

УДК 681.327.68 : 535.4

## ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ В МОДЕЛИ ГЛАЗА

Г. А. Ленкова

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: lenkova@iae.nsk.su*

Представлены результаты анализа хроматических aberrаций модели глаза с интраокулярными линзами (ИОЛ) — искусственными хрусталиками глаза — различных конструкций (рефракционных, дифракционно-рефракционных, дифракционных и гармонических (многopорядковых)). Исследования проводились последовательно по элементам модели (роговица, рефракционный и дифракционный компоненты, ИОЛ) и в целом (роговица + ИОЛ). Показано, что лучшими хроматическими характеристиками обладают дифракционно-рефракционные ИОЛ, в которых дифракционные компоненты создают положительную дополнительную оптическую силу. Хроматизм модели глаза с такими ИОЛ меньше в 2 раза, а с другими конструкциями ИОЛ больше в 2 раза и более, чем с рефракционной ИОЛ.

*Ключевые слова:* интраокулярная линза (искусственный хрусталик глаза), дифракция, хроматические aberrации.

**Введение.** Изменения в естественном хрусталике глаза, вызванные заболеванием или повреждением, приводят к нарушениям зрения и затрудняют нормальную фокусировку окружающего пространства на сетчатке. Наиболее распространенными причинами потери зрения, особенно у людей среднего и пожилого возраста, является катаракта, проявляющаяся в виде помутнения хрусталика глаза. В последнее время наряду с катарактой все более актуальной становится проблема коррекции пресбиопии — возрастной дальнозоркости, при которой сначала появляются затруднения при ближнем, а затем и при дальнем зрении.

Эффективным методом восстановления зрения является имплантация искусственного хрусталика, называемого интраокулярной линзой (ИОЛ). Однако при имплантации традиционных однофокусных (монофокальных) ИОЛ почти полностью теряется естественная аккомодация глаза, т. е. способность перефокусировки на разные расстояния. Улучшение зрения происходит только в одной области зрения (в дальней или ближней), а в другой — пациенту необходимы очки. Проблема расширения пределов аккомодации решается путем создания многофокальных и чаще всего бифокальных ИОЛ рефракционного и гибридного (дифракционно-рефракционного) типа [1, 2]. Наибольший интерес представляют линзы последнего типа, в которых бифокальное функционирование определяется только высотой дифракционной структуры и не зависит от диаметра зрачка [2].

В отличие от обычных рефракционных линз фокусное расстояние дифракционных обратно пропорционально длине волны. Можно сказать, что дифракционные линзы по аналогии с рефракционными имеют отрицательную дисперсию, если под ней понимать относительное изменение фокусного расстояния. При этом величина дисперсии дифракционных линз на порядок больше, чем рефракционных. В связи с указанными особенностями применение дифракционных элементов в ИОЛ может существенно изменить хроматические aberrации глаза при замене естественного хрусталика искусственным, так как aberrации будут зависеть от сочетания оптических сил и дисперсий компонентов ИОЛ и роговицы.

ИОЛ гибридного типа [1, 2] состоит из рефракционного и дифракционного компонентов. Она представляет собой обычную рефракционную линзу, на одной из преломляющих поверхностей которой формируется дифракционная микроструктура, подобная фазовой зонной пластинке или линзе Френеля. Дифракционная структура создает положительную дополнительную оптическую силу, которая значительно меньше оптической силы рефракционного компонента и роговицы. Это обстоятельство, а также большое различие коэффициентов дисперсии создают условия для взаимной компенсации хроматических aberrаций компонентов.

Применение в качестве ИОЛ дифракционных линз вызывает сомнение, хотя они имеют преимущество по толщине по сравнению с гибридными ИОЛ. Дифракционная ИОЛ в отличие от дифракционной структуры в гибридной ИОЛ выполняет функции рефракционной ИОЛ по формированию изображения на сетчатке и должна иметь большую оптическую силу. При этих условиях дисперсия дифракционной ИОЛ не может быть полностью скомпенсирована роговицей глаза. Частичное решение проблемы — использование гармонических дифракционных линз, работающих в высших порядках дифракции [3, 4]. Эти линзы являются промежуточными между рефракционными и дифракционными, но насколько они подходят для конструирования ИОЛ, в [3, 4] не рассматривается.

В отличие от гибридных ИОЛ рефракционные, дифракционные и гармонические линзы монофокальные, и для обеспечения бифокальности в них необходимо формировать сектора с разной оптической силой, что существенно усложняет технологию изготовления. Несмотря на недостатки некоторых конструкций, представляет интерес оценить хроматические aberrации для всех вышеуказанных ИОЛ.

Цель работы — анализ хроматических aberrаций рефракционных, гибридных (дифракционно-рефракционных), дифракционных и гармонических дифракционных линз и оценка возможности их применения в качестве ИОЛ.

Исследования проводились в связи с созданием дифракционно-рефракционных бифокальных ИОЛ в Институте автоматизации и электротехники СО РАН (г. Новосибирск) [2]. Производство этих ИОЛ освоено на предприятии «Репер-НН» (г. Нижний Новгород) под маркой МИОЛ-Аккорд. Медицинские испытания проходили в Новосибирском и других филиалах ФГУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Федорова». В настоящее время после получения разрешения Министерства здравоохранения и социального развития линзы МИОЛ-Аккорд применяются для имплантации в офтальмологических клиниках России наряду с дифракционно-рефракционными линзами AcrySof ReSTOR® фирмы «Alcon» (США).

**Постановка задачи.** Анализ проводился на основе формул геометрической оптики. Рассматривались хроматические aberrации ИОЛ различных конструкций отдельно и в модели глаза как оптической системы, состоящей из роговицы и ИОЛ. Сферические aberrации не принимались во внимание. Приведем соотношения, на основе которых осуществлялся анализ хроматизма.

Известно, что оптическая сила  $\Phi$  и фокусное расстояние  $f$  системы из двух компонентов (преломляющих поверхностей, линз) с оптическими силами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определяются по формулам [5, 6]

$$\Phi = \frac{n_1}{f} = \frac{n_3}{f'} = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d\Phi_1\Phi_2}{n_2} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} - \frac{d}{n_2} \frac{n_2 - n_1}{R_1} \frac{n_3 - n_2}{R_2}, \quad (1)$$

$$f' = \frac{n_3}{\Phi} = \frac{n_1 n_2 R_1 R_2}{n_2 R_2 (n_2 - n_1) + n_2 R_1 (n_3 - n_2) - d(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)}, \quad (2)$$

где  $f$  и  $f'$  — переднее и заднее фокусные расстояния,  $d$  — расстояние между компонентами. Правые части (1) и (2) относятся к рефракционным линзам, для которых  $\Phi_1 = (n_2 - n_1)/R_1$ ,  $\Phi_2 = (n_3 - n_2)/R_2$ ;  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны компонентов (поверхностей);  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  — коэффициенты преломления перед, внутри и за линзой.

Из (1) и (2) видно, что  $\Phi$  и  $f'$  рефракционных линз зависят от значений и соотношений показателей преломления для соответствующей длины волны. Если система работает в белом свете, то  $\Phi$  и  $f'$  будут изменяться в зависимости от длины волны и возникнет хроматическая аберрация, которая проявится в цветных ореолах изображения. Для рефракционной линзы  $f'$  увеличивается с уменьшением  $n_3$  (см. правую часть (2)), т. е. с увеличением длины волны  $\lambda$ .

Хроматические свойства дифракционных линз существенно отличаются от свойств рефракционных линз. Топология дифракционной структуры рассчитывается исходя из того, что приращение оптических путей от границ соседних зон и фазовая задержка на высоте структуры должны быть равны одной длине волны. Радиусы зон определяются по формуле

$$r_k^2 = \frac{2f_0 k \lambda_0}{n_0} = \frac{2k \lambda_0}{\Phi_0}, \quad (3)$$

где  $r_k$  и  $k$  — радиус и номер зоны;  $f_0$  — фокусное расстояние;  $n_0$  — показатель преломления среды;  $\Phi_0$  — оптическая сила линзы для расчетной длины волны  $\lambda_0$ . При освещении светом другой длины волны  $\lambda$  параметры  $r_k$  и  $k$ , являясь конструктивными, сохраняются, а значения оптической силы  $\Phi$  и фокусного расстояния  $f$  изменяются в соответствии с формулами

$$\Phi = \frac{2k \lambda}{r_k^2} = \frac{\Phi_0 \lambda}{\lambda_0}, \quad (4)$$

$$f = \frac{n}{\Phi} = \frac{n \lambda_0}{\Phi_0 \lambda} = f_0 \frac{n \lambda_0}{n_0 \lambda}, \quad (5)$$

где  $n$  — показатель преломления среды для длины волны  $\lambda$ . Из (5) видно, что  $f$  дифракционной линзы уменьшается с увеличением  $\lambda$ .

В отличие от дифракционной в гармонической дифракционной линзе оптическая разность хода между соседними границами зон составляет целое число длин волн  $m_0 \lambda_0$ , а высота структуры в  $m_0$  раз выше. Можно сказать, что это дифракционная линза, работающая в высших порядках дифракции. Радиус зон гармонической ИОЛ [3, 4] определяется по формуле

$$r_k^2 = \frac{2f_0 k m_0 \lambda_0}{n_0} = \frac{2k m_0 \lambda_0}{\Phi_0}, \quad (6)$$

где в отличие от (3) добавлен множитель  $m_0$  (коэффициент кратности или номер порядка дифракции).

Для ряда дискретных длин волн  $\lambda$ , при которых  $m \lambda = m_0 \lambda_0 = \text{const}$  ( $m$  — коэффициент кратности для  $\lambda$ ), из (6) следует, что оптические силы линзы как дифракционного элемента будут одинаковыми:

$$\Phi = \frac{2k m \lambda}{r_k^2} = \frac{2k m_0 \lambda_0}{r_k^2} = \Phi_0, \quad (7)$$

а фокусные расстояния равны:

$$f = \frac{n}{\Phi} = \frac{nr_k^2}{2km\lambda} = f_0 \frac{n}{n_0}, \quad (8)$$

где  $n$  — показатель преломления среды для  $\lambda$ .

Основным видом хроматической aberrации является хроматизм положения (продольный и поперечный). За меру продольного хроматизма принимается разность фокусных расстояний  $\Delta f_{CF} = f_C - f_F$  для стандартных длин волн  $\lambda_C = 0,6563$  мкм и  $\lambda_F = 0,4861$  мкм в видимой области спектра [7]. При сравнении обычных оптических систем применяется относительная разность  $\Delta f_{CF}/f_D$  ( $f_D$  — фокусное расстояние для средней длины волны  $\lambda_D = 0,5893$  мкм) или обратное значение  $\nu_D = f_D/\Delta f_{CF}$ , называемое коэффициентом дисперсии (число Аббе) [7]. Если считать средней длиной волны, к которой чувствительность глаза максимальна, а именно  $\lambda_0 = 0,555$  мкм, то хроматизм будет характеризоваться отношением  $\nu_0 = f_0/\Delta f_{CF}$ .

В случае тонкой рефракционной линзы из (2) следует

$$\nu_0 = \frac{f_0}{\Delta f_{CF}} = \frac{n_0 - 1}{n_F - n_C}, \quad (9)$$

где  $n_0$ ,  $n_F$  и  $n_C$  — относительные коэффициенты преломления (отношение коэффициентов преломления материала и окружающей среды) для соответствующих длин волн. Для дифракционного компонента в первом приближении из (5) получаем

$$\nu_0 = \frac{f_0}{\Delta f_{CF}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_F - \lambda_C}. \quad (10)$$

В (10) по аналогии с (9) введено обозначение  $\nu_0$ , хотя оно имеет отношение к показателям преломления. Далее под коэффициентом дисперсии  $\nu_0$  везде будем понимать отношение  $f_0/\Delta f_{CF}$ , а фокусные расстояния и коэффициенты дисперсии для компонентов ИОЛ и модели глаза с ИОЛ будем точно рассчитывать по формулам (2) и (5).

Известно, что оптическая система из двух компонентов или линз с оптическими силами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  называется ахроматической, если выполняется условие [8]

$$d\Phi_{CF} = \frac{\Phi_1}{\nu_1} + \frac{\Phi_2}{\nu_2} = 0, \quad (11)$$

где  $d\Phi_{CF}$  — разность оптических сил на длинах волн  $\lambda_C$  и  $\lambda_F$  для комбинированной системы;  $\nu_1$  и  $\nu_2$  — коэффициенты дисперсии первого и второго компонентов. Из (11) следует, что для полной компенсации оптическая сила второго компонента должна быть выбрана из

$$\Phi_2 = -\Phi_1 \frac{\nu_2}{\nu_1}. \quad (12)$$

В рефракционных системах для компенсации хроматических aberrаций комбинируют положительные и отрицательные линзы с различными коэффициентами дисперсии  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . В дифракционно-рефракционных системах оптические силы компонентов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  имеют одинаковый знак, поэтому компенсация возможна за счет отрицательной дисперсии дифракционного компонента (см. (10), где  $\lambda_F < \lambda_C$ ). Если не удастся полностью устранить хроматизм, то оставшуюся aberrацию называют вторичным хроматизмом.

О степени компенсации хроматизма оптической системы можно судить также по поперечному хроматизму, т. е. по радиусам кружков хроматического рассеяния для  $\lambda_F$  и  $\lambda_C$  в плоскости наилучшей фокусировки для  $\lambda_0$ . Они приблизительно равны и могут быть определены из соотношения [7]

$$\rho_{CF} = \frac{\Delta f_{CF} D}{4f_0} = \frac{D}{4\nu_0}, \quad (13)$$

где  $D$  — диаметр зрачка глаза. Из (13) видно, что  $\rho_{CF}$  уменьшается с увеличением коэффициента дисперсии системы  $\nu_0$  и увеличивается с диаметром зрачка  $D$ .

Можно считать хроматическую aberrацию ИОЛ практически скомпенсированной, если радиус кружка хроматического рассеяния  $\rho_{CF}$  не превышает величину радиуса дифракционного кружка рассеяния  $r$  для  $\lambda_0$ , определяемого по известной формуле [5]

$$r = \frac{1,22\lambda_0 f_0}{Dn_0}, \quad (14)$$

где  $f_0$  — фокусное расстояние оптической системы модели глаза, включающей роговицу и ИОЛ;  $n_0$  — показатель преломления внутриглазной жидкости.

**Оптическая схема модели глаза.** На рис. 1 показана схема модели глаза с дифракционно-рефракционной ИОЛ 3. В действительности высота дифракционной структуры ( $\sim 1,6$  мкм) в сотни раз меньше толщины линзы ( $\sim 0,7$  мм), а число зон больше ( $\sim 20$  при диаметре зрачка 2, равном 5 мм). В расчетах использовалась модель, соответствующая схематическому глазу Гюльстранда [9], в которой радиусы кривизны внешней и внутренней поверхности роговицы 1 равны  $R_1 = 7,7$  и  $R_2 = 6,8$  мм, а ее толщина составила  $d_1 = 0,5$  мм; расстояние между роговицей и ИОЛ —  $d_2 = 3,65$  мм. Оценка хроматических aberrаций проводилась для линз с параметрами, соответствующими дифракционно-рефракционной бифокальной линзе МИОЛ-Аккорд [2].

Материал линзы МИОЛ-Аккорд — олигокарбонатметакрилат (эластичный акрил) с показателем преломления, равным 1,505 для  $\lambda = 0,5893$  мкм. Рефракционный компонент имеет плосковыпуклую форму. Дифракционная структура формируется на плоской поверхности, обращенной к сетчатке 4 (см. рис. 1). Оптическая сила (рефракция) ИОЛ для расчетной длины волны  $\lambda_0$  составляет 20,55 дптр, что соответствует среднему значению рефракции имплантируемых ИОЛ. Радиус кривизны сферической поверхности  $R_3 = 8,24$  мм

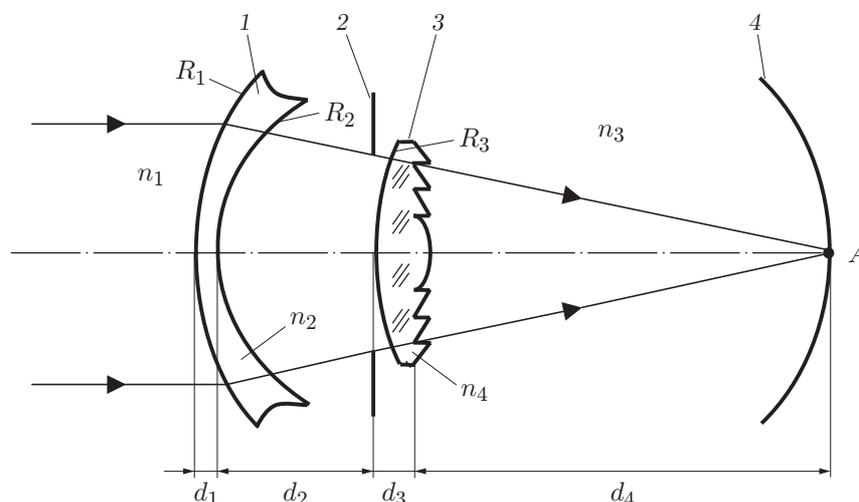


Рис. 1

Таблица 1

Параметры	$\lambda_F$	$\lambda_D$	$\lambda_C$	$\lambda$	$\lambda_e$	$\lambda_0$	$\lambda_{\text{He-Ne}}$
$\lambda$ , мкм	0,4861	0,5893	0,6563	0,532	0,5461	0,555	0,633
$n_1$	1	1	1	1	1	1	1
$n_2$	1,3801	1,376	1,3741	1,3783	1,3777	1,3774	1,3748
$n_3$	1,3401	1,336	1,3341	1,3383	1,3377	1,3374	1,3348
$n_4$	1,510	1,505	1,502	1,508	1,5071	1,5067	1,5029

(выбран из стандартного ряда радиусов), для плоской поверхности  $R_4 = \infty$ , толщина ИОЛ в центре  $d_3 = 0,7$  мм. Расстояние от ИОЛ до сетчатки  $d_4$  порядка 19 мм. Значения показателей преломления воздуха  $n_1$ , роговицы  $n_2$ , внутриглазной жидкости  $n_3$  и материала ИОЛ  $n_4$  приведены в табл. 1. В первых трех колонках даны значения показателей преломления для стандартных длин волн, в следующих четырех — значения, полученные путем интерполяции для области максимальной чувствительности глаза ( $\lambda_0 = 0,555$  мкм), для длин волн, используемых при контроле параметров ИОЛ с твердотельным ( $\lambda = 0,532$  мкм) и гелий-неоновым ( $\lambda_{\text{He-Ne}} = 0,633$  мкм) лазерами [2] и рекомендуемой ( $\lambda_e = 0,5461$  мкм) в стандарте [10]. Данные табл. 1 и формулы (1)–(14) необходимы для приведения измеренных параметров к длине волны  $\lambda_0$ .

**Дифракционные структуры.** Основные виды микроструктур, которые можно применять в качестве дифракционного компонента ИОЛ, показаны на рис. 2. На рисунке указана геометрическая высота профиля, которая должна быть умножена на разность коэффициентов преломления окружающей среды ( $n_1$ ) и материала ИОЛ ( $n_2$ ) для определения фазовой задержки в длинах волн,  $\lambda_0$  — конструктивная длина волны.

На рис. 2, *a* сплошной линией показан пилообразный профиль киноформной («с блеском») структуры, а штриховой — структуры, называемой гармонической [3, 4]. В первом случае максимальная фазовая задержка равна одной длине волны  $\lambda_0$ , а во втором — нескольким длинам волн. Киноформная структура обеспечивает идеальную фокусировку светового пучка только для одной конструктивной (или расчетной) длины волны, а гармоническая — для набора длин волн, фазовая задержка которых равна целому числу длин волн при заданной высоте профиля.

Дифракционные свойства структур с фазовой задержкой, не превышающей длины волны, подробно рассматривались в [11]. В зависимости от формы и глубины дифракционной структуры свет, падающий на нее, разделяется в основном на два или три порядка дифракции. Пилообразная дифракционная структура с фазовой задержкой  $\lambda_0/2$  (рис. 2, *b*) направляет свет в 0-й и +1-й порядки. В 0-м порядке структура с ИОЛ функционирует как обычная рефракционная линза и на сетчатке формируются изображения дальних объектов. В +1-м порядке дифракционный компонент создает положительную дополнительную оптическую силу и ИОЛ со структурой становится способной проецировать на сетчатку ближние объекты. Бинарная фазовая структура (прямоугольная форма) с задержкой  $\lambda_0/2$  (рис. 2, *c*) направляет свет в +1-й и –1-й, а с задержкой  $\lambda_0/3$  (рис. 2, *d*) — в +1, 0 и –1-й порядки. ИОЛ с прямоугольной дифракционной структурой формирует на сетчатке изображения ближних объектов в +1-м и 0-м порядках, а дальних — в –1-м порядке (отрицательная дополнительная оптическая сила). Так как дальние объекты наблюдаются в –1-м порядке, то в ИОЛ с бинарной структурой оптическая сила рефракционного компонента, а следовательно, и кривизна сферической поверхности должны быть увеличены по сравнению с ИОЛ, при которых дальние объекты наблюдаются в 0-м порядке.

Применение гармонической структуры (см. рис. 2, *a*, штриховая линия) в конструкции ИОЛ имеет некоторые особенности, так как она обладает свойствами дифракционной и

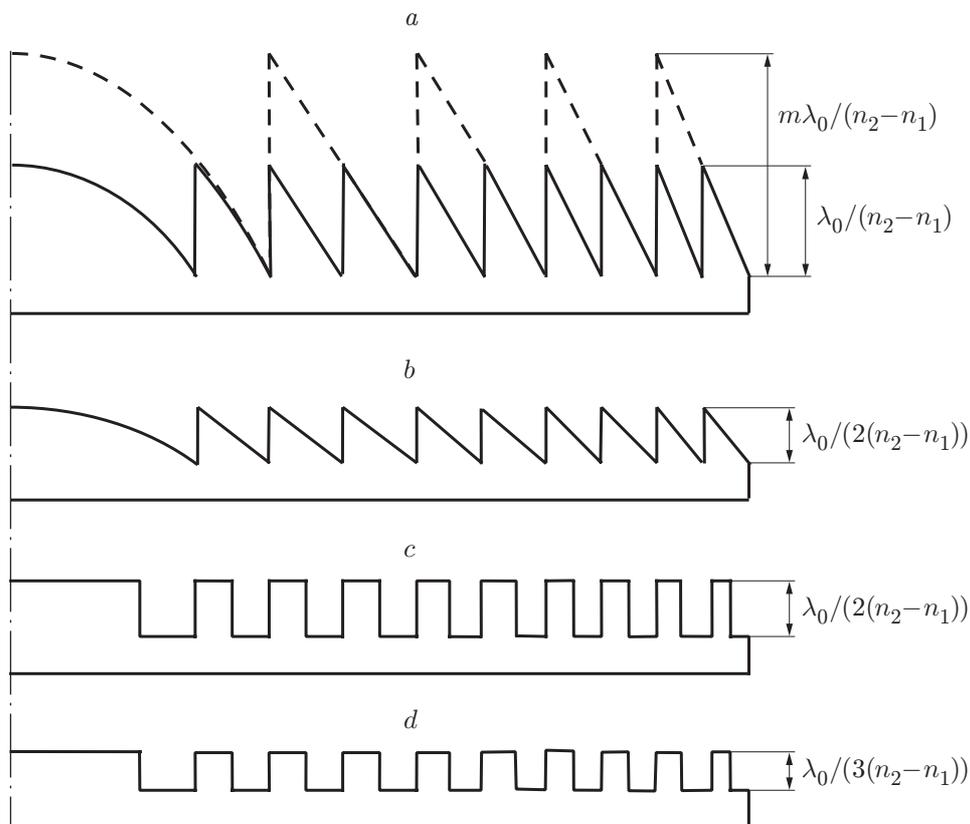


Рис. 2

рефракционной линз. Оптические силы  $\Phi$  для дискретных гармонических длин волн равны оптической силе  $\Phi_0$  для конструктивной длины волны (7) только в первом приближении (исходя из дифракционных свойств линзы). Если принять во внимание рефракционные свойства линзы, то  $m\lambda$  не будет равно  $m_0\lambda_0$ . Чтобы фазовая задержка на структуре для конструктивной  $\lambda_0$  и гармонических (синфазных)  $\lambda$  длин волн была кратна длине волны, должно выполняться следующее соотношение:

$$h = \frac{m_0 \lambda_0}{n_{20} - n_{10}} = \frac{m \lambda}{n_2 - n_1}, \quad (15)$$

где  $h$  — высота структуры;  $n_{20} - n_{10}$  и  $n_2 - n_1$  — разности коэффициентов преломления материала ИОЛ и окружающей среды для конструктивной и гармонических длин волн соответственно. Индексы 1 и 2 соответствуют индексам 3 и 4 в табл. 1. Из (15) с учетом (6) и (7) получаем

$$m \lambda = m_0 \lambda_0 \frac{n_2 - n_1}{n_{20} - n_{10}}, \quad (16)$$

$$\Phi = \frac{n_1}{f} = \Phi_0 \frac{n_2 - n_1}{n_{20} - n_{10}} = \frac{n_{10}}{f_0} \frac{n_2 - n_1}{n_{20} - n_{10}}. \quad (17)$$

Как видно из (17),  $\Phi$  и  $f$  зависят от показателей преломления и, следовательно, хроматическая aberrация для гармонических длин волн все-таки присутствует и аналогична хроматической aberrации рефракционной линзы, что подтверждает вид формулы (1) для

тонкой линзы ( $d \ll R_1$  и  $d \ll R_2$ ) при равенстве коэффициентов преломления окружающей среды до и после линзы.

Несмотря на рефракционные свойства гармонической линзы, значения синфазных длин волн  $\lambda$  с хорошим приближением можно определять на основе только дифракционных свойств, т. е. полагая  $m\lambda = m_0\lambda_0$  и, следовательно,  $\lambda = m_0\lambda_0/m$ . Например, при оптимальном значении кратности  $m_0 = 20$  [3, 4] синфазными в видимой области спектра являются следующие длины волн: 0,463; 0,483; 0,505; 0,529; 0,555; 0,584; 0,617; 0,653 мкм, для которых кратность  $m$  будет изменяться в интервале целых чисел от 24 до 17.

На синфазных длинах волн гармоническая линза работает как рефракционная, но неблагоприятное действие дифракции остается и проявляется в том, что изменяются оптическая сила  $\Delta\Phi$  и фокусное расстояние  $\Delta f$  для промежуточных длин волн. Так как для соседних синфазных длин волн коэффициент  $m$  отличается на  $\pm 1$  («+» соответствует уменьшению, а «-» — увеличению длины волны), то при  $m \gg 1$  относительное изменение промежуточных длин волн  $\Delta\lambda/\lambda$  вблизи синфазных  $\lambda$  будет обратно пропорционально  $m$ , т. е.  $\Delta\lambda/\lambda = 1/m$ . Дифференцируя (7) и (8) и учитывая последнее соотношение, можно определить, что относительное изменение  $\Delta\Phi/\Phi$  и  $\Delta f/f$  имеет вид

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{m}, \quad (18)$$

где  $\Phi$ ,  $f$ ,  $\lambda$  и  $m$  — параметры для синфазной длины волны, причем  $\Phi$  и  $f$  определяются из формулы (17). Из (18) следует, что дифракционные свойства гармонической линзы приводят к хроматизму, величина которого обратно пропорциональна  $m$  и увеличивается с его уменьшением, т. е. с увеличением длины волны. Необходимо отметить, что при отклонении длины волны от синфазной дифракционная эффективность уменьшается и в крайних точках составляет 40 %.

Существенным недостатком гармонической ИОЛ является то, что ширина ее дифракционных зон в  $\sqrt{m_0}$  раз больше, чем в дифракционной линзе (ср. формулы (3) и (6)). Например, при  $\Phi_0 = 20,55$  дптр и  $m_0 = 20$  радиус первой (центральной) зоны для расчетной длины волны  $\lambda_0$  составит  $\sim 1$  мм, второй — 1,5 мм, шестой — 2,5 мм. Всего на зрачке диаметром 6 мм (оптическая часть ИОЛ) 8 зон ( $k = 8$ ). Если учесть, что дифракционные свойства проявляются при большом числе зон, то ИОЛ будет работать как гармоническая линза только при широких зрачках, когда задействовано несколько зон. При малых диаметрах зрачка ( $\sim 2$  мм), когда открыта одна центральная зона, она будет функционировать как обычная рефракционная ИОЛ. Если уменьшать  $m_0$ , будет увеличиваться хроматизм (см. (18)), если увеличивать  $m_0$ , будет увеличиваться диаметр центральной зоны, поэтому  $m_0 = 20$  считается оптимальным значением [3, 4]. Ширина и число зон являются также проблемой в дифракционно-рефракционных ИОЛ, где диаметр центральной зоны составляет  $\sim 1$  мм. Здесь проблема решается введением фазового сдвига в формулу структуры [2]. В результате диаметр центральной зоны уменьшается до 0,5–0,2 мм, но количество зон при малых зрачках увеличивается только на одну зону. Чтобы определить, как зависят хроматические свойства ИОЛ от числа зон, необходимы дополнительные исследования.

Преимущество гармонической ИОЛ заключается в малой толщине, что имеет большое значение для уменьшения разреза роговицы при имплантации ИОЛ. Толщина гармонической ИОЛ практически сравнима с высотой ее дифракционной структуры  $h$ , так как ее оптическая сила зависит только от структуры. Если  $m_0 = 20$ , то на основании данных табл. 1 и формулы (15)  $h = 20 \cdot 0,555 / (1,5067 - 1,3374) = 65,6$  мкм, т. е. толщина гармонической ИОЛ на порядок меньше толщины рефракционной и дифракционно-рефракционной ИОЛ ( $\sim 0,7$  мм).

Далее приводятся результаты расчета хроматических aberrаций ИОЛ и моделей глаза для всех дифракционных структур, показанных на рис. 2.

Таблица 2

Роговица					
Параметры	$\lambda_F$	$\lambda_0$	$\lambda_C$	Данные расчета	
$\Phi$ , дптр	43,59	43,24	42,81	$\Delta\Phi_{CF} = -0,78$	$\nu_0 = 73,58$
$f$ , мм	30,75	30,93	31,17	$\Delta f_{CF} = 0,42$	$1/\nu_0 = 0,014$
Рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	20,62	20,55	20,38	$\Delta\Phi_{CF} = -0,24$	$\nu_0 = 135,69$
$f$ , мм	64,99	65,09	65,47	$\Delta f_{CF} = 0,48$	$\nu_{01} = 63,16$
Роговица + рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	61,39	60,99	60,44	$\Delta\Phi_{CF} = -0,95$	$\nu_0 = 89,59$
$f$ , мм	21,83	21,93	22,07	$\Delta f_{CF} = 0,24$	$1/\nu_0 = 0,011$

**Анализ продольной хроматической аберрации.** Хроматические аберрации (продольный хроматизм положения) моделей глаза (см. рис. 1) с различными конструкциями ИОЛ рассматривались последовательно по элементам (роговица, рефракционный и дифракционный компоненты, ИОЛ) и в целом (роговица + ИОЛ). В табл. 2–6 приведены результаты расчетов по формулам (1)–(10) оптических сил  $\Phi$ , фокусных расстояний  $f$  и коэффициентов дисперсии  $\nu_0 = f_0/\Delta f_{CF}$  (в среде глаза) и для сравнения  $\nu_{01}$  (в воздухе) для каждого из компонентов и оптической системы глаза в целом. В этих таблицах даны также значения  $1/\nu_0$ , характеризующие относительную хроматическую разность  $\Delta f_{CF}/f_0$ .

В результате анализа получено, что коэффициент дисперсии модели глаза с рефракционной ИОЛ с выбранными средними параметрами рефракции (20,55 дптр) составляет  $\nu_0 = 89,59$ , расстояние между фокусами стандартных длин волн  $\Delta f_{CF} = 0,24$  мм, а разность оптических сил  $\Delta\Phi_{CF} = -0,95$  дптр (см. табл. 2). Эти же параметры для модели глаза с дифракционно-рефракционной ИОЛ (при оптической силе дифракционного компонента +4 дптр) имеют противоположный знак и составляют  $\nu_0 = -163,4$ ,  $\Delta f_{CF} = -0,12$  мм и  $\Delta\Phi_{CF} = 0,1$  дптр (см. табл. 3), т. е. хроматическая аберрация уменьшается, но происходит небольшая перекомпенсация. Полная компенсация возможна при оптической силе дифракционного компонента порядка +2 дптр (что следует из соотношения (12) и табл. 2 и 3), но этого недостаточно для обеспечения ближнего зрения. Полная

Таблица 3

Дифракционный компонент (+4 дптр)					
Параметры	$\lambda_F$	$\lambda_0$	$\lambda_C$	Данные расчета	
$\Phi$ , дптр	3,5	4	4,73	$\Delta\Phi_{CF} = 1,23$	$\nu_0 = -3,33$
$f$ , мм	382,51	334,35	282,05	$\Delta f_{CF} = -100,46$	$\nu_{01} = -3,38$
Дифракционно-рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	24,09	24,51	25,06	$\Delta\Phi_{CF} = 0,97$	$\nu_0 = -22,76$
$f$ , мм	55,63	54,57	53,23	$\Delta f_{CF} = -2,4$	$\nu_{01} = -293,89$
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	64,39	64,42	64,49	$\Delta\Phi_{CF} = 0,10$	$\nu_0 = -163,4$
$f$ , мм	20,81	20,76	20,69	$\Delta f_{CF} = -0,12$	$1/\nu_0 = -0,006$

Таблица 4

Дифракционный компонент (-2 дптр)					
Параметры	$\lambda_F$	$\lambda_0$	$\lambda_C$	Данные расчета	
$\Phi$ , дптр	-1,75	-2	-2,37	$\Delta\Phi_{CF} = 0,62$	$\nu_0 = -3,33$
$f$ , мм	-765,0	-668,7	-564,1	$\Delta f_{CF} = -200,9$	$\nu_{01} = -3,38$
Дифракционно-рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	18,88	18,57	18,03	$\Delta\Phi_{CF} = -0,85$	$\nu_0 = 23,91$
$f$ , мм	70,97	72,04	73,98	$\Delta f_{CF} = 3,01$ мм	$\nu_{01} = 37,80$
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	59,89	59,28	58,41	$\Delta\Phi_{CF} = -1,48$	$\nu_0 = 48,54$
$f$ , мм	22,38	22,56	22,84	$\Delta f_{CF} = 0,46$	$1/\nu_0 = 0,021$

Таблица 5

Дифракционная ИОЛ					
Параметры	$\lambda_F$	$\lambda_0$	$\lambda_C$	Данные расчета	
$\Phi$ , дптр	18,00	20,55	24,30	$\Delta\Phi_{CF} = 6,30$	$\nu_0 = -3,33$
$f$ , мм	74,46	65,08	54,90	$\Delta f_{CF} = -19,56$	$1/\nu_0 = -0,30$
Роговица + дифракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	59,13	61,00	63,83	$\Delta\Phi_{CF} = 4,70$	$\nu_0 = -12,43$
$f$ , мм	22,67	21,93	20,90	$\Delta f_{CF} = -1,77$	$1/\nu_0 = 0,081$

Таблица 6

Гармоническая дифракционная ИОЛ					
Параметры	$\lambda_F (m = 23)$	$\lambda_0 (m = 20)$	$\lambda_C (m = 17)$	Данные расчета	
$\Phi$ , дптр	$20,62 \pm 0,45$	$20,55 \pm 0,51$	$20,38 \pm 0,60$	$\Delta\Phi_{CF} = -0,24$	$\Delta\Phi = 0,9; 1,0; 1,2$
$f$ , мм	$64,99 \mp 1,4$	$65,09 \mp 1,6$	$65,47 \mp 1,9$	$\Delta f_{CF} = 0,48$	$\Delta f = 2,8; 3,2; 3,8$
—	—	—	—	$\nu_0 = 135,69$	$\nu = 23; 20; 17$
—	—	—	—	$\Delta f_{CF} + \Delta f = 3,68$	$\nu_0 = 65,09/3,68 = 17,69$
Роговица + гармоническая дифракционная ИОЛ					
$\Phi$ , дптр	$61,39 \pm 0,41$	$60,99 \pm 0,44$	$60,44 \pm 0,47$	$\Delta\Phi_{CF} = -0,95$	$\Delta\Phi = 0,8; 0,88; 0,94$
$f$ , мм	$21,83 \mp 0,14$	$21,93 \mp 0,16$	$22,07 \mp 0,19$	$\Delta f_{CF} = 0,24$	$\Delta f = 0,28; 0,32; 0,38$
—	—	—	—	$\nu_0 = 91,38$	$\nu = 78; 69; 58$
—	—	—	—	$\Delta f_{CF} + \Delta f = 0,56$	$\nu_0 = 21,93/0,56 = 39,16$

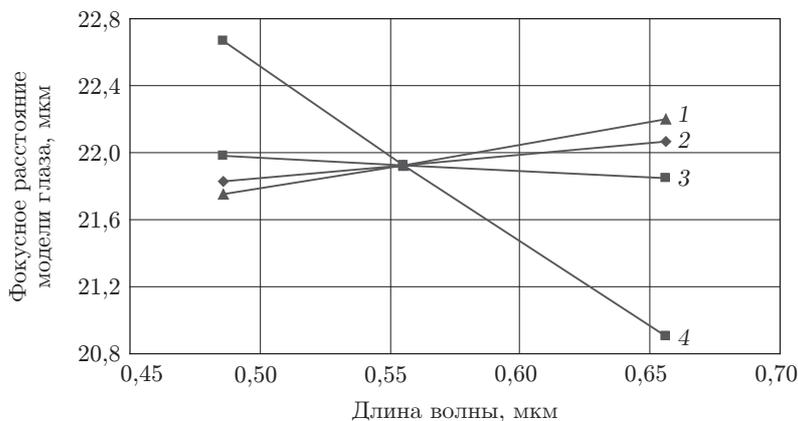


Рис. 3

компенсация может быть достигнута при бинарной структуре (прямоугольной формы), когда разность между рефракциями для дальнего и ближнего зрения 4 дптр создается за счет того, что изображения дальних объектов формируются в  $-1$ -м ( $-2$  дптр), а ближних — в  $+1$ -м ( $+2$  дптр) порядках. Однако при использовании отрицательного порядка параметры  $\nu_0$ ,  $\Delta f_{CF}$  и  $\Delta\Phi_{CF}$ , характеризующие хроматизм в дальней области, заметно ухудшаются:  $\nu_0 = 48,54$ ,  $\Delta f_{CF} = 0,46$  мм и  $\Delta\Phi_{CF} = -1,48$  дптр (см. табл. 4). Самые низкие параметры получены в случае модели глаза с чисто дифракционной ИОЛ (см. табл. 5), когда, как упоминалось выше, роговица компенсирует хроматизм дифракционной ИОЛ в недостаточной степени:  $\nu_0 = -12,43$ ,  $\Delta f_{CF} = -1,77$  мм и  $\Delta\Phi_{CF} = 4,7$  дптр.

Интересно отметить, что для рефракционного компонента (или рефракционной ИОЛ) коэффициент дисперсии в среде ( $\nu_0$ ) в 2,2 раза больше, чем в воздухе ( $\nu_{01}$ ) (см. табл. 2), т. е. aberrации в среде меньше. Для дифракционного компонента  $\nu_0$  и  $\nu_{01}$  имеют практически одинаковое значение (см. табл. 3).

Для наглядности на рис. 3 приведены графики изменения фокусных расстояний моделей глаза с дифракционно-рефракционной ( $-2$  дптр) (кривая 1), рефракционной (2), дифракционно-рефракционной ( $+4$  дптр) (3) и дифракционной (4) ИОЛ в зависимости от длины волны, где все фокусные расстояния для  $\lambda_0$  приведены к одному значению.

В дополнение были проведены расчеты хроматических разностей оптических сил ( $\Delta\Phi_{CF} = \Phi_C - \Phi_F$ ) для моделей глаза с дифракционно-рефракционной ИОЛ при изменении в широких пределах оптических сил роговицы 36–50 дптр (рис. 4, а) и рефракционного компонента 14,5–22,5 дптр (рис. 4, б) при постоянном дифракционном компоненте ( $+4$  дптр). В первом случае неизменной также была оптическая сила рефракционного компонента (20,55 дптр), а во втором — роговицы (43,5 дптр). В обоих случаях наблюдается линейная зависимость, а хроматическая разность изменяется в пределах  $\Delta\Phi_{CF} = 0,24 \dots -0,02$  дптр (см. рис. 4, а) и  $\Delta\Phi_{CF} = 0,16-0,09$  дптр (см. рис. 4, б). При всех других возможных сочетаниях оптических сил роговицы и рефракционного компонента хроматическая разность не превышает значений в интервале  $\Delta\Phi_{CF} = 0,29 \dots -0,03$  дптр. Для дифракционно-рефракционной ИОЛ с отрицательным дифракционным компонентом ( $-2$  дптр) хроматическая разность при аналогичных условиях изменяется в пределах  $\Delta\Phi_{CF} = -0,34 \dots -1,58$  дптр, которые значительно превышают (примерно на порядок) пределы  $\Delta\Phi_{CF}$  для ИОЛ с положительным компонентом ( $+4$  дптр).

В гармонических линзах хроматическая aberrация обусловлена, с одной стороны, дисперсией материала линзы, а с другой — дифракционными свойствами, влияние которых проявляется в дополнительном изменении оптической силы вблизи синфазных длин волн. Из (18) следует, что для промежуточных волн оптическая сила будет изменяться в пре-

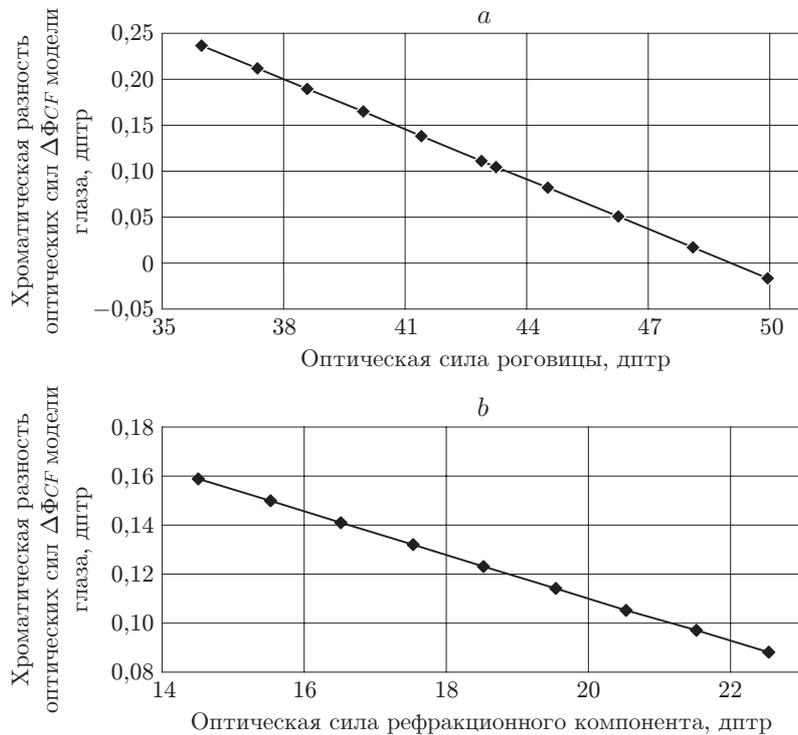


Рис. 4

делах  $\Delta\Phi = \Phi/m$ . В табл. 6 приведены расчетные данные для гармонической ИОЛ (с параметрами  $\Phi_0 = 20,55$  дптр и  $m_0 = 20$ ) и модели глаза с этой линзой. В строках параметров  $\Phi$  и  $f$  левые части их значений,  $\Delta\Phi_{CF}$ ,  $\Delta f_{CF}$  и  $\nu_0$  относятся к рефракционному действию, а правые части (со знаками « $\pm$ » и « $\mp$ ») их значений,  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta f$  и  $\nu$  — к дифракционному действию линзы. Обозначения  $\lambda_F$  и  $\lambda_C$  в данном случае относятся к синфазным длинам волн (0,483 и 0,653 мкм), которые близки по значению к стандартным длинам волн  $\lambda_F = 0,4861$  мкм и  $\lambda_C = 0,6563$  мкм. В строках расчетных данных  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta f$  и  $\nu$  приводятся по три значения для длин волн  $\lambda_F$ ,  $\lambda_0$  и  $\lambda_C$  соответственно. Как видно из табл. 6, для гармонической линзы в среде глаза (без учета роговицы) дифракционная составляющая хроматической аберрации ( $\Delta f_0 = 3,2$  мм,  $\nu_0 = m_0 = 20$ ) в несколько раз больше рефракционной ( $\Delta f_{CF} = 0,48$  мм,  $\nu_0 = 135,69$ ), которая аналогична аберрации для рефракционной ИОЛ (см. табл. 2). Однако в модели глаза (ИОЛ совместно с роговицей) дифракционная составляющая существенно уменьшается ( $\Delta f_0 = 0,32$  мм,  $\nu_0 = 69$ ) и приближается к модели глаза с рефракционной ИОЛ ( $\Delta f_{CF} = 0,24$  мм,  $\nu_0 = 89,59$ , см. табл. 2). Таким образом, суммарные хроматические аберрации модели глаза с гармонической ИОЛ ( $\Delta f_{CF} + \Delta f = (0,24 + 0,32)$  мм = 0,56 мм,  $\nu_0 = 39,16$ ) в 2,3 раза больше, чем для модели глаза с рефракционной ИОЛ. Чтобы уменьшить дифракционную составляющую, надо увеличить  $m_0$ , но тогда увеличится диаметр центральной зоны и уменьшится число зон. Фактически гармоническая линза станет просто линзой Френеля, но останется ее преимущество по толщине. Например, если  $m_0 = 40$ , то дифракционная составляющая уменьшится в 2 раза, а толщина увеличится в 2 раза ( $h = 0,13$  мм), но будет тоньше рефракционной приблизительно в 5 раз.

На рис. 5 схематично показано, как уменьшается взаимное соотношение дифракционной и рефракционной составляющих при переходе от гармонической ИОЛ (а) к модели глаза с этой ИОЛ (б). Из рис. 5 и табл. 6 следует, что в первом (а) и во втором (б) случаях  $\Delta f/\Delta f_{CF} = 3,2/0,48 = 6,7$  и  $\Delta f/\Delta f_{CF} = 0,32/0,24 = 1,3$  соответственно, т. е. соотно-

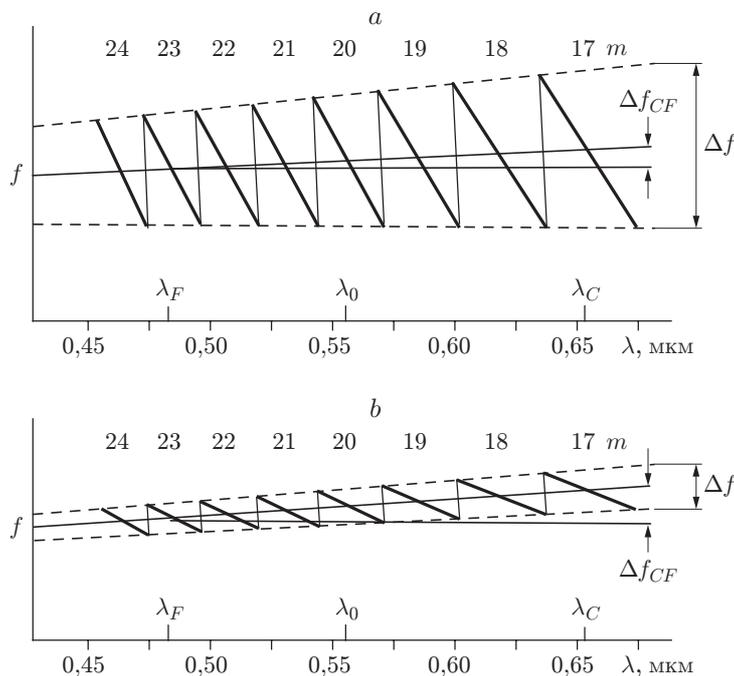


Рис. 5

шение улучшается примерно в 5 раз. Рефракционные свойства линзы проявляются в виде общего подъема графика (увеличение фокусного расстояния) в направлении увеличения длины волны, а дифракционные — в виде наклонных участков (с обратной зависимостью от длины волны), характеризующих зависимость  $f$  от  $\lambda$  вблизи синфазных длин волн (при кратности  $m$ ).

В табл. 7 приведены сводные результаты расчетов для роговицы, рефракционной и гармонической ИОЛ и для моделей глаза с различными конструкциями ИОЛ (роговица + ИОЛ), взаимное сравнение которых было дано выше. Если сопоставить эти данные с экспериментальными, полученными для глаза с естественным хрусталиком ( $\Delta\Phi_{CF} = -1,16$  дптр) [12], то видно, что расчетное значение  $\Delta\Phi_{CF}$  для модели глаза с рефракционной ИОЛ близко к экспериментальному, с гибридной (с положительным дифракционным компонентом +4 дптр) — на порядок меньше, с гибридной (с отрицательным компонентом -2 дптр) и гармонической — в 1,5 раза больше, а с дифракционной ИОЛ — в 4 раза больше.

**Анализ поперечной хроматической аберрации.** Степень поперечного хроматизма положения оценивалась по радиусам кружков хроматического рассеяния  $\rho_{CF}$ , которые рассчитывались из соотношения (13) для трех значений диаметра зрачка ( $D = 2$ ,  $D = 3$  и  $D = 5$  мм). В табл. 8 приведены значения  $\rho_{CF}$  в микрометрах (в скобках значение в минутах) для рефракционной и гармонической ИОЛ (без роговицы) и для моделей глаза (роговица + ИОЛ) с рефракционной, дифракционно-рефракционной, дифракционной и гармонической ИОЛ. Для сравнения в таблице даны также значения радиусов теоретических (дифракционных) кружков рассеяния  $r$ , рассчитанных для области максимальной чувствительности глаза ( $\lambda_0 = 0,555$  мкм) по формуле (14), и экспериментальных  $r$ , полученных в результате измерений [7] и обусловленных сферическими аберрациями и неоднородностями естественного хрусталика.

Из этой таблицы также следует, что при  $D = 3$  мм (диаметр зрачка, рекомендуемый при контроле оптического качества ИОЛ [10]), значения  $\rho_{CF}$  для модели глаза с

Таблица 7

Компоненты и конструкции ИОЛ	$\Delta f_{CF}$ , мм	$1/\nu_0$	$\nu_0$	$\Delta\Phi_{CF}$ , дптр
Роговица	0,42	0,014	73,58	-0,78
Рефракционная ИОЛ	0,48	0,007	135,69	-0,24
Роговица + рефракционная ИОЛ	0,24	0,011	89,59	-0,95
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ (+4 дптр)	-0,12	-0,006	-163,4	0,1
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ (-2 дптр)	0,46	0,021	48,54	-1,48
Роговица + дифракционная ИОЛ	-1,77	0,081	-12,43	4,7
Гармоническая ИОЛ ( $m = 20$ )	3,68	0,056	17,69	-1,24
Роговица + гармоническая ИОЛ ( $m = 20$ )	0,56	0,026	39,16	-1,83

рефракционной и дифракционно-рефракционной ИОЛ с положительной (+4 дптр) и отрицательной (-2 дптр) дополнительной оптической силой составляют 8,4, 4,6 и 15,5 мкм соответственно. Во втором случае (с положительным компонентом) радиус  $\rho_{CF}$  сравним с дифракционным радиусом  $r$ , равным 3,7 мкм, а в первом и третьем  $\rho_{CF}$  приблизительно в 2,3 и 4,2 раза больше  $r$ . При положительной оптической силе дифракционного компонента (+4 дптр)  $\rho_{CF}$  в 3,4 раза меньше, чем при отрицательной силе (-2 дптр). Таким образом, использование в дифракционно-рефракционных ИОЛ положительной дополнительной оптической силы приводит к уменьшению, а отрицательной — к увеличению хроматической аберрации. Увеличение хроматизма ИОЛ в третьем случае (с отрицательным компонентом), который имеет отношение к бинарному профилю, ставит под сомнение использование такого профиля в дифракционно-рефракционных ИОЛ. Для модели с дифракционной ИОЛ расчетное значение  $\rho_{CF}$  в 8 раз больше, чем для модели с рефракционной ИОЛ, и в 20 раз больше дифракционного кружка рассеяния  $r$ .

По сравнению с рефракционной ИОЛ (см. табл. 8) применение в модели глаза гибридной ИОЛ с положительным компонентом приводит к уменьшению радиуса  $f_{CF}$  в 1,8 раза, а с отрицательным — к увеличению в 1,9 раза. При использовании гармонической и дифракционной ИОЛ  $f_{CF}$  увеличивается в 2,3 и 7,2 раза соответственно. Но это теоретически. В реальных условиях глаз с обычной рефракционной ИОЛ не замечает хроматизма, поэтому сопоставление с рефракционной ИОЛ, вероятно, является самым надежным сравнением. Если сопоставлять  $\rho_{CF}$  с экспериментальными значениями  $r$  [7], то только для

Таблица 8

Параметры и конструкции ИОЛ	$\nu_0$	$\rho_{CF}$ , мкм (')		
		2	3	5
$D$ , мм	—	2	3	5
$r$ (дифракционный), мкм (')	—	5,6 (0,9)	3,7 (0,6)	2,2 (0,4)
$r$ (экспериментальный) (')	—	(2,3)	(2,8)	(3,7)
Рефракционная ИОЛ	135,7	3,7	5,5	9,2
Роговица + рефракционная ИОЛ	89,6	5,6 (0,9)	8,4 (1,3)	14,0 (2,2)
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ (+4 дптр)	-163,4	3,1 (0,5)	4,6 (0,7)	7,7 (1,2)
Роговица + дифракционно-рефракционная ИОЛ (-2 дптр)	48,5	10,3 (1,6)	15,5 (2,4)	25,8 (4,0)
Роговица + дифракционная ИОЛ	-12,4	40,3 (6,3)	60,4 (9,5)	100,6 (15,8)
Гармоническая ИОЛ ( $m_0 = 20$ )	17,7	28,3	42,4	70,7
Роговица + гармоническая ИОЛ ( $m_0 = 20$ )	39,2	12,8 (2,0)	19,2 (3,0)	31,9 (5,0)

модели глаза с дифракционной ИОЛ  $\rho_{CF}$  больше приблизительно в 3,4 раза, а для остальных моделей практически не превышает этих значений. Однако результаты измерений [7], возможно, субъективны, так как кажутся завышенными. Известно, что для глаза считается нормальной острота зрения, равная  $1'$ . К этому значению при  $D = 3$  мм близки значения  $\rho_{CF}$  только для модели глаза с рефракционной и дифракционно-рефракционной (+4 дптр) ИОЛ.

В гармонических линзах как дифракционных элементах роль коэффициента дисперсии выполняет число кратности  $m$  (18), но оно характеризует не хроматизм в принятом смысле, а уширение сфокусированного изображения, вызванное промежуточными длинами волн, отстоящими от синфазных приблизительно на  $\pm(0,01-0,02)$  мкм при  $m = 17-24$  (см. рис. 5). Из табл. 6 видно, что изменение фокусного расстояния  $\Delta f$  на промежуточных длинах волн вблизи коротких синфазных волн ( $\lambda_F$ ) в 1,36 (1,9/1,4) раза меньше, чем вблизи длинных ( $\lambda_C$ ). Следовательно, для гармонической линзы, в отличие от других структур, радиусы кружков рассеяния для  $\lambda_F$  и  $\lambda_C$  не равны друг другу. Последнее обстоятельство может стать причиной появления цветных ореолов в изображении. В табл. 8 (в столбцах  $\rho_{CF}$ ) приведены значения, соответствующие расчетной длине волны  $\lambda_0$  и суммарному коэффициенту дисперсии  $\nu_0$  (см. табл. 6). Как видно из табл. 8, значения  $\rho_{CF}$  для гармонической ИОЛ существенно больше (в 7,7 раза), чем значения  $\rho_{CF}$  для рефракционной ИОЛ, а в модели глаза только в 2,3 раза. В последнем случае кружок рассеяния сравним с  $\rho_{CF}$  для модели глаза с дифракционно-рефракционной (-2 дптр) ИОЛ. Данные табл. 8 верны для гармонической ИОЛ при большом числе зон. Если открыта только центральная зона, то значения  $\rho_{CF}$  будут аналогичны  $\rho_{CF}$  для модели с рефракционной ИОЛ.

**Заключение.** Проведенный в данной работе анализ показал, что наименьшими продольными хроматическими aberrациями обладают гибридные (дифракционно-рефракционные) ИОЛ, в которых дифракционные компоненты создают дополнительную положительную оптическую силу. Применение в модели глаза гибридных ИОЛ с положительными (+4 дптр) компонентами приводит к уменьшению хроматизма в 1,8 раза по сравнению с рефракционными ИОЛ, а с отрицательными (-2 дптр) компонентами, наоборот, к увеличению в 1,9 раза. Последнее ставит под сомнение использование бинарного профиля в ИОЛ. Применение чисто дифракционных ИОЛ не представляется возможным, так как в этом случае хроматизм увеличивается приблизительно на порядок (в 7,7 раза). Гармонические дифракционные ИОЛ имеют преимущество по толщине, но их хроматические aberrации совместно с роговицей больше чем в 2 раза или такие же (в зависимости от диаметра зрачка), как хроматические aberrации рефракционных ИОЛ. Уменьшение хроматических aberrаций возможно при увеличении высоты структуры, но при этом гармоническая линза фактически становится линзой Френеля. Расчет кружков рассеяния, характеризующих поперечные хроматические aberrации модели глаза при диаметре зрачка, равном 3 мм, показал, что только для гибридных ИОЛ с положительными (+4 дптр) дифракционными компонентами они сравнимы с кружком дифракционного рассеяния ( $0,6'$ ). Если проводить сравнение с нормальной остротой зрения, для которой радиус кружка рассеяния равен  $1'$ , то к этому значению близки радиусы кружков хроматического рассеяния для рефракционных и гибридных ИОЛ с положительными (+4 дптр) компонентами, а для ИОЛ с отрицательными (-2 дптр) компонентами, гармонической и дифракционной ИОЛ они в 2,4; 3 и 9,5 раз больше соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Futhey J. A.** Diffractive bifocal intraocular lens // SPIE. Holographic Optics: Optically and Computer Generated. 1989. **1052**. P. 142.

2. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Корольков В. П., Исаков И. А.** Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Оптический журнал. 2007. **74**, № 12. С. 34–39.
3. **Faklis D., Morris G. M.** Spectral properties of multiorder diffractive lenses // Appl. Opt. 1995. **34**, N 14. P. 2462–2468.
4. **Sweeney D. W., Sommargren G. E.** Harmonic diffractive lenses // Ibid. P. 2469–2475.
5. **Апенко М. И., Дубовик А. С.** Прикладная оптика. М.: Наука, 1982.
6. **Бегунов Б. Н.** Геометрическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1961.
7. **Максутов Д. Д.** Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979.
8. **Русинов М. М.** Техническая оптика. М.–Л.: Машгиз, 1961.
9. **Ленкова Г. А., Мызник М. М.** Сферохроматические aberrации модели глаза с бифокальными гибридными интраокулярными линзами // Автометрия. 2001. № 5. С. 85–95.
10. **ГОСТР 52038-2003 (ИСО11979-2-99).** Имплантаты офтальмологические. Интраокулярные линзы. Часть 2. Оптические свойства и методы испытаний. М.: Госстандарт России.
11. **Ленкова Г. А.** Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // Автометрия. 1995. № 5. С. 16–24.
12. **Liou H.-L., Brennan N. A.** Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling // JOSA. 1997. **14**, N 8. P. 1684–1695.

*Поступила в редакцию 29 декабря 2008 г.*

---