50	-	0,06	0,18	0,21	0,67	0,82

говицы (см. рис. 8, 5-я строка таблицы) ΔL_2 и ΔL_3 возрастают приблизительно на 0,1 мм, но они тем не менее меньше, чем эти же величины при $S_1 = -\infty$ (1-я строка таблицы). Последнее значит, что качество изображения для ближнего зрения ($S_1 = -330$ мм) при измененных параметрах не хуже, чем для дальнего ($S_1 = -\infty$), т. е. чем в обычных условиях работы глаза без дифракционного компонента.

Расчеты пятен минимального рассеяния r'_{max} и чисел Штреля были проведены также для более жестких условий, т. е. при сочетании крайних значений рефракции роговицы и оптической силы ИОЛ в выбранных интервалах. Полученные значения r'_{max} (3–7 мкм для $S_1 = -\infty$ и 11–15 мкм для $S_1 = -330$ мм) приблизительно в 2–3 раза больше, чем на рис. 4–9. Тем не менее числа Штреля, составляющие в основном 0,6–0,3, находятся в допустимых пределах, рекомендуемых в [15]. Только в двух случаях (комбинация $D_p = 50$ дптр с $D_{\text{ИОЛ}} = 16$ и 22 дптр) на одной из длин волн ($\lambda_e = 0,5461$ мкм) число Штреля снижалось до 0,2. Результаты расчетов показали, что по сравнению с рис. 4–9 существенно увеличились (до 0,6–1,2 мм) расстояния между плоскостями, в которых наблюдаются пятна минимального рассеяния и дифракционные фокусы для разных длин волн (8-я и 9-я колонки для 7–10-й строк таблицы). Это можно объяснить значительным отступлением от параметров, на основе которых рассчитывался дифракционный компонент ИОЛ. В дальнейшем анализе результаты этих расчетов не принимались во внимание.

4. **Сравнение полученных результатов с дифракционно ограниченным изображением.** Все вышепредставленные исследования качества изображения ИОЛ проводились при диаметре зрачка, равном 3 мм. При таком диаметре зрачка радиус дифракционного изображения точки (т. е. в отсутствии аберраций) на сетчатке составляет по нулевому уровню $\sim 4-5$ мкм в зависимости от длины волны.

Наши результаты (см. рис. 2 и 3) показывают, что при $S_1 = -\infty$ (дальнее зрение) в плоскости ПМР для расчетной длины волны радиус этого пятна не превышает 5 мкм, а на других длинах волн в этой же плоскости радиус пятна рассеяния приблизительно в 2–3 раза больше. Для ближнего зрения ($S_1 = -330$ мм) превышение дифракционного предела наблюдается только при рефракции роговицы $D_p = 36$ дптр. Число Штреля в некоторых случаях ($S_1 = -\infty$, $D_p = 50$ дптр) в рассматриваемой плоскости снижается до 0,02.

Если предположить, что на каждой длине волны глаз настраивается (за счет физиологического астигматизма или изменения длины глазного яблока) на плоскость, в которой расположено пятно минимального рассеяния или максимум числа Штреля, то результаты резко улучшаются. При $S_1 = -\infty$ (см. рис. 4) радиус пятна на всех длинах приближается к дифракционному размеру, а число Штреля достигает 0,8 и выше. При $S_1 = -330$ мм (см. рис. 5–7, 9) радиус пятна < 2 мкм, т. е. меньше дифракционного предела, а число Штреля близко к 1. Исключение составляет рис. 8 ($D_p = 36$ дптр), но и здесь значения критериев качества не ниже, чем при $S_1 = -\infty$: пятно минимального рассеяния равно 2–4 мкм, число Штреля 0,8–1.

Закключение. Проведенные исследования качества изображения модели глаза с гибридной ИОЛ показали возможность применения одной и той же дифракционной структуры в достаточно широких пределах изменения оптических параметров глаза. Качество изображения, полученное в плоскости, соответствующей ПМР для расчетной длины волны $\lambda_c = 0,5461$ мкм, для ближнего зрения, даже при граничных значениях основной оптической силы ИОЛ в пределах (19 ± 3) дптр и рефракции роговицы в пределах 36–50 дптр, не хуже, чем для дальнего зрения. Если принять во внимание возможное изменение длины оси глаза при восприятии информации в каждой из трех длин волн, то качество изображения при всех изменениях параметров остается на дифракционном уровне. Следует заметить, что вариация параметров глаза может привести к изменению расстояния ближнего зрения приблизительно на 25 мм [6]. При необходимости коррекции этого расстояния так же, как в рефракционных бифокальных ИОЛ [6], оптическая сила дифракционного компонента должна соответствовать измеренным параметрам глаза и выбранному расстоянию ближнего зрения с точностью 0,5 дптр. Фактически это достигается изменением первого коэффициента в характеристическом уравнении (1).

Авторы выражают благодарность В. П. Коронкевичу за обсуждение статьи и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров С. Н. Имплантация искусственного хрусталика. М.: Медицина, 1977.
2. Futhy J. A. Diffractive bifocal intraocular lens // Proc. SPIE. 1989. 1052. P. 142.
3. Ленкова Г. А. Аналитический расчет сферических аберраций модели глаза с интраокулярными линзами // Автометрия. 2000. № 3. С. 77.

4. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Исаков И. А. и др.** Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза // *Автометрия*. 1997. № 6. С. 26.
5. **Родригес Л., Голубенко Ю. Е., Коваль Т. В.** Изучение влияния оптических параметров глаза на рефракцию различных частей бифокальных ИОЛ // *Офтальмологический журнал*. 1993. № 1. С. 39.
6. **Ленкова Г. А.** Влияние оптических параметров глаза на выбор рефракции монофокальных и бифокальных интраокулярных линз // *Автометрия*. 2001. № 5. С. 96.
7. **Gan M. A., Zhdanov D. D., Novoselskiy V. V. et al.** DEMOS – State of the art application software for design, evaluation, and modeling of optical systems // *Opt. Eng.* 1992. **31**, N 4. P. 696.
8. **ISO/DIS 11979-2.** Optics and Optical Instruments – Intraocular Lenses. Pt. 2: Optical Properties and their Methods. 1996.
9. **Хьюбел Д.** Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990.
10. **Navarro R., Ferro M., Artal P., Miranda I.** Modulation transfer functions of eyes implanted with intraocular lenses // *Appl. Opt.* 1993. **32**, N 31. P. 6359.
11. **Слюсарев Г. Г.** Геометрическая оптика. Л.: Машиностроение, 1946.
12. **Handbuch** der Physik. Bd. 24. Grundlagen der Optik. Berlin, 1956.
13. **Сергиенко Н. М.** Офтальмологическая оптика. М.: Медицина, 1991.
14. **Ананин В. Ф.** Аккомодация и близорукость. М.: Биомединформ, 1992.
15. **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.

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

*Поступила в редакцию
15 января 2001 г.*