

УДК 535.241; 617.758.1; 681.7.065

**В. В. Петров¹, Н. М. Сергиенко², С. А. Рыков³, Е. Е. Антонов¹,
С. М. Шанойло¹, М. В. Шевколенко³**

¹Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

²Киевская медицинская академия последипломного образования им. П.Л. Шупика
ул. Дорогожицкая, 9, 04112 Киев, Украина

³Киевская городская клиническая офтальмологическая больница
«Центр микрохирургии глаза»
проспект Комарова, 3, 03680 Киев, Украина

Технология изготовления и методика применения в офтальмологии микропризменных элементов Френеля

Проведен анализ оптических характеристик микропризменных элементов Френеля. Исследованы особенности технологии изготовления и методики применения таких элементов в офтальмологии. Предложены методы контроля качества оптических поверхностей на основе анализа дифракционных эффектов. Разработаны методики измерения величины содружественного косоглазия модифицированными призмами Френеля.

Ключевые слова: микропризменный элемент Френеля, коэффициент потерь излучения, технология изготовления, дифракционные явления, содружественное косоглазие.

Выбор метода лечения косоглазия, характер и дозирование хирургического вмешательства с целью его исправления, а также оценка результатов эффективности как консервативного, так и хирургического лечения разных видов косоглазия, в большей мере зависит от точности измерения величины угла косоглазия. Популярными методами измерения угла косоглазия — страбометрии — являются методы с использованием призм, однако они требуют наличия наборов призм или призменных приспособлений с достаточным диапазоном измерений. Стеклопленочные призмы или микропризмы на гибких прозрачных пленках [1] по разным причинам не очень удобны для такой диагностики, поэтому был разработан диагностический набор оптических компенсаторов косоглазия КК-42 для измерения угла косоглазия на основе модифицированных призм Френеля [2, 3]. Целью разработки являлось повышение точности измерения угла содружественного косоглазия и обеспечение удобства диагностики.

© В. В. Петров, Н. М. Сергиенко, С. А. Рыков, Е. Е. Антонов, С. М. Шанойло, М. В. Шевколенко

ные для офтальмологов, соответствуют углам преломления $\alpha_0 = 0^\circ 29' 23'' - 32^\circ 55' 37''$. Для полиметилметакрилата ($n_1 = 1,492$) этот диапазон углов преломления микропризм α_0 составляет $0^\circ 34' 56'' - 36^\circ 48' 38''$.

Теоретические основы и методы изготовления микропризмных световозвращателей и элементов Френеля практически одинаковые. Разница состоит лишь в том, что в первом случае главной целью является достижение максимально возможного коэффициента световозвращения $R(\varphi_0)$, а в другом необходимо обеспечить смещение луча света на строго определенный угол γ с максимально качественным изображением при минимальных потерях светового потока.

Величину потерь излучения можно оценить следующим образом. Поток света, который проходит через зону микропризмы BG (рис. 1), испытывает полное внутреннее отражение от боковой грани BC и рассеивается внутри призмы. Соответствующий коэффициент k_1 потерь за счет экранирования части потока боковой гранью микропризмы (так называемое «виньетирование») можно определить [5] как отношение отраженного потока Φ_1 (зона BG) ко всему падающему на призму потоку Φ_0 (зона AB):

$$k_1 = \Phi_1 / \Phi_0 = (\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta) / (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta). \quad (2)$$

Коэффициент потерь излучения k_2 , связанный с внутренним отражением светового потока AG от преломляющей грани AC микропризмы, в зависимости от угла α , определяется с использованием формул Френеля [6], которые с учетом (1) можно записать таким образом:

$$k_2 = 0,5 \{ \operatorname{tg}^2(\gamma) / \operatorname{tg}^2(2\alpha + \gamma) + \sin^2(\gamma) / \sin^2(2\alpha + \gamma) \}. \quad (3)$$

Наконец, для расчетов дополнительных потерь излучения, связанных с прямым отражением светового потока Φ_0 от внешней поверхности микропризмы AB , применимы приближенные формулы Френеля [6] для нормального падения лучей:

$$k_3 = \{ (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2) \}^2. \quad (4)$$

Например, для поликарбоната ($n_1 = 1,585$) в воздухе ($n_2 = 1,0$) коэффициент k_3 для одной отражающей грани составляет 5,12 %; для полиуретана ($n_1 = 1,50$) значение $k_3 = 4,00$ %; для полиметилметакрилата ($n_1 = 1,492$) величина $k_3 = 3,90$ %.

При расчетах суммарных потерь излучения в микропризмах рассчитывался суммарный прошедший поток $\Phi_C = \Phi_0(1 - k_1)(1 - k_2)(1 - k_3)$ с учетом всех трех коэффициентов потерь k_1 , k_2 и k_3 . При этом полагалось, что потери света на поглощение излучения внутри материала микропризм несущественны, что полностью оправдано в рассматриваемых условиях. Зависимость от преломляющего угла α величины суммарных потерь светового потока $k_C = (\Phi_0 - \Phi_C) / \Phi_0$ в микропризме приведена на рис. 2 для нескольких значений обратного угла β , которые в случае изготовления матриц-оригиналов методом «алмазного» резания [5], в основном определяются углом заточки режущего инструмента.

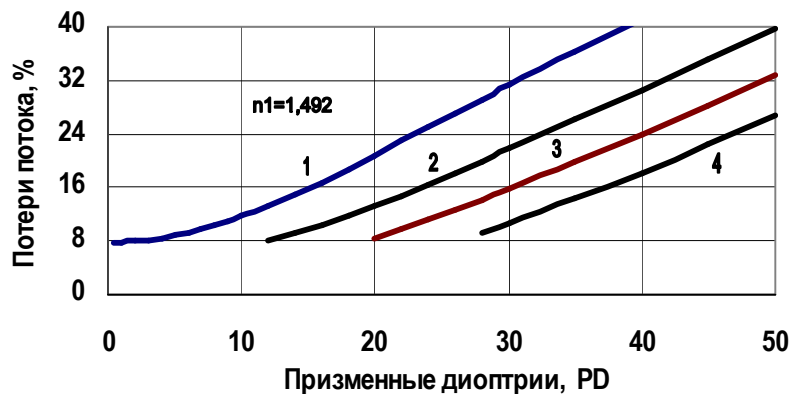


Рис. 2. Суммарные потери светового потока в случае изготовления элемента Френеля из полиметилметакрилата ($n_1 = 1,492$):

1 — угол заточки резца $\zeta = 90^\circ$; 2 — $\zeta = 79,1^\circ$; 3 — $\zeta = 69,6^\circ$; 4 — $\zeta = 63,6^\circ$

Из полученных данных следует, что коэффициенты потерь k_2 и k_3 мало меняются при изменении углов α и β . В то же время, величина коэффициента потерь k_1 сильно зависит от значения угла β , причем для $k_1 > 10-15\%$ наблюдается заметное затемнение оптической картины при рассмотрении внешних объектов через микропризму, что также приводит к снижению регистрируемой остроты зрения пациента из-за недостаточного освещения объекта. Если же задать предельные потери светового потока k_1 на уровне 5 %, то микрорельеф на подложке необходимо формировать с помощью алмазных резцов с четырьмя значениями углов резания $\theta = 90,0^\circ, 77,14741^\circ, 69,59239^\circ$ и $63,56659^\circ$. Эти данные и приведены на рис. 2. При этом обратный угол микропризмы β оказывается меньше $6,0^\circ$. Полученные значения суммарных потерь необходимо учитывать при проектировании практических микропризмных устройств смещения изображений.

Конструкция и технология изготовления призмных компенсаторов косоглазия

Конструктивно микропризмный элемент Френеля состоит из плоской прозрачной жесткой пластинки с микрорельефом и защитного стекла, устанавливаемые в специальный корпус круглой формы с ручкой-держателем, на которой маркированы направление и величина призматического действия. Плоское защитное стекло из поликарбоната располагается со стороны микрорельефа и служит для защиты от внешних загрязнений и повреждений в процессе эксплуатации. Корпус элемента Френеля по своим габаритам соответствует конструктивным особенностям пробной очковой оправы. Пластика с микрорельефом и защитное стекло вакуумно плотно соединяются с корпусом при помощи ультразвуковой сварки или термической вальцовки.

Диагностический набор призмных компенсаторов косоглазия КК-42 состоит из 42-х микропризмных элементов (21 на каждый глаз), призматическое действие которых имеет значения от 0,5 до 30 PD. В диапазоне 1,0–10 PD дискет-

ный шаг составляет 1,0 PD, в диапазоне 10–30 PD шаг увеличен до 2,0 PD. Набор КК-42 позволяет измерять угол девиации до 60 PD (по 30 PD на каждый глаз).

Технологический цикл изготовления микропризмных элементов начинается с изготовления матрицы-оригинала. Микрорельеф необходимого профиля создается на заготовке из особо прочного алюминия на специальном станке с помощью алмазного резца. Типовой шаг микрорельефа W_0 составляет 400 мкм. Режущая грань резца затачивается предварительно под необходимым углом θ . Держатель резца обеспечивает установку резца под заданными углами наклона к предварительно спланированной поверхности заготовки в диапазоне от 45 до 65° в плоскости, перпендикулярной направлению резания микропризмной структуры Френеля. С помощью лазерной системы регулирования необходимый угол наклона резца с выбранным углом заточки режущей грани устанавливается с ошибкой не больше 20 угловых секунд.

Далее в управляющую ЭВМ вводят данные о величине линейного перемещения стола, периоде микропризмной структуры, размере рабочей зоны, глубине подачи резца при одном проходе, количестве проходов резца. После этого компьютер по заданной программе включает приводы перемещения позиционера, стола линейного перемещения заготовки, подачи резца, системы подвода смазочно-охлаждающей жидкости и таким образом осуществляет процесс формирования микрорельефа.

Конечные микропризмные изделия изготавливаются методом термопрессования из плоских заготовок, сделанных из поликарбоната или полиметилметакрилата толщиной 1,5–2,0 мм, с использованием матрицы-оригинала. В процессе термопрессования осуществляется тщательный контроль всех основных параметров (температура заготовки, давление и время прессования, время охлаждения образца, температура и ток нагрева матрицы, скорость потока охлаждающей жидкости).

Технология позволяет, конечно, и формирование микропризмного рельефа на гибкой прозрачной пленке необходимой толщины для установки элемента с микрорельефом непосредственно на обычные лечебные очки. Однако, использование для диагностики косоглазия набора микропризм КК-42 является более удобным, по сравнению с применяемыми ранее гибкими френелевскими призмами [7]. В процессе эксплуатации гибких призм Френеля поверхность с микропризмным рельефом непосредственно контактирует с окружающей средой и не защищена от загрязнений, вследствие чего ухудшается прозрачность элементов и точность измерений угла косоглазия из-за рассеивания луча света. Эластический материал, из которого изготовлена такая призма, в результате деформации пластины постоянно поддается оптическим аберрациям. Преимуществом диагностического набора КК-42 является полная герметичность микропризмных элементов, так как рельеф располагается внутри оптического компенсатора косоглазия и защищен специальной защитной пластиной из поликарбоната толщиной 0,6 мм [3]. Микропризмный растр не контактирует с окружающей средой, не подвергается загрязнениям и оптическим аберрациям.

Контроль оптических параметров микропризменных элементов

Основным требованием для элементов Френеля является обеспечение строго заданной величины отклонения луча, высокого светопропускания, создание четкого и контрастного изображения. В частности, значение призматической силы микропризмы должно соответствовать номинальному значению с точностью $\pm 0,05 PD$ в диапазоне $0,5-5,0 PD$; $\pm 0,10 PD$ в диапазоне $5-15 PD$ и $\pm 0,15 PD$ в диапазоне $15-30 PD$. При этом суммарный коэффициент пропускания должен быть не меньше 80 %.

Качество готовых изделий контролируется визуально с использованием микроскопов и автоколлимационными методами [1]. Оптическая сила элементов определяется на специальном стенде с помощью гелий-неонового лазера. Принцип работы стенда основан на том факте, что отклонение на экране луча лазера $\Delta = 1$ см на расстоянии до экрана $L_{\Delta} = 1$ м соответствует изменению оптической силы микропризменного элемента на одну призматическую диоптрию. До начала измерений с помощью фотодиода, усилителя и измерительного вольтметра устанавливается нулевое значение измеряемого сигнала в положении, соответствующем нулевому углу отклонения луча. Затем в специальную оправу устанавливается измеряемый образец и по максимуму регистрируемого сигнала определяется величина смещения пятна на экране относительно начального нулевого положения. Величина отклонения луча лазера от нулевого положения однозначно определяет величину призматического действия микропризменной структуры Френеля. Образцы, не соответствующие по величине своей оптической силы установленным допускам, отбраковываются.

Для контроля качества рабочих поверхностей элементов Френеля удобно использовать метод диагностики на основе анализа дифракционной картины, которая возникает при прохождении луча лазера через прозрачную микропризменную структуру. Вследствие наличия рельефа с шагом W_0 и глубиной L_0 равномерно распределенный начальный поток Φ_0 после прохождения через микропризму и поворота на угол γ преобразуется в систему светлых и темных полос, соответствующих зонам пропускания и отражения света (см. рис. 1). Поэтому микропризменная структура Френеля фактически является дифракционной решеткой, работающей в проходящих пучках света. Ширину светлой полосы S_0 по аналогии с дифракционной решеткой будем называть эффективной апертурой микропризмы, а шаг рельефа W_0 , равный сумме светлой и темной полос, является аналогом периода решетки D_0 . Понятно, что в зависимости от угла наблюдения φ возникает дополнительная разность хода лучей AA^1 и CC^1 , и на экране в плоскости CF будет наблюдаться интерференционная картина. Сравнивая реально наблюдаемые зоны расположения интерференционных максимумов и их количество с теоретическими данными, можно сделать определенные выводы о качестве поверхностей микропризм.

Для практического рассмотрения явлений дифракции при прохождении пучка света через микрорельеф можно использовать упрощенную модель, в которой световая волна считается плоской. Как и раньше будем считать, что поглощение потока в материале микропризменного элемента несущественно. Будем также считать, что начальная разность хода интерферируемых лучей $\Delta = (AA^1 - CC^1)$ для

угла $\varphi = 0^\circ$ может быть учтена простым поворотом системы координат на угол γ , который легко определить из закона инвариантности излучения Снеллиуса [4]. В новой системе координат направление распространения пучка света вдоль луча γ будет соответствовать углу дифракции $\varphi = 0^\circ$. Тогда, с учетом сделанных упрощений для описания интерференционных явлений, можно использовать известные формулы для плоской дифракционной решетки [6]:

$$I = I_0 (\sin A \sin NB) \cdot (A \cdot \sin B)^{-1}, \quad (5)$$

где $A = (\pi S / \lambda) \sin \varphi$; $B = (\pi D / \lambda) \sin \varphi$; I_0 — амплитуда светового потока от одной щели дифракционной решетки в направлении $\varphi = 0$; λ — длина волны рассматриваемого излучения; D — период решетки; S — ширина одной щели; N — число щелей в решетке.

В направлении γ (рис. 1) эффективный период решетки $D_1 = D_0 \cos \gamma = W \cos \gamma$, а ширина светлой зоны (эффективная апертура) S_1 , которая является аналогом величины S в формуле (5), для случая $\beta = 0$ равна:

$$S_1 = D_0 \cos \gamma - L_0 \sin \gamma = D_0 (\cos \gamma - \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma). \quad (6)$$

При использовании для диагностики излучения гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм, множители A и B в формуле (5) приобретают такой вид:

$$A = (\pi D_0 (\cos \gamma - \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma) / 0,6328) \sin \varphi, \\ B = (\pi W \cos \gamma / 0,6328) \sin \varphi. \quad (7)$$

Величина N в нашем случае имеет смысл размера площадки микрорельефа, которая освещается лучом лазера, и ее величина зависит от диаметра D_S луча лазера, используемого для диагностики. При расчетах в большинстве случаев значение $N = 4$, что при типовом значении $D_0 = 400$ мкм соответствует диаметру луча $D_S = 1,6$ мм.

Результаты расчетов согласно (5)–(7) интерференционной картины, которая возникает на экране после прохождения луча лазера через микропризмный рельеф, приведены на рис. 3–6. Для удобства углы дифракции пересчитаны непосредственно в расстояния от положения «нулевого» главного максимума, учитывая, что для шага микрорельефа $D_0 = 400$ мкм и расстояния до экрана $L_\ominus = 1,0$ м, расстояние 1,0 мм соответствует изменению оптической силы микропризмы на $0,1 PD$.

Главной особенностью является то, что в случае дифракции света на микропризмном элементе Френеля ширина светлой зоны S_1 практически совпадает с шагом микрорельефа $D_1 \approx S_1$, поэтому в структуре при экспериментальном наблюдении дифракции должен наблюдаться только один центральный интерференционный максимум (см. рис. 3).

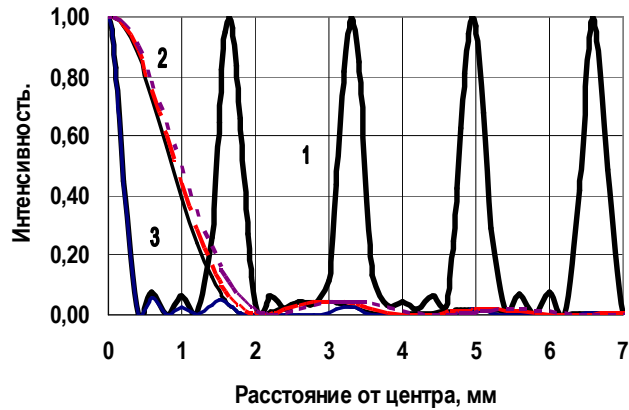


Рис. 3. Дифракционные эффекты для микропризмы $PD = 30$: 1 — интерференционная картина для случая $N = 4$; 2 — дифракционная картина от одной щели для трех значений β (0, 6, 15°); 3 — интегральная дифракционная картина для угла $\beta = 0$

Было установлено, что даже для максимального значения преломляющего угла призмы $\alpha = 28^{\circ}16'38''$ ($PD = 30$) изменение обратного угла β существенно не влияет на характер расположения дифракционных максимумов и их количество (рис. 4). Для меньших значений призматического действия эта зависимость практически отсутствует. Поэтому единственным следствием увеличения обратного угла β является рост потерь светового потока вследствие «виньетирования» и увеличение коэффициента потерь k_1 . При рассмотрении влияния обратного угла призмы β на характер интерференционной картины вычислялись изменения относительных размеров светлой зоны S_1 (отрезок FC на рис. 1) в зависимости от угла β .

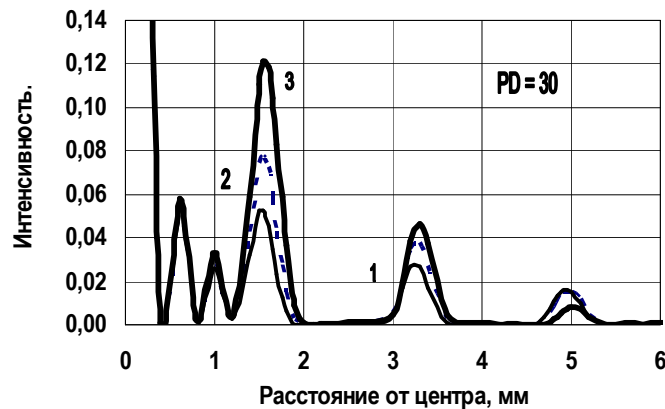


Рис. 4. Влияние обратного угла микропризмы β на характер интерференционной картины для микропризмы $PD = 30$ (число щелей $N = 4$): 1 — $\beta = 0^{\circ}$; 2 — $\beta = 6^{\circ}$; 3 — $\beta = 15^{\circ}$.

Увеличение числа N до 6–8, что для случая $D_0 = 400$ мкм соответствует увеличению диаметра сканирующего луча лазера до 2,4–3,2 мм, приводит к сужению дифракционных пиков и к соответствующему исчезновению интерференционных дополнительных максимумов, вследствие чего интегральная картина оказывается более резкой.

Экспериментальные исследования оптических свойств изготовленных микропризмных структур осуществлялись с помощью одномодового гелий-неонового лазера с лучом диаметром $D_S = 4,0$ мм. В частности, на рис. 5 приведены экспериментальные данные по распределению интенсивности на экране для микропризмы с призматическим действием $PD = 6,0$, которая была изготовлена в начале работ без соответствующей коррекции угла заточки резца и в не оптимальных условиях термопрессования. На графике реального спектрального распределения интенсивности (кривая 1), который получен с узкой регистрирующей щелью (ширина щели $S_p = 140$ мкм, т.е. одного порядка с характерным размером спектральных полос на экране), можно четко видеть дополнительные, по сравнению с теоретическими данными, максимумы и минимумы интенсивности, так называемые духи Роуланда [6]. Это свидетельствует о наличии дефектов оптических поверхностей микропризмы. Визуально, при рассмотрении внешних объектов через микропризму, это проявляется в ухудшении качества изображения, уменьшении его четкости и контрастности, что является главной причиной регистрируемого снижения остроты зрения пациента при диагностике косоглазия.

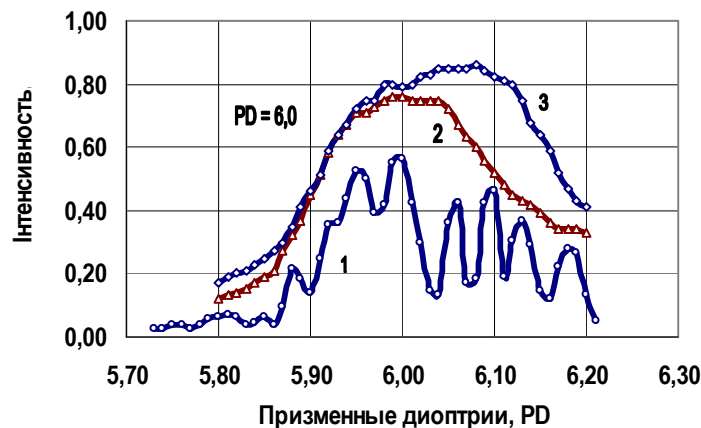


Рис. 5. Экспериментальные данные для микропризмы $PD = 6,0$:

1 — ширина регистрирующей щели $S_p = 130$ мкм; 2 — $S_p = 1500$ мкм; 3 — $S_p = 2800$ мкм

В то же время, картина распределения интегральной интенсивности излучения, полученная с использованием широкой сканирующей щели (кривая 3, величина $S_p = 2800$ мкм, которая существенно превышает характерный размер полос), свидетельствует о соответствии величины призматического действия рассматриваемой микропризмы $PD = 6,0$ техническим требованиям.

На рис. 6 приведены экспериментальные данные для другой микропризмной структуры ($PD = 20,0$), для которой была проведена соответствующая коррекция угла заточки резца и условий термопрессования. Картина распределения интенсивности на экране (кривая 1, узкая регистрирующая щель) практически совпадает с теоретическими расчетами. Четко выделен один центральный максимум ($n = 0$), и наблюдаются еще два небольших боковых максимума ($n = \pm 1$) первого порядка. В случае регистрации интегральной интенсивности (кривая 2, широкая щель) характер ее зависимости от угла наблюдения свидетельствует о соот-

ветствии величины призматического действия этой микропризмы техническим требованиям.

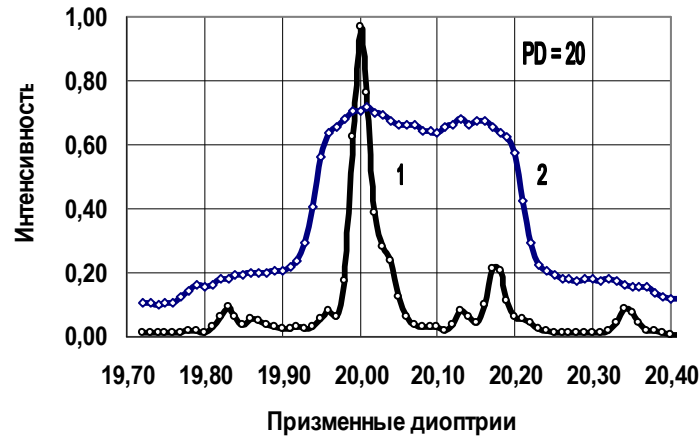


Рис. 6. Экспериментальные данные для микропризмы $PD = 20,0$:
1 — ширина регистрирующей щели $S_p = 140$ мкм; 2 — $S_p = 2800$ мкм

Таким образом, сравнение экспериментально полученного распределения интенсивности лазерного луча после его прохождения через микрорельеф с расчетными данными относительно зон расположения интерференционных максимумов и их количества дает возможность оценить качество оптических поверхностей микрорельефа.

Методика измерения угла содружественного косоглазия

Для страбометрии в пробную очковую оправу устанавливались призмы Френеля и при необходимости линзы для коррекции аметропии. Призмы устанавливались таким образом, чтобы треугольный индекс маркировки, указывающий направление действия, был противоположным направлению девиации: при эзотропии — направленный темпорально, при экзотропии — назально; в случаях гипертропии — книзу, а при гипотропии — вверх. При комбинированном горизонтальном и вертикальном отклонении косящего глаза измерялся горизонтальный компонент девиации, а после этого, не снимая призм, компенсирующих горизонтальную девиацию, регистрировался вертикальный компонент путем установки дополнительных призм вертикального действия.

Применяются разные методики измерения угла косоглазия призмами в зависимости от клинических особенностей косоглазия.

I. Одновременный тест с призмами и прикрытием глаза (simultaneous prism cover test) [8]. Алгоритм этого теста представлен на рис. 7.

Угол косоглазия оценивается методом Гиршберга. Призма, необходимая для нейтрализации девиации, устанавливается на 2–3 секунды перед косящим глазом одновременно с прикрытием окклюдором фиксирующего глаза. Если на косящем глазе наблюдаются рефлексационные движения, это означает, что компенсация угла косоглазия не достигнута. Тогда призма и окклюдор одновременно удаляются на несколько секунд для возобновления бинокулярной фузии. После замены

призмы на более сильную этот процесс повторяется до прекращения установочных движений на косящем глазе при прикрытии фиксирующего глаза. Сила призмы, с помощью которой устраняются рефлексационные движения, определяет величину девиации. Измеренная таким методом девиация соответствует величине явной девиации (гетеротропии), без учета латентной гетерофории.

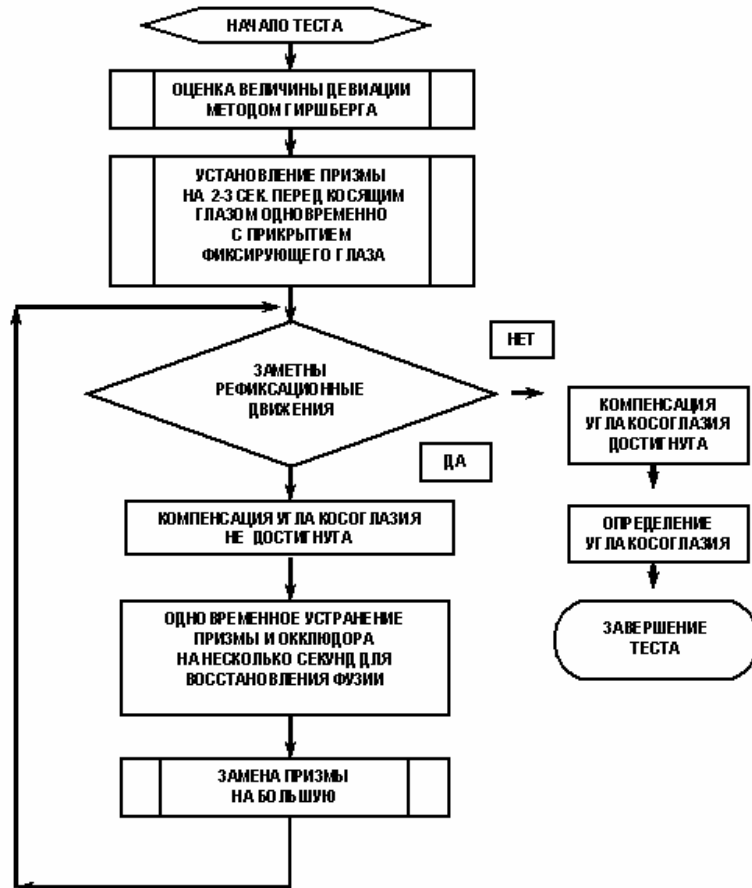


Рис. 7. Алгоритм одновременного теста

II. Альтернирующий тест с призмами и прикрытием глаза (prism alternate cover test) [8]. Алгоритм этого теста представлен на рис. 8.

Альтернирующий тест с призмами и прикрытием позволяет определить общую девиацию — явную и латентную (гетеротропию и гетерофорию). Согласно этому методу перед одним глазом устанавливаются призмы возрастающей силы, направление действия которых противоположно отклонению глаза, и поочередно прикрываются оба глаза для определения наличия рефлексационных движений. Если такие установочные движения присутствуют, призмы меняются (увеличиваются или уменьшаются) для полной нейтрализации девиации. Сила призм может распределяться произвольно между двумя глазами. Альтернирующую окклю-

зию продолжают проводить до момента нейтрализации установочных движений. Сила призмы, нейтрализующая движения глаз, определяет величину угла косоглазия.

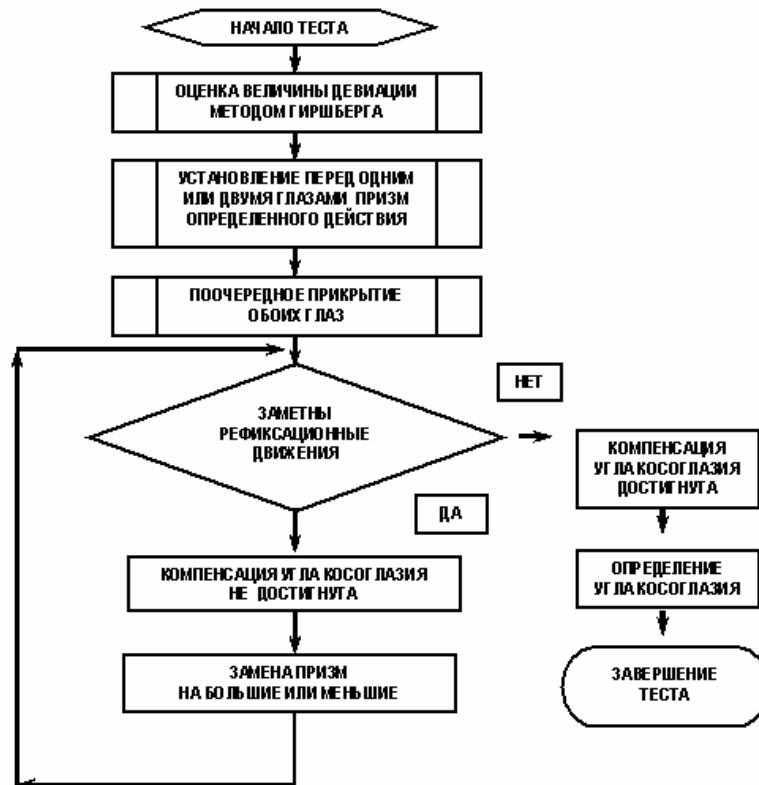


Рис. 8. Алгоритм альтернирующего теста

Страбометрия призмами является достаточно точной, так как основывается на нейтрализации (компенсации) угла девиации в естественных условиях, физиологической основой которой является направление обоих фовеол на один объект фиксации [8]. Диагностическим критерием компенсации угла косоглазия призмами является прекращение рефлексационных движений глаз при проведении теста прикрытия.

Отметим, что точное значение призматического действия реализуется только при строго нормальном падении луча на образующую поверхность микропризменной структуры (со стороны, обратной рельефу). Использование же при диагностике микропризменных элементов в пробной оправе, вместо толстых и тяжелых стеклянных призм, позволяет легко обеспечить строго нормальное расположение микропризмы относительно направления зрительной оси и тем самым повысить достоверность диагностики

В ходе проведенных исследований было установлено, что процедура страбометрии с помощью разработанного диагностического набора КК-42 проста, занимает мало времени (2–3 минуты), пригодна для обследования детей дошкольного

возраста и может быть использована при профосмотрах, обследованиях детей в домашних условиях, а также в офтальмологических кабинетах поликлиник.

Выводы

Проведен анализ оптических характеристик микропризмных элементов Френеля. Исследованы особенности конструирования и технологии изготовления таких элементов.

Разработан метод диагностики качества рабочих поверхностей элементов, основанный на анализе дифракционной картины, возникающей при прохождении луча лазера через периодическую микропризмную структуру.

Предложена методика применения микропризмных элементов Френеля для диагностики и лечения дефектов зрения в практической офтальмологии. Страбометрия с помощью модифицированных призм Френеля позволяет с достаточной точностью, при ошибке $\pm 2,0 PD$ (1°), измерять углы девиации до $60 PD$ (30°) у детей в возрасте 3-х лет и старше при офтальмологических обследованиях.

1. Урмахер Л.С. Оптические средства коррекции зрения / Л.С. Урмахер, Л.И. Айзенштат. — М.: Медицина, 1990. — 256 с.
2. Патент 18152 України А61В3 /08. Пристрій для вимірювання кута косоокості / Сергієнко М.М., Петров В.В., Риков С.О., Шанойло С.М., Шевколенко М.В., Крючин А.А.: заявник Київська міська клінічна лікарня «Центр мікрохірургії ока». — № u200607554; Заявл.07.07.2006; Опубл.16.10.2006; Бюл № 10.
3. Патент 25549 України, А61В 3/08. Пристрій для діагностики косоокості / Петров В.В., Сергієнко М.М., Риков С.О., Шанойло С.М., Шевколенко М.В., Крючин А.А., Антонов Є.Є: заявник ІПРІ НАН України. — № u200704035, Заявл.12.04.2007; Опубл.10.08.2007; Бюл. № 12.
4. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
5. Світлоповертання: проблеми та досягнення / В.В. Петров, С.М. Шанойло, Є.Є. Антонов [та ін.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 3–15.
6. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. — 928 с.
7. Применение призматических линз в офтальмологии / Т.П. Кащенко, С.Г. Чернышова, Ю.З. Розенблюм [и др.] // Вестник оптометрии. — 2005. — № 1. — С. 33–27.
8. Wright K.W. Handbook of Pediatric Strabismus and Amblyopia / K.W. Wright, P.H. Spigel, L.S. Thompson // Springer Science+Business Media, Inc. — 2006. — P. 143–160.

Поступила в редакцию 16.07.2008