

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БИФОКАЛЬНЫХ ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ  
ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ\***

**Г. А. Ленкова**

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*

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

Рассмотрены особенности расчета и определения рефракции (оптической силы) и дифракционной эффективности бифокальных гибридных (дифракционно-рефракционных) интраокулярных линз (ИОЛ) искусственных хрусталиков глаза. Проведены анализ и сравнение методов расчета рефракции ИОЛ для ближнего и дальнего зрения на основе измерений фокусных расстояний в воздухе и в среде. Показано, что при исследовании гибридных линз удобнее оценивать соответствие высоты профиля расчетному значению по соотношению интенсивностей в воздухе 1-го и 2-го, а в среде 0-го и 1-го порядков дифракции. Определены допустимые погрешности измерений и отклонений параметров гибридных ИОЛ, на основе которых рассчитывается рефракция и дифракционная эффективность.

**Введение.** В настоящее время в практике восстановления зрения все большее применение находят бифокальные и мультифокальные интраокулярные линзы (ИОЛ), позволяющие видеть без очков независимо от расстояния до объекта. По принципу действия такие ИОЛ могут быть рефракционными, дифракционными или дифракционно-рефракционными (гибридными). Особый интерес представляют последние, так как они позволяют компенсировать aberrации роговицы и сферического компонента, варьировать соотношение интенсивностей в изображениях ближних и дальних предметов, уменьшать толщину линзы и т. д. [1].

При производстве ИОЛ необходим контроль оптических характеристик линз на соответствие расчетным параметрам. На обычные рефракционные ИОЛ существуют Международный ISO/DIS 11979-2 [2] и Российский ГОСТ Р 52038-2003 [3] (далее ГОСТ), которые устанавливают требования к оптическим характеристикам и рекомендуют определенные методы испытаний качества изготовленных ИОЛ. Ввиду специфических особенностей дифракционно-рефракционных ИОЛ, методы, рекомендуемые ГОСТ, только частично могут быть применены для их контроля. Цель данной работы – рас-

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00541).

смотреть возможные методы контроля параметров гибридных ИОЛ, оценить допустимые погрешности измерений.

**Расчет рефракций дифракционно-рефракционных ИОЛ.** Оптическая сила (рефракция) простейшей двухкомпонентной системы, к которой относится рефракционная ИОЛ, может быть представлена в виде [4]

$$\Phi = n_1/f = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n_2 = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{d(n_2 - n_1)^2}{n_2 R_1 R_2}, \quad (1)$$

где  $\Phi$ ,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – оптические силы линз или компонентов (поверхностей линзы);  $d$  – расстояние между линзами или компонентами линзы;  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления окружающей среды и материала, из которого сделана линза, соответственно;  $R_1$ ,  $R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы. Здесь и далее полагаем, что  $f$  – заднее фокусное расстояние (в геометрической оптике этот параметр принято обозначать  $f'$ ) и что фокусные расстояния и радиусы кривизны выражаются в миллиметрах, а оптические силы – в диоптриях. Следует отметить, что маркировка рефракции ИОЛ указывается для условий внутри глаза, т. е. в среде, поэтому в (1)  $f$  – фокусное расстояние в среде.

Бифокальные дифракционно-рефракционные (гибридные) ИОЛ представляют собой выпукло-плоские или двояковыпуклые линзы, на плоской или одной из сферических поверхностей которых сформирована дифракционная структура. Далее, не нарушая общности рассуждений, будут рассматриваться только ИОЛ, имеющие выпукло-плоскую рефракционную часть с дифракционной структурой на плоской поверхности. Вид этой структуры подобен зонной пластинке Френеля. В 0-м порядке дифракции зонная пластинка не работает и ИОЛ формирует на сетчатке изображения дальних объектов как обычный рефракционный хрусталик, рассчитанный на бесконечность. В +1-м порядке (далее номер порядка будет указываться без знака «+») дифракционный компонент создает положительную дополнительную оптическую силу и ИОЛ становится способной проецировать на сетчатку ближние объекты. Таким образом, бифокальные ИОЛ имеют две оптические силы, из которых одна ( $\Phi_{0, \text{aq}}$ ) обеспечивает дальнее зрение (0-й порядок), а другая ( $\Phi_{1, \text{aq}}$ ) – ближнее зрение (1-й порядок).

Оптическая сила для дальнего зрения на основании (1) при  $R_1 = R$  и  $R_2 = \infty$  имеет вид

$$\Phi_{0, \text{aq}} = n_{\text{aq}}/f_{0, \text{aq}} = (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})/R, \quad (2)$$

где  $f_{0, \text{aq}}$  – фокусное расстояние ИОЛ в среде глаза для дальнего зрения;  $R$  – радиус кривизны сферической поверхности;  $n_{\text{aq}}$  и  $n_{\text{IOL}}$  – коэффициенты преломления окружающей среды и материала, из которого сделана линза, соответственно. Оптическая сила ИОЛ для ближнего зрения  $\Phi_{1, \text{aq}}$  создается рефракционной частью и дифракционной структурой. На основании (1) и с учетом того, что толщина линзы  $d$  существенно меньше радиуса кривизны (обычно  $d \sim 1$  мм,  $R_1$  и  $R_2 \sim 10$  мм, а в нашем случае, кроме того,  $R_2 = \infty$ ), она может быть представлена в виде

$$\Phi_{1, \text{aq}} = n_{\text{aq}}/f_{1, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{aq}} + \Phi_d, \quad (3)$$

где  $f_{1, \text{aq}}$  – фокусное расстояние ИОЛ в среде глаза для ближнего зрения;  $\Phi_d$  – оптическая сила дифракционного компонента, которая рассчитывается для заданного расстояния ближнего зрения и выбранной модели глаза [5].

В отличие от рефракционного компонента оптическая сила дифракционного компонента  $\Phi_d$  остается постоянной независимо от среды, так как она определяется только законом изменения радиусов зон дифракционной структуры. Фактически одновременно с изменением коэффициента преломления окружающей среды  $n_{\text{aq}}$  изменяется фокусное расстояние дифракционного компонента  $f_d$ , причем прямо пропорционально ( $f_{d, \text{aq}} = n_{\text{aq}} f_{d, \text{air}}$ ). Поэтому  $\Phi_d$  всегда равна оптической силе в воздухе:

$$\Phi_d = n_{\text{aq}} / f_{d, \text{aq}} = 1 / f_{d, \text{air}}, \quad (4)$$

где  $f_{d, \text{aq}}$ ,  $f_{d, \text{air}}$  – фокусные расстояния, а  $n_{\text{aq}} / f_{d, \text{aq}}$  и  $1 / f_{d, \text{air}}$  (в числителе коэффициента преломления воздуха  $n_{\text{air}} = 1$ ) – оптические силы в среде и в воздухе соответственно.

Для изготовления ИОЛ с заданной рефракцией радиусы кривизны ее поверхностей выбираются из стандартизованного набора радиусов с учетом показателей преломления и формул (1), (2). Рефракция полученной линзы может не соответствовать расчетному значению из-за общих и локальных отклонений радиусов кривизны и реальных значений показателей преломления. Известно, что для непосредственного измерения рефракции не существует ни методов, ни приборов, поэтому реальная рефракция рассчитывается на основе измеренных значений характеристик линзы, входящих в формулы (1), (2). Причем если при измерении фокусных расстояний мы получаем информацию о рефракции ИОЛ в общем виде, то при измерении показателей преломления, толщины и радиусов кривизны линзы – конкретно о соответствии реальных параметров расчетным.

**Методы измерения рефракций дифракционно-рефракционных ИОЛ.** Определение задней вершинной рефракции обычных рефракционных ИОЛ может быть проведено по ГОСТ тремя альтернативными методами. Первый метод заключается в расчете рефракции по формуле (1) на основании измеренных показателей преломления, толщины и радиусов кривизны ИОЛ. Во втором методе задняя вершинная рефракция  $\Phi_{\text{aq}}$  рассчитывается на основании измерений в воздухе заднего фокусного расстояния ИОЛ по формуле

$$\Phi_{\text{aq}} = Q \Phi_{\text{air}}, \quad (5)$$

где  $\Phi_{\text{air}}$  – рефракция ИОЛ в воздухе, связанная с параксиальным фокусным расстоянием в воздухе ( $f_{\text{air}}$ ) соотношением

$$\Phi_{\text{air}} = 1 / f_{\text{air}}; \quad (6)$$

$Q$  – коэффициент пересчета рефракции ИОЛ в воздухе на рефракцию в среде, вычисляемый по формуле

$$Q = \Phi_{\text{aq, nom}} / \Phi_{\text{air, nom}} \quad (7)$$

Здесь  $\Phi_{\text{aq, nom}}$  и  $\Phi_{\text{air, nom}}$  – рефракции ИОЛ в условиях, близких к работе внутри глаза (*in situ*) и в воздухе, рассчитанные по формуле (1) с использованием ее номинальных параметров.

В работе [6] проанализирована взаимосвязь оптических характеристик ИОЛ в воздухе, среде и кювете и показано, что для тонких линз, какими является большинство современных ИОЛ, коэффициент пересчета рефракции зависит только от показателей преломления и может быть представлен в виде

$$Q = (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}) / (n_{\text{IOL}} - 1). \quad (8)$$

Подставляя (6) и (8) в (5), получаем

$$\Phi_{\text{aq}} = (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}) / (n_{\text{IOL}} - 1) (1 / f_{\text{air}}), \quad (9)$$

где  $f_{\text{air}}$  находится в результате измерений или рассчитывается по формуле

$$f_{\text{air}} = R / (n_{\text{IOL}} - 1). \quad (10)$$

В третьем методе задняя вершинная рефракция ИОЛ определяется на основе измерения увеличения объекта. Фокусное расстояние ИОЛ ( $f$ ) вычисляется по формуле

$$f = (F / h_{\text{target}}) h_{\text{image}}, \quad (11)$$

где  $h_{\text{target}}$  и  $h_{\text{image}}$  – линейные размеры шкалы и ее изображения;  $F$  – фокусное расстояние объектива коллиматора. Далее проводятся расчеты  $\Phi_{\text{aq}}$  по формуле (2) или, если  $f$  измеряется в воздухе, по формуле (9), полагая  $f_{\text{air}} = f$ .

При определении рефракции по второму и третьему методам контролируемая ИОЛ располагается после коллиматора, в фокусе которого устанавливается линейная шкала или мира. Затем с помощью микроскопа во втором методе измеряется фокусное расстояние (расстояние от линзы до изображения шкалы), а в третьем – размер изображения.

Наиболее удобным и часто используемым является второй метод определения рефракции ИОЛ, так как он не требует дополнительной аппаратуры для измерения радиусов кривизны, линейного размера шкалы и фокусного расстояния объектива коллиматора. Однако применение этого метода для испытания бифокальных дифракционно-рефракционных ИОЛ в том виде, какой рекомендует ГОСТ, невозможно. ГОСТ устанавливает методы испытаний только для рефракционных ИОЛ.

Рассмотрим, как можно изменить второй метод расчета рефракции  $\Phi_{\text{aq}}$  применительно к гибридным ИОЛ. Известно [1], что микроструктура дифракционного компонента гибридной ИОЛ выполняется в виде пилообразного профиля, высота которого подбирается таким образом, чтобы интенсивности света в 0-м (зрение вдаль) и 1-м (зрение вблизи) порядках дифракции в среде глаза были близки или равны между собой, а в высших порядках пренебрежимо малы. В воздухе фазовая задержка на структуре увеличивается и свет направляется преимущественно в 1-й и 2-й порядки дифракции, а 0-й порядок практически отсутствует. По этой причине при измерениях в воздухе рефракцию гибридной ИОЛ для дальнего зрения невозможно рассчитать по формуле (9), а для ближнего зрения необходимо учитывать отличие преобразования рефракции для дифракционного и рефракционного компонентов (формулы (4) и (9)).

Определение рефракций для дальнего  $\Phi_{0, \text{aq}}$  и ближнего  $\Phi_{1, \text{aq}}$  зрения по измерениям в воздухе возможно двумя путями. Первый путь – использование расчетного значения оптической силы дифракционного компонента  $\Phi_d$  и измеренного фокусного расстояния в воздухе в 1-м порядке дифракции ( $f_{1, \text{air}}$ ). Тогда формулы будут иметь вид

$$\Phi_{0, \text{aq}} = Q(1/f_{1, \text{air}} - \Phi_d), \quad (12)$$

$$\Phi_{1, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{aq}} + \Phi_d = Q/f_{1, \text{air}} + (1-Q)\Phi_d. \quad (13)$$

Второй путь заключается в расчете рефракций на основе измеренных значений фокусных расстояний в воздухе в 1-м ( $f_{1, \text{air}}$ ) и 2-м ( $f_{2, \text{air}}$ ) порядках, т. е. без использования  $\Phi_d$ , по формулам

$$\Phi_{0, \text{aq}} = Q(2/f_{1, \text{air}} - 1/f_{2, \text{air}}), \quad (14)$$

$$\Phi_{1, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{aq}} + \Phi_d = \Phi_{0, \text{aq}} + (1/f_{2, \text{air}} - 1/f_{1, \text{air}}) = (1-Q)/f_{2, \text{air}} - (1-2Q)/f_{1, \text{air}}. \quad (15)$$

В (12)–(15)  $Q$  – коэффициент пересчета, который находится по формуле (8).

Третий путь – измерение рефракций для дальнего и ближнего зрения в среде, если поместить ИОЛ в кювету с физраствором (по ГОСТ допускается также использование дистиллированной воды). В этом случае наблюдаются 0-й и 1-й порядки дифракции. В работе [6] показано, что рефракции в среде ( $\Phi_{0, \text{aq}}$  и  $\Phi_{1, \text{aq}}$ ) равны рефракциям за кюветой ( $\Phi_{0, \text{cuv}}$  и  $\Phi_{1, \text{cuv}}$ ):

$$\Phi_{0, \text{aq}} = n_{\text{aq}}/f_{0, \text{aq}} = 1/f_{0, \text{cuv}} = \Phi_{0, \text{cuv}}; \quad (16)$$

$$\Phi_{1, \text{aq}} = n_{\text{aq}}/f_{1, \text{aq}} = 1/f_{1, \text{cuv}} = \Phi_{1, \text{cuv}},$$

где  $f_{0, \text{aq}}$ ,  $f_{1, \text{aq}}$  и  $f_{0, \text{cuv}}$ ,  $f_{1, \text{cuv}}$  – расстояния от ИОЛ до фокуса в среде и в воздухе за кюветой соответственно. В реальных условиях толщины слоя воды и стенки кюветы существенно меньше, чем фокусное расстояние, поэтому после выхода светового пучка из кюветы расстояние от ИОЛ до фокуса в воздухе фактически уменьшается пропорционально коэффициенту преломления среды  $n_{\text{aq}}$ . Формула (16) следует из соотношений  $f_{0, \text{aq}}/n_{\text{aq}} = f_{0, \text{cuv}}$  и  $f_{1, \text{aq}}/n_{\text{aq}} = f_{1, \text{cuv}}$ . Можно ввести поправки на смещения фокуса, вызванные влиянием слоя среды и стенки кюветы, но этого не требуется, если фокусные расстояния измеряются с помощью микроскопа. В последнем случае смещения изображений фокусов и структуры (или вершины линзы) происходят одновременно в одном направлении и на одну и ту же величину.

Особенность третьего метода заключается в том, что  $\Phi_{\text{aq}}$  рассчитывается просто, как обратное значение  $f_{\text{cuv}}$ , выраженное в метрах, без введения коэффициента пересчета. Таким образом, в этом случае точность измерения показателей преломления не влияет на результат определения рефракции.

В отличие от третьего метода, по ГОСТ измерение рефракции проводится в воздухе, хотя, как показано выше, измерение рефракции ИОЛ с использованием кюветы имеет ряд преимуществ. Только при исследовании качества изображения, а именно при измерениях разрешающей способности и

функции передачи модуляции, ГОСТ рекомендует помещать ИОЛ в модель глаза, которую в нашем случае имитирует кювета с физраствором.

Четвертый, более простой, метод определения рефракции, который не рассматривается в ГОСТ, заключается в следующем. ИОЛ освещается параллельным пучком света от лазера, и измеряется фокусное расстояние за кюветой или в воздухе как разность показаний продольной шкалы микроскопа при наведении на поверхность линзы и на сфокусированное изображение точечного источника (рис. 1). Этот метод в сравнении с рассмотренными имеет ряд преимуществ. Во-первых, не требуется аттестованная шкала. Во-вторых, по форме распределения интенсивности в фокальной плоскости (функция рассеяния точки (ФРТ)) можно наглядно судить о наличии или отсутствии сферических, астигматических и других aberrаций. Кроме того, фурье-преобразование ФРТ, которое представляет собой модуляционно-передаточную функцию (МПФ), может показать, как ИОЛ передает различные пространственные частоты.

Следует заметить, что при измерениях в воздухе могут возникнуть затруднения в связи тем, что структура дифракционного компонента ИОЛ рассчитывается для среды, причем так, чтобы в 1-м порядке дифракции компенсировались aberrации роговицы и рефракционного компонента для стандартной длины волны. В воздухе условия компенсации нарушаются и появляются сферические aberrации, которые особенно заметны во 2-м порядке дифракции. Кроме того, при измерениях в белом свете наблюдается зависимость оптической силы дифракционного компонента ИОЛ от длины волны. Если в 1-м порядке хроматические aberrации дифракционного и рефракционного компонентов взаимно компенсируются, то во 2-м порядке при наличии сферической aberrации они существенно снижают контраст изображения и практически не позволяют производить измерение фокусных расстояний в этом порядке. Поэтому при исследованиях в воздухе в белом свете второй путь расчета рефракций по формулам (14) и (15) на основе измерения фокусных расстояний в 1-м ( $f_{1, \text{air}}$ ) и 2-м ( $f_{2, \text{air}}$ ) порядках, т. е. без использования  $\Phi_d$ , может привести к ошибкам. В монохроматическом свете aberrации во 2-м порядке меньше и второй путь измерения возможен.

**Определение параксиального фокусного расстояния.** Оптическая сила ИОЛ рассчитывается по формулам геометрической оптики (2) на основе параксиальных фокусных расстояний  $f$ . При исследовании качества изготовления ИОЛ фокусное расстояние измеряется как расстояние от пятна наименьшего рассеяния до задней поверхности линзы. Для согласования результатов измерений с расчетом необходимо ввести поправки на расстояние от

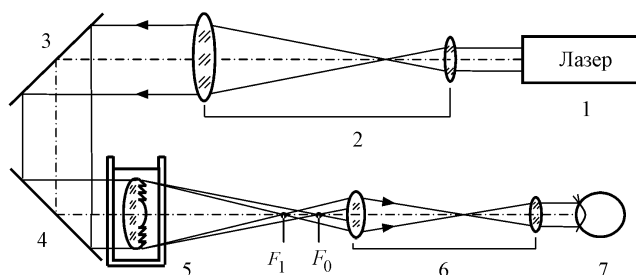


Рис. 1. Схема установки для измерения фокусных расстояний: 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3, 4 – поворотные зеркала, 5 – кювета с дистиллированной водой и ИОЛ, 6 – микроскоп, 7 – глаз



поверхности ИОЛ до главной задней плоскости ИОЛ ( $\Delta f_1 = S'_H$ ) и от параксиальной фокальной точки до точки «наилучшего фокуса» ( $\Delta f_2 = \Delta S'/2$ ), т. е. до плоскости, в которой наблюдается минимальное пятно рассеяния. Первая поправка известна из геометрической оптики [7]:

$$\Delta f_1 = S'_H = \frac{f(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})d}{n_{\text{IOL}}R}. \quad (17)$$

Для тонкой выпукло-плоской линзы при  $f = n_{\text{aq}}R/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})$  формула (17) преобразуется в

$$\Delta f_1 = S'_H = d(n_{\text{aq}}/n_{\text{IOL}}). \quad (18)$$

Например, если  $d = 0,9$  мм, то в условиях среды ( $n_{\text{aq}} = 1,336$  и  $n_{\text{IOL}} = 1,505$ )  $\Delta f_1 = S'_H = 0,8$  мм, а в воздухе ( $n_{\text{aq}} = n_{\text{air}} = 1$ ,  $n_{\text{IOL}} = 1,505$ )  $\Delta f_1 = S'_H = 0,6$  мм.

Вторая поправка для ИОЛ как выпукло-плоской линзы может быть рассчитана в первом приближении по формуле (2.3) из [6] с учетом того, что минимальное пятно рассеяния отстоит от параксиального фокуса в направлении к линзе на половину значения продольной сферической аберрации  $\Delta S'$  (в [6]  $\Delta S' = \Delta f_y$ ):

$$\Delta f_2 = \Delta S'/2 = \frac{n^3 - 2n^2 + 2}{4n(n-1)^2} \frac{D^2}{4f} = \frac{n^3 - 2n^2 + 2}{4n(n-1)} \frac{D^2}{4R}, \quad (19)$$

где  $n = n_2/n_1$  ( $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления окружающей среды и материала, из которого сделана линза);  $D$  и  $f$  – диаметр и фокусное расстояние линзы;  $R$  – радиус кривизны сферической поверхности. В условиях среды ( $n_1 = n_{\text{aq}} = 1,336$ ) и при  $n_2 = n_{\text{IOL}} = 1,505$  получаем  $n = 1,1265$  и  $\Delta f_2 = \Delta S'/2 = 1,56D^2/4R$ . В воздухе ( $n_1 = n_{\text{air}} = 1$ ) при том же значении  $n_2$  будем иметь  $n = 1,505$  и  $\Delta f_2 = \Delta S'/2 = 0,29D^2/4R$ . Например, при  $R = 8,24$  мм ( $f_{\text{aq}} = 65,14$  мм,  $f_{\text{air}} = 16,32$  мм) и  $D = 4,5$  мм (3 мм) для среды  $\Delta f_2 = \Delta S'/2 = 0,96$  мм (0,43 мм), а для воздуха  $\Delta f_2 = \Delta S'/2 = 0,18$  мм (0,08 мм), т. е. приблизительно в 5 раз меньше. Если при ближнем зрении ( $f_1$ ) сферическая аберрация компенсируется за счет дифракционного компонента, то расчет второй поправки  $\Delta f_2$  проводится только для  $f_0$  (зрение вдаль).

Расчет поправки  $\Delta f_2$  по аналитической формуле (19) удобен тем, что он не требует специального программного обеспечения, тем не менее он достаточно точен. Результаты расчетов по формуле (19) и лучевым методом для среды различаются не более чем на 0,05 мм.

**Поправка на смещение фокуса из-за слоя жидкости и стенки кюветы.** При измерении характеристик ИОЛ в условиях, близких к работе внутри глаза, линза помещается в кювету с физраствором (или дистиллированной водой), имитирующую модель глаза. В этом случае измеряемое расстояние от линзы до фокуса за кюветой ( $f_{\text{cuv. meas}}$ ) может быть представлено в виде

$$f_{\text{cuv. meas}} = (n_{\text{air}}/n_{\text{aq}})(f_{\text{cuv}} n_{\text{aq}} - d_{\text{aq}}) - (n_{\text{air}}/n_{\text{cuv}})d_{\text{cuv}} + d_{\text{aq}} + d_{\text{cuv}}, \quad (20)$$

где  $n_{\text{aq}}$ ,  $n_{\text{cuv}}$  и  $n_{\text{air}}$  – коэффициенты преломления среды, стенки кюветы и воздуха соответственно;  $d_{\text{aq}}$  и  $d_{\text{cuv}}$  – толщины слоя жидкости и стенки кюветы;  $f_{\text{cuv}}$  – фокусное расстояние за кюветой в предположении, что толщины слоя

жидкости и стенки кюветы пренебрежимо малы. Из (20) можно определить, что

$$f_{\text{cuv}} = f_{\text{cuv. meas}} - \Delta f_3, \quad (21)$$

где  $\Delta f_3$  – смещение фокуса из-за слоя жидкости и стенки кюветы. При  $n_{\text{air}} = 1$  из (20) и (21) получим

$$\Delta f_3 = f_{\text{cuv. meas}} - f_{\text{cuv}} = d_{\text{aq}}(n_{\text{aq}} - 1)/n_{\text{aq}} + d_{\text{cuv}}(n_{\text{cuv}} - 1)/n_{\text{cuv}}. \quad (22)$$

Если фокусное расстояние измеряется с помощью микроскопа, то эта поправка не вводится, так как одновременно на такую же величину изменяется видимое расстояние от структуры до микроскопа.

**Погрешности определения рефракций дифракционно-рефракционных ИОЛ.** Как было показано выше, рефракция ИОЛ определяется путем расчета по параметрам или по измеренным фокусным расстояниям. Чтобы оценить, как влияет на точность определения рефракции несоответствие параметров изготовленной ИОЛ заданным значениям, а также точность измерения параметров и фокусных расстояний, вычислим полные дифференциалы  $\Delta\Phi_{0, \text{aq}}$  и  $\Delta\Phi_{1, \text{aq}}$  из (2), (3), (5), (8), (9), (12)–(16):

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{aq}} = (1/R)\Delta n_{\text{IOL}} - (1/R)\Delta n_{\text{aq}} - [(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})/R^2]\Delta R, \quad (2a), (3a)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{air}} \Delta Q - \Phi_{0, \text{air}}^2 Q \Delta f_{0, \text{air}}, \quad (5a)$$

$$\Delta Q = [(n_{\text{aq}} - 1)/(n_{\text{IOL}} - 1)^2]\Delta n_{\text{IOL}} - [1/(n_{\text{IOL}} - 1)]\Delta n_{\text{aq}}, \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{0, \text{aq}} = & -\Phi_{0, \text{air}}^2 Q \Delta f_{0, \text{air}} + \\ & + [\Phi_{0, \text{air}}(n_{\text{aq}} - 1)/(n_{\text{IOL}} - 1)^2]\Delta n_{\text{IOL}} - [\Phi_{0, \text{air}}/(n_{\text{IOL}} - 1)]\Delta n_{\text{aq}}, \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{air}} \Delta Q - (Q/f_{1, \text{air}}^2)\Delta f_{1, \text{air}}, \quad (12a), (13a)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{air}} \Delta Q - (2Q/f_{1, \text{air}}^2)\Delta f_{1, \text{air}} + (Q/f_{2, \text{air}}^2)\Delta f_{2, \text{air}}, \quad (14a)$$

$$\Delta\Phi_{1, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{air}} \Delta Q + [(1 - 2Q)/f_{1, \text{air}}^2]\Delta f_{1, \text{air}} - [(1 - Q)/f_{2, \text{air}}^2]\Delta f_{2, \text{air}}, \quad (15a)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{0, \text{cuv}} = -(1/f_{0, \text{cuv}}^2)\Delta f_{0, \text{cuv}}, \quad (16a')$$

$$\Delta\Phi_{1, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{cuv}} = -(1/f_{1, \text{cuv}}^2)\Delta f_{1, \text{cuv}}. \quad (16a'')$$

В формулах (5a) и (9a) точность определения рефракции для рефракционного компонента гибридной ИОЛ обозначается  $\Delta\Phi_{0, \text{aq}}$ , что равнозначно  $\Delta\Phi_{\text{aq}}$  для обычной рефракционной ИОЛ на основе (5) и (9). Следует заметить, что формулы для определения точности задания и измерения параметров (2a), (3a) и (12a), (13a), получаемые при дифференцировании (2), (3) и (12), (13) соответственно, имеют одинаковый вид. Это объясняется тем, что  $\Phi_d$  – постоянная величина, которая определяется только законом изменения радиусов зон дифракционной структуры и не зависит от окружающей среды.



Формулы (16а') и (16а'') получены из (16) для дальнего и ближнего зрения соответственно.

Заметим, что в формулах (5а) и (12а)–(15а) коэффициенты перед  $\Delta Q$  одинаковые, хотя из (5) и (12)–(15) следует, что их аналитический вид должен быть разным. Для упрощения формул эти и некоторые другие коэффициенты изменены на том основании, что фактически

$$\Phi_{0, \text{air}} = 1/f_{0, \text{air}} = (1/f_{1, \text{air}}) - \Phi_d = (2/f_{1, \text{air}}) - (1/f_{2, \text{air}}).$$

Определим вид формул (2а)–(16а'') и допуски для конкретных исходных параметров ИОЛ:  $R = 8,24$  мм,  $\Phi_d = 4,24$  дптр,  $n_{\text{aq}} = 1,336$  и  $n_{\text{IOL}} = 1,505$ . Вычислим дополнительно номинальные значения величин, которые входят в формулы и являются производными от этих параметров:  $Q = 0,3347$  (8);  $\Phi_{0, \text{aq}} = \Phi_{0, \text{cuv}} = 20,5$  дптр (2), (16);  $\Phi_{1, \text{aq}} = \Phi_{1, \text{cuv}} = 24,74$  дптр (3), (16);  $f_{0, \text{air}} = 16,32$  мм (10);  $\Phi_{0, \text{air}} = 61,25$  дптр (6);  $f_{1, \text{air}} = 15,27$  мм ( $f_{1, \text{air}} = 1/(\Phi_{0, \text{air}} + \Phi_d)$ );  $f_{2, \text{air}} = 14,33$  мм ( $f_{2, \text{air}} = 1/(\Phi_{0, \text{air}} + 2\Phi_d)$ );  $f_{0, \text{cuv}} = 48,78$  мм и  $f_{1, \text{cuv}} = 40,42$  мм (16). Подставляя номинальные значения параметров в (2а)–(16а'') таким образом, чтобы точность измерения  $\Delta f$  и  $\Delta R$  выражалась в миллиметрах, а  $\Delta\Phi$  – в диоптриях, получаем

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{aq}} = 121,36\Delta n_{\text{IOL}} - 121,36\Delta n_{\text{aq}} - 2,49\Delta R, \quad (26), (36)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = 61,25\Delta Q - 1,26\Delta f_{0, \text{air}}, \quad (56)$$

$$\Delta Q = 1,32\Delta n_{\text{IOL}} - 1,98\Delta n_{\text{aq}}, \quad (86)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = -1,26\Delta f_{0, \text{air}} + 80,78\Delta n_{\text{IOL}} - 121,18\Delta n_{\text{aq}}, \quad (96)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{aq}} = 61,25\Delta Q - 1,437\Delta f_{1, \text{air}}, \quad (126), (136)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = 61,25\Delta Q - 2,87\Delta f_{1, \text{air}} + 1,63\Delta f_{2, \text{air}}, \quad (146)$$

$$\Delta\Phi_{1, \text{aq}} = 61,25\Delta Q + 1,42\Delta f_{1, \text{air}} - 3,24\Delta f_{2, \text{air}}, \quad (156)$$

$$\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = \Delta\Phi_{0, \text{cuv}} = -0,42\Delta f_{0, \text{cuv}}, \quad (166')$$

$$\Delta\Phi_{1, \text{aq}} = \Delta\Phi_{1, \text{cuv}} = -0,61\Delta f_{1, \text{cuv}}. \quad (166'')$$

Предположим, что мы хотим иметь значение рефракции ИОЛ с точностью  $\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = 0,1$  дптр, тогда в соответствии с (26), (36), (56) и (126)–(156) радиус кривизны  $R$  и коэффициент пересчета  $Q$  должны быть известны или измерены с точностью  $\Delta R = 0,04$  мм и  $\Delta Q = 0,0016$ . Требуемая точность или допустимые отклонения при измерении показателей преломления:  $\Delta n_{\text{aq}} = 0,0008$  ((26), (86) и (96)),  $\Delta n_{\text{IOL}} = 0,0008$  (26),  $\Delta n_{\text{IOL}} = 0,0012$  ((86), (96)), а при измерении фокусных расстояний:  $\Delta f_{0, \text{air}} = 0,08$  мм ((56), (96)),  $\Delta f_{1, \text{air}} = 0,07$  мм ((126), (156)),  $\Delta f_{1, \text{air}} = 0,035$  мм (146),  $\Delta f_{2, \text{air}} = 0,06$  мм (146),  $\Delta f_{2, \text{air}} = 0,03$  мм (156),  $\Delta f_{0, \text{cuv}} = 0,24$  мм (166'),  $\Delta f_{1, \text{cuv}} = 0,17$  мм (166''). Из приведенных данных видно, что при измерении фокусных расстояний ИОЛ,

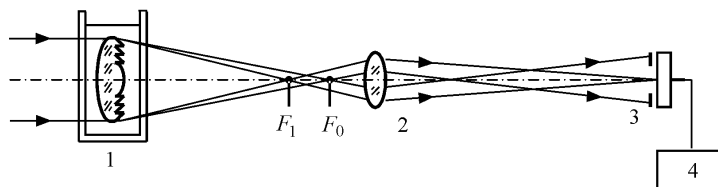


Рис. 2. Схема измерения дифракционной эффективности: 1 – кювета с дистиллированной водой и ИОЛ, 2 – микрообъектив, 3 – фотодиод с диафрагмой, 4 – микроамперметр

помещенных в кювету, допустимые отклонения в несколько раз больше, чем при измерениях в воздухе.

Понятно, что постоянные коэффициенты в формулах будут изменяться в зависимости от рефракции ИОЛ. На примере формул (26) и (56) проанализируем степень этого изменения. Для получения рефракции в области наибольшей востребованности  $\Phi_{0, \text{aq}} = 18\text{--}23$  дптр ( $\Phi_{0, \text{air}} = 53,7\text{--}68,7$  дптр) радиус кривизны сферической поверхности линзы должен изменяться в пределах  $R = 9,38\text{--}7,34$  мм ( $\pm 12\%$ ), а коэффициенты перед  $\Delta n$  и  $\Delta R$  соответственно в пределах  $106,6\text{--}136,2$  ( $\pm 12\%$ ) и  $1,92\text{--}3,14$  ( $\pm 24\%$ ). Положим  $\Delta\Phi_{0, \text{aq}} = 0,1$  дптр, тогда  $\Delta n_{\text{aq}} = \Delta n_{\text{IOL}} = 0,0009\text{--}0,0007$  ( $\pm 12\%$ );  $\Delta R = 0,05\text{--}0,03$  мм ( $\pm 25\%$ ). Для выбранной области рефракций коэффициент перед  $\Delta Q$  будет изменяться в пределах  $53,78\text{--}68,72$  ( $\pm 12\%$ ), а само значение  $\Delta Q$  – в пределах  $0,0019\text{--}0,0015$  ( $\pm 12\%$ ). Расчеты показывают, что для выбранной области рефракций изменение коэффициентов в формулах (26)–(166') и допуски лежат в пределах, не превышающих  $12\text{--}25\%$ , т. е. изменяются незначительно. В заключение отметим, что для расчета рефракции с точностью  $0,1$  дптр цена деления отсчетного устройства при измерении показателей преломления должна быть не более  $0,0005$ , а при измерении фокусных расстояний в воздухе и за кюветой – не более  $0,01\text{--}0,05$  мм и  $0,1$  мм соответственно.

При измерении фокусных расстояний следует обратить внимание на необходимость введения поправок. В противном случае расчетное значение рефракции получится приблизительно на  $0,5\text{--}1,0$  дптр больше, так как в зависимости от условий измерения эти поправки могут быть порядка  $0,6$  мм (в воздухе) и  $1$  мм (в среде). Как следует из расчетов, приведенных выше, поправка имеет существенное значение при измерениях в воздухе.

**Методы и погрешности измерения дифракционной эффективности гибридных ИОЛ.** Наряду с рефракцией второй важной характеристикой гибридной ИОЛ является дифракционная эффективность в 0-м и 1-м порядках дифракции, которая обычно определяется отношением интенсивности дифрагированного пучка света к интенсивности падающего или проходящего пучка. Оптическая схема измерения интенсивностей показана на рис. 2. В общем случае эффективность зависит от формы и глубины профиля дифракционной структуры и от потерь света на рассеяние, поглощение и отражение. Предположим, что потери света малы, а дифракционная структура ИОЛ имеет пилообразную структуру, тогда интенсивность в 0-м ( $I_0$ ) и  $n$ -м ( $I_n$ ) порядках дифракции можно представить в виде [8]

$$I_0 = \left[ \frac{\sin(\varphi_{\text{max}}/2)}{\varphi_{\text{max}}/2} \right]^2, \quad (23)$$

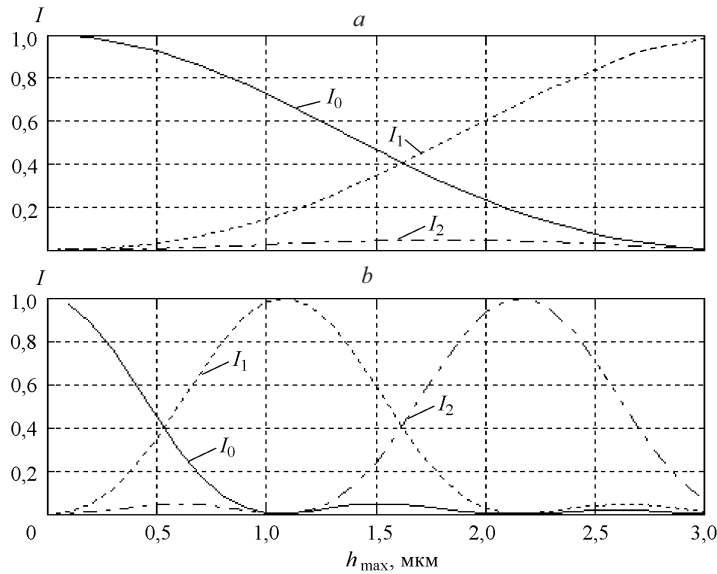


Рис. 3. Графики изменения интенсивностей в 0-м (сплошные), 1-м (пунктирные) и 2-м (штрих-пунктирные кривые) порядках дифракции: в среде (а) и в воздухе (б) в зависимости от высоты профиля  $h_{\max}$  для  $\lambda = 0,5461$  мкм ( $n_{\text{IOL}} = 1,507$ ,  $n_{\text{aq}} = 1,3377$ )

$$I_n = \left[ \frac{\sin(\varphi_{\max}/2)}{(2\pi n - \varphi_{\max})/2} \right]^2, \quad (24)$$

$$\varphi_{\max} = 2\pi h_{\max} (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}) / \lambda, \quad (25)$$

где  $\varphi_{\max}$  и  $h_{\max}$  – максимальные значения фазовой задержки и высоты профиля в пределах одной зоны структуры;  $n$  – порядок дифракции;  $\lambda$  – длина волны. Графики изменения интенсивностей приведены на рис. 3. Из рисунка следует, что в среде при высоте профиля  $h = 1,61$  мкм интенсивности 0-го и 1-го порядков равны (по 40,5 %), а в воздухе 0-й порядок практически исчезает. Это происходит потому, что в воздухе фазовая задержка на структуре становится больше, свет перераспределяется и направляется преимущественно в 1-й и 2-й порядки дифракции (по 40,5 %). Измерение эффективности в воздухе, как и измерение рефракции, удобнее проводить в 1-м и 2-м порядках, а затем пересчитывать результаты на условия среды.

В экспериментальных условиях при исследовании зависимости дифракционной эффективности от высоты профиля  $h_{\max}$  трудно учесть влияние потерь света, в том числе и на дифракцию в высшие порядки. Но так как этот недостаток присущ в одинаковой степени всем порядкам, то его можно избежать, анализируя взаимное соотношение интенсивностей в рабочих порядках. На основании (23)–(25) отношения интенсивностей 0-го и 1-го ( $\eta_{0,1}$ ), а также 1-го и 2-го ( $\eta_{1,2}$ ) порядков дифракции в зависимости от высоты профиля  $h_{\max}$  имеют вид

$$\eta_{0,1} = \frac{I_0}{I_1} = \left[ \frac{\lambda - h_{\max} (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}{h_{\max} (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})} \right]^2 = \left[ \frac{\lambda}{h_{\max} (n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})} - 1 \right]^2, \quad (26)$$

$$\eta_{1,2} = \frac{I_1}{I_2} = \left[ \frac{2\lambda - h_{\max}(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}{\lambda - h_{\max}(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})} \right]^2. \quad (27)$$

В то же время на основании измерения или задания  $\eta_{0,1}$  и  $\eta_{1,2}$  можно определить высоту профиля  $h_{\max}$ . Из (26) и (27) следует, что

$$h_{\max} = \frac{\lambda}{(\sqrt{\eta_{0,1}} + 1)(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}, \quad (28)$$

$$h_{\max} = \frac{(\sqrt{\eta_{1,2}} + 2)\lambda}{(\sqrt{\eta_{1,2}} + 1)(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}. \quad (29)$$

Если полагать, что интенсивности 0-го и 1-го порядков равны между собой, т. е.  $\eta_{0,1} = 1$ , то при  $\lambda = 0,5461$  мкм ( $n_{\text{IOL}} = 1,507$ ,  $n_{\text{aq}} = 1,3377$ ,  $n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}} = 0,1693$ ) получим из (28)  $h_{\max} = 1,61$  мкм, а из (27)  $\eta_{1,2} = 8,98$ . Данное значение длины волны рекомендуется в стандарте. При измерении эффективности в воздухе фазовая задержка на дифракционной структуре на основании (25) увеличивается и приближается к  $2\pi$ . В результате 0-й порядок существенно уменьшается по сравнению с 1-м ( $\eta_{0,1} = 0,11$ ). В этих условиях не имеет смысла измерять  $\eta_{0,1}$ . Удобнее оценивать соответствие высоты профиля расчетному значению по соотношению интенсивностей 1-го и 2-го порядков ( $\eta_{1,2} = 1,04$ ). При отсутствии подходящего источника света измерения эффективности можно проводить на других длинах волн с учетом зависимости показателей преломления от длины волны. В табл. 1 приводятся расчетные значения  $\eta_{0,1}$  и  $\eta_{1,2}$  при измерениях на длинах волн  $\lambda = 0,5461$  и  $\lambda = 0,6330$  мкм (He-Ne-лазер) и  $\lambda = 0,5320$  мкм (твердотельный лазер) для одной и той же высоты профиля дифракционной структуры ( $h_{\max} = 1,61$  мкм). Из таблицы видно, что соотношения интенсивностей существенно зависят от длины волны.

Графики изменения  $\eta_{0,1}$  в среде (26) и  $\eta_{1,2}$  в воздухе (27) для длины волны  $\lambda = 0,5461$  мкм представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что незначительные отклонения  $h_{\max}$  от расчетного значения больше влияют на  $\eta_{1,2}$  в воздухе, чем на  $\eta_{0,1}$  в среде. За кюветой соотношение интенсивностей пучков остается равным  $\eta_{0,1}$ , так как оно формируется до выхода из кюветы и определяется только высотой фазового профиля в среде.

Определим аналитически степень влияния отклонений  $\Delta h_{\max}$  и показателей преломления  $\Delta n_{\text{IOL}}$  и  $\Delta n_{\text{aq}}$  на изменения относительных эффективностей

Т а б л и ц а 1

Параметры				Среда		Воздух	
$\lambda$ , мкм	$n_{\text{IOL}}$	$n_{\text{aq}}$	$n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}$	$\eta_{0,1}$	$\eta_{1,2}$	$\eta_{0,1}$	$\eta_{1,2}$
0,5461	1,5070	1,3377	0,1693	1,00	8,98	0,11	1,04
0,5320	1,5077	1,3387	0,1690	0,91	9,28	0,12	0,75
0,6330	1,5030	1,3348	0,1682	1,79	7,55	0,05	6,65

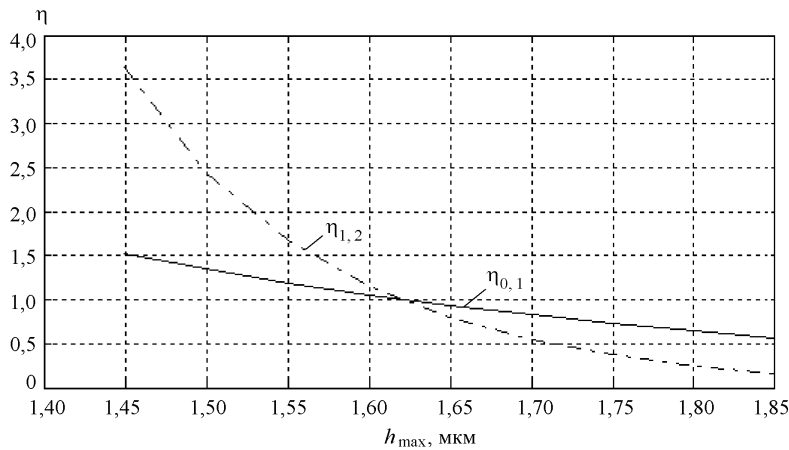


Рис. 4. Графики изменения относительных интенсивностей  $\eta_{0,1}$  в среде (сплошная кривая) и  $\eta_{1,2}$  в воздухе (штрихпунктирная кривая) в зависимости от высоты профиля  $h_{\max}$  для длины волны  $\lambda = 0,5461$  мкм ( $n_{\text{IOL}} = 1,507$ ,  $n_{\text{aq}} = 1,3377$ )

$\Delta\eta_{0,1}$  и  $\Delta\eta_{1,2}$  вблизи расчетного значения глубины профиля  $h_{\max} = 1,61$  мкм. Для этого про дифференцируем (26) и (27):

$$\Delta\eta_{0,1} = a_{0,1} [-\Delta h_{\max}/h_{\max} - \Delta n_{\text{IOL}}/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}) + \Delta n_{\text{aq}}/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})], \quad (30)$$

$$\Delta\eta_{1,2} = a_{1,2} [\Delta h_{\max}/h_{\max} + \Delta n_{\text{IOL}}/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}) - \Delta n_{\text{aq}}/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})], \quad (31)$$

где

$$a_{0,1} = \frac{2\lambda\sqrt{\eta_{0,1}}}{h_{\max}(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}; \quad a_{1,2} = \frac{2\lambda\sqrt{\eta_{1,2}}h_{\max}(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})}{[\lambda - h_{\max}(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})]^2}. \quad (32)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения величин  $a_{0,1}$ ,  $a_{1,2}$ , входящих в соотношения (30) и (31), для трех длин волн при измерении в среде и в воздухе, а в табл. 3 и 4 – значения коэффициентов перед  $\Delta h_{\max}$ ,  $\Delta n_{\text{IOL}}$ ,  $\Delta n_{\text{aq}}$  и допусков  $\Delta h_{\max}$ ,  $\Delta n_{\text{IOL}}$ ,  $\Delta n_{\text{aq}}$  при определении относительных интенсивностей  $\Delta\eta_{0,1}$  в среде и  $\Delta\eta_{1,2}$  в воздухе с точностью 0,1.

Из табл. 3 видно, что при измерении в среде  $\Delta h_{\max} \sim 0,03\text{--}0,04$  мкм и  $\Delta n_{\text{IOL}} = \Delta n_{\text{aq}} \sim 0,003\text{--}0,004$ , если  $\Delta\eta_{0,1} = 0,1$ . В воздухе (см. табл. 4) при  $\Delta\eta_{1,2} = 0,1$  для первых двух длин волн значения  $\Delta h_{\max}$  примерно в 2,5 раза

Т а б л и ц а 2

$\lambda$ , мкм	Среда			Воздух		
	$n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}$	$a_{0,1}$	$a_{1,2}$	$n_{\text{IOL}} - 1$	$a_{0,1}$	$a_{1,2}$
0,5461	0,1693	4,02	11,92	0,5070	0,44	12,47
0,5320	0,1690	3,74	13,06	0,5077	0,45	9,23
0,6330	0,1682	6,25	7,18	0,5030	0,34	84,58

Т а б л и ц а 3

$\lambda$ , мкм	Среда ( $\Delta\eta_{0,1} = 0,1$ )				
	Коэффициенты			Допуски	
	$n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}}$	$a_{0,1}/h_{\text{max}}$	$a_{0,1}/(n_{\text{IOL}} - n_{\text{aq}})$	$\Delta h_{\text{max}}$ , мкм	$\Delta n_{\text{IOL}}, \Delta n_{\text{aq}}$
0,5461	0,1693	2,50	23,74	0,040	0,0042
0,5320	0,1690	2,32	22,13	0,043	0,0045
0,6330	0,1682	3,88	37,16	0,026	0,0027

Т а б л и ц а 4

$\lambda$ , мкм	Воздух ( $\Delta\eta_{1,2} = 0,1$ )				
	Коэффициенты			Допуски	
	$n_{\text{IOL}} - 1$	$a_{1,2}/h_{\text{max}}$	$a_{1,2}/(n_{\text{IOL}} - 1)$	$\Delta h_{\text{max}}$ , мкм	$\Delta n_{\text{IOL}}$
0,5461	0,5070	7,75	24,60	0,013	0,0040
0,5320	0,5077	5,74	18,20	0,017	0,0055
0,6330	0,5030	52,53	168,15	0,002	0,0006

меньше,  $\Delta n_{\text{IOL}}$  приблизительно такие же; для  $\lambda = 0,6330$  мкм  $\Delta h_{\text{max}}$  и  $\Delta n_{\text{IOL}}$  в 13 и 5 раз соответственно меньше, чем для среды при  $\Delta\eta_{0,1} = 0,1$ .

**Заключение.** В представленной работе показано, что методы расчета рефракции на основе измерения фокусного расстояния ИОЛ в воздухе, рекомендуемые ГОСТ для рефракционных ИОЛ, неприменимы к гибридным линзам, так как в воздухе практически отсутствует 0-й порядок дифракции, обеспечивающий зрение вдаль. Рассмотрены возможность и особенности расчета рефракции для ближнего и дальнего зрения на основе измерения фокусных расстояний в воздухе в 1-м и 2-м, а в среде в 0-м и 1-м порядках дифракции. Проведен анализ допустимых погрешностей значений параметров ИОЛ, на основе которых рассчитывается рефракция. Для расчета рефракции с точностью 0,1 дптр радиус кривизны и коэффициент пересчета  $Q$  должны быть известны или измерены с точностью 0,04 мм и 0,0016 соответственно, точность значений показателей преломления должна составлять  $\sim 0,0005$ , а фокусных расстояний при измерении в воздухе 0,01–0,05 мм и за кюветой 0,1 мм. Показано, что в области наибольшей потребности рефракций (18–23 дптр) допуски на точность измерения или задания параметров изменяются в зависимости от значения рефракции не более чем на 12–25%. Из сравнения эффективности гибридных линз в воздухе и среде видно, что в воздухе удобнее оценивать соответствие высоты профиля расчетному значению по отношению интенсивностей в 1-м и 2-м порядках. Для получения относительных интенсивностей с точностью 0,1 отклонения от заданных значений глубины профиля дифракционной структуры и показателей преломления при измерении в среде должны быть меньше или равны 0,03–0,04 мкм и 0,003–0,004 соответственно. При измерении в воздухе допуски на эти отклонения уменьшаются в несколько раз (2,5–13) в зависимости от параметров и



длины волны, на которой проводятся исследования. Следует отметить, что влияние каждого параметра оценивается отдельно. Суммарное отклонение рефракции ИОЛ может быть больше 0,1 дптр, но по ГОСТ оно не должно превышать 0,4 дптр.

Полученные соотношения и выводы использовались при исследовании качества изготовления дифракционно-рефракционных ИОЛ на специальных стендах и на установке для измерения оптических характеристик глаза в ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск). В 2005 г. на базе предприятий «ИнтраОЛ» (г. Новосибирск) и «Репер-НН» (г. Нижний Новгород) была выпущена первая опытная партия дифракционно-рефракционных ИОЛ марки МИОЛ-Аккорд. Линзы изготовлялись на основе матрицы дифракционной структуры, разработанной в ИАиЭ СО РАН. В настоящее время линзы МИОЛ-Аккорд прошли успешные клинические испытания в Новосибирском и других филиалах МНТК «Микрохирургия глаза»: после операции пациенты хорошо видят вдаль и читают без очков. Результаты испытаний направлены в Министерство здравоохранения и социального развития для получения разрешения на применение линз МИОЛ-Аккорд в медицинской практике.

Автор выражает признательность В. П. Коронкевичу за обсуждение работы и полезные замечания и А. Н. Ременному за внимание к работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Исаков И. А. и др.** Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза // Автометрия. 1997. № 6. С. 26.
2. **ISO/DIS 11979-2.** Optics and Optical Instruments – Intraocular Lenses. Pt. 2: Optical Properties and their Methods. 1996.
3. **ГОСТ Р 52038-2003 (ИСО11979-2-99).** Имплантаты офтальмологические. Интраокулярные линзы. Ч. 2. Оптические свойства и методы испытаний. М.: Госстандарт России.
4. **Апенко М. И., Дубовик А. С.** Прикладная оптика. М.: Наука, 1982.
5. **Ленкова Г. А., Мызник М. М.** Исследование качества изображения схематического глаза с гибридной бифокальной интраокулярной линзой в зависимости от диаметра зрачка // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 61.
6. **Ленкова Г. А.** Оптические характеристики интраокулярных линз в воздухе, воде и кювете // Автометрия. 1997. № 3. С. 35.
7. **Бегунов Б. Н.** Геометрическая оптика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961.
8. **Ленкова Г. А.** Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // Автометрия. 1995. № 5. С. 16.

*Поступила в редакцию 23 июня 2006 г.*