

УДК 1612.841/.844:611.84:620.171.51.001.5:616-07



ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЭКСТРАОКУЛЯРНЫХ МЫШЦ

М.Л. Кочина¹, В.Г. Калиманов²

^{1,2} Харьковский национальный медицинский университет, г.Харьков, Украина, m_kochina@yahoo.com

Представлена модель напряженно-деформированного состояния глаза и результаты расчета внутренних напряжений, возникающих в роговице под действием экстраокулярных мышц и внутриглазного давления. Рассмотрены различные варианты изменения интерференционных картин глаз при патологии экстраокулярных мышц.

ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ, ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, КОСОГЛАЗИЕ, ЭКСТРАОКУЛЯРНЫЕ МЫШЦЫ, ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА

Введение

Роговица живого глаза обладает оптической анизотропией, обусловленной целым рядом факторов. Это состав и строение вещества роговицы, ее форма, механические воздействия со стороны экстраокулярных мышц (ЭОМ) и внутриглазного давления (ВГД) [1,2,3]. При освещении роговицы живого глаза поляризованным светом на ней наблюдается интерференционная картина, состоящая из темного креста по центру (изоклина) и фигуры в форме ромба по периферии. Интерференционный ромб образован набором цветных полос, называемых изохромами. На основании большого количества исследований установлено, что цветовой состав картины изохром обусловлен пигментацией радужной оболочки глаза. На рис. 1 представлены фотография и схема интерференционной картины здорового глаза.

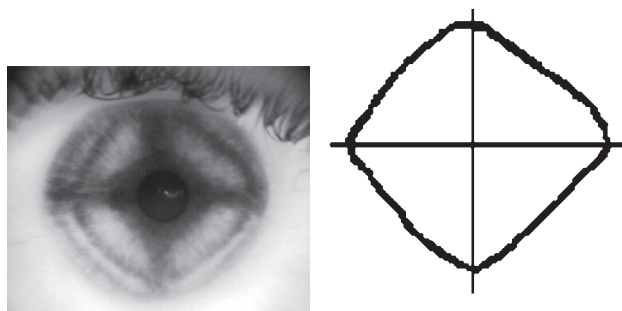


Рис.1. Фотография и схема интерференционной картины нормального глаза

Использование поляризованного света позволяет исследовать физическую природу оптической анизотропии роговицы живого глаза и установить вклад каждого из действующих факторов в формирование интерференционной картины, наблюдаемой на ней. Внутриглазное давление растягивает роговицу, действуя на каждую ее точку с одинаковой силой. Однако внутренние напряжения, возникающие в ней в разных точках, будут различны, что обусловлено градиентом толщины роговицы (в центре она тоньше, чем по периферии). Усилия прямых ЭОМ, приложенные к склере в области

главных меридианов, растягивают роговицу, также создавая в ней внутренние напряжения. В каждой точке роговицы возникают суммарные напряжения, обусловленные суперпозицией напряжений от действия ЭОМ и ВГД. Усилия косых ЭОМ приложены за экватором глаза и вклад в напряженное состояние роговицы не вносят.

Достаточно распространенной патологией детского возраста является косоглазие [4]. Термином «косоглазие» объединяют различные по происхождению и топике поражения зрительной и глазодвигательной систем, вызывающие периодическое или постоянное отклонение зрительной оси одного из глаз от точки фиксации. По данным разных авторов явным косоглазием страдают 1,5–2,0 % детей. В структуре детской глазной патологии косоглазие занимает второе место после аномалий рефракции, удельный вес его составляет 25,62% случаев, частота – 3,92 на 1000 [4,5].

Косоглазие может быть явным и скрытым (гетерофория). Явное косоглазие проявляется отклонением одного или обоих глаз от точки фиксации. Скрытое косоглазие в нормальных условиях не проявляется, глаза стоят симметрично, однако, оно может проявиться, например, при резком снижении зрения одного из глаз (заболевания или травма) и при значительной зрительной нагрузке. На рис. 2 представлена упрощенная классификация видов косоглазия в зависимости от причин его возникновения.

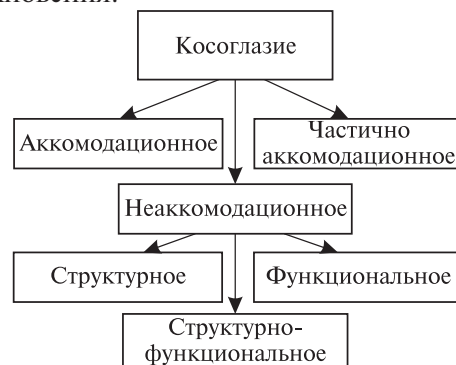


Рис. 2. Упрощенная классификация видов косоглазия в зависимости от причин его возникновения

Аккомодационное косоглазие обусловлено аномалиями рефракции и может быть устранено с помощью оптимальной очковой коррекции. Частично аккомодационное косоглазие, кроме рефракционного, может иметь и мышечный компонент, поэтому, во многих случаях, коррекцией полностью не устраняется. Аккомодационное косоглазие появляется обычно у детей не ранее, чем в 2-3 летнем возрасте. При одностороннем аккомодационном косоглазии имеется большая дальнорезкость или анизометропия, при альтернирующем — обычно высокая гиперметропия, почти одинаковая на обоих глазах, достаточно часто встречается гиперметропический астигматизм. Хирургическое лечение не показано [4, 5].

Наибольший интерес для нас представляет неаккомодационное косоглазие, поскольку причины его возникновения связаны с состоянием ЭОМ. Причиной неаккомодационного косоглазия и гетерофории является патология ЭОМ, которая может быть обусловлена структурными, функциональными или структурно-функциональными причинами. При неаккомодационном косоглазии отклонение глаза не исчезает под влиянием атропинизации и постоянного ношения очков. Косоглазие появляется рано: или сразу после рождения ребенка, или в первый год жизни. Аномалия рефракции мало выражена, обычно это слабая гиперметропия или эметропия. Косоглазие этого типа плохо поддается консервативному лечению. Исследования ряда авторов показали, что аккомодационное косоглазие на первом году жизни возникло у 7% детей, тогда как в более старшем возрасте оно составило 26,1% — 29,3% от общего количества косоглазия, пик возникновения аккомодационного косоглазия приходится на 3-й — 4-й год жизни, тогда как неаккомодационное косоглазие, возникшее сразу после рождения и на первом году жизни, составляет по данным разных авторов от 42,8% до 65% от общего количества больных [4, 5].

Структурное косоглазие обусловлено аномалиями прикрепления ЭОМ. Эти аномалии могут проявляться смещением места прикрепления мышцы или группы мышц как вдоль линии их действия (что эквивалентно усилению или ослаблению силы действия мышц), так и в сторону от линии действия. Во втором случае мышцы вертикального действия могут вызывать отклонения глазного яблока по горизонтали, а горизонтального — по вертикали. Диагностика поражения мышц в случае структурного косоглазия представляет значительную сложность, поскольку в соответствии с существующими методами врач исследует направления отклонения глаз от ортофорического положения и определяет тактику хирургического лечения в соответствии с существующими стандартными представлениями. Если глаз отклоняется по гори-

зонтали, то проводят хирургическую коррекцию мышц горизонтального действия, не учитывая возможность более сложного биомеханического соотношения усилий. Обычно такое хирургическое лечение малоэффективно, поскольку не устраняется реальная причина отклонения глаза.

Функциональное косоглазие обусловлено усилением или ослаблением силы действия мышцы или группы мышц, обычно оно проявляется отклонением глаза в сторону более сильной мышцы.

Комбинированным является структурно-функциональное косоглазие, обусловленное как смещением места приложения усилий мышц, так и неравновесным их действием.

Поляризационно-оптический метод, основанный на исследовании формы интерференционных картин на роговице глаза, позволяет дифференцировать причины возникновения отклонений глаз в каждом конкретном случае. Действие ЭОМ вносит наиболее существенный вклад в формирование интерференционной картины именно в виде ромба. Эти мышцы, удерживая глазное яблоко в определенном положении, всегда находятся в тонусе. Многочисленные исследования формы интерференционных картин в норме и при различной патологии экстраокулярных мышц позволили выявить закономерности их изменения и разработать объективные бесконтактные способы диагностики [6-9].

Так, установлено, что ослабление усилия со стороны одной из мышц приводит к скруглению соответствующего ей угла интерференционного ромба и уменьшению длины соответствующего ей отрезка диагонали. При увеличении мышечного усилия происходит вытяжение соответствующего угла и увеличение длины отрезка диагонали [6]. Смещение места прикрепления мышцы вдоль линии ее действия эквивалентно изменению усилия, а смещение в сторону от линии действия приводит к искажению фигуры ромба и смещению углов ромба от соответствующих меридианов.

При изменении тонуса глазодвигательных мышц, обусловленного конвергенцией (сведением зрительных осей, обычно при рассматривании близко расположенных предметов), в процессе напряженного зрительного труда, выполняемого длительное время, форма интерференционного ромба также изменяется, причем эти изменения сходны с теми, которые наблюдаются при изменении тонуса глазодвигательных мышц при косоглазии [9].

Таким образом, поляризационно-оптический метод может быть использован для исследования структурно-функционального состояния глазодвигательных мышц как в задачах диагностики, так и при оценке участия ЭОМ в решении зрительных задач. Однако получить на практике и соответствующим образом классифицировать интерференци-

онные картины глаз при всех вариантах патологии ЭОМ достаточно сложно, поэтому нами проведено моделирование распределения напряжений в роговице при разных сочетаниях их силы действия и места прикрепления.

Целью работы является исследование с помощью модели напряженно-деформированного состояния глаза влияния структурно-функционального состояния глазодвигательных мышц на распределение внутренних напряжений в роговице.

1. Модель напряженно-деформированного состояния глаза

Для моделирования различных вариантов состояния ЭОМ была использована модель напряженно-деформированного состояния глаза [2, 9]. На рис. 3 представлена схема сферической оболочки, к которой приложены 4 сосредоточенных усилия Q_i со стороны прямых ЭОМ.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния глазного яблока были сделаны следующие упрощения, облегчающие расчеты:

1. Считаем, что глазное яблоко представляет собой тонкую сферическую оболочку, заполненную жидкостью. Так как мы исследуем распределение внутренних напряжений только в роговице, то считаем, что радиус кривизны глазного яблока равен среднему радиусу кривизны роговицы. Оболочку глаза можно считать тонкой, так как отношение толщины ее стенки к радиусу кривизны величина малая. Градиентом напряжений по толщине оболочки, исходя из условия ее тонкости, пренебрегаем. Для упрощения расчетов считаем оболочку сферической.

2. Считаем, что упругие свойства оболочки одинаковые.

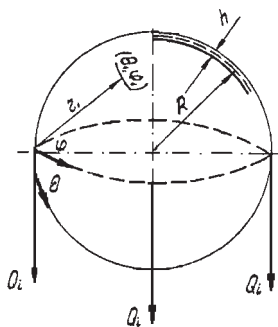


Рис. 3 Схема сферической оболочки с приложенными усилиями ЭОМ

3. Считаем, что оболочка заполнена однородной жидкостью (не учитываем сложное внутреннее строение глазного яблока).

4. При расчетах учитываем только градиент толщины роговой оболочки, остальную же часть глазного яблока считаем однородной по толщине.

5. Считаем, что на роговую оболочку действуют только наружные прямые мышцы, действие косых мышц не учитываем.

При проведении моделирования было учтено реальное место прикрепления каждой из наружных прямых мышц и проведены исследования всех возможных вариантов их анатомических изменений.

Оболочка глаза в отсутствии действия ЭОМ растянута давлением внутриглазной жидкости, которая, по закону Паскаля, оказывает равное давление на все точки оболочки, поэтому на каждый ее элемент будут действовать растягивающие усилия, вызывающие появление напряжений, которые определяются по формуле:

$$\sigma_p = \frac{PR}{2h},$$

где σ_p – напряжения в оболочке; P – давление внутриглазной жидкости; R – радиус кривизны оболочки; h – ее толщина.

Каждая сила Q_i оказывает растягивающее действие на роговую оболочку и сжимает склеру, причем при определенных условиях (например, при конвергенции) еще и деформирует склеру.

Все формулы представлены в сферических координатах θ и ϕ , радиус-вектор r отсчитывается от точки приложения силы. Так как воздействия глазодвигательных мышц симметричны, угол θ изменяется от 0 до $\pi/2$, угол ϕ – от 0 до π . Квадрат радиус-вектора r определяется по формуле:

$$r^2 = R^2(\theta^2 + \sin^2 \theta \phi^2).$$

Каждая сила Q_i создает в сферической оболочке нормальные напряжения $\sigma_i = \frac{N_i}{h}$ и напряжения смещения $\tau_i = \frac{T_i}{h}$, где N_i – нормальные усилия, T_i – усилия смещения, h – толщина оболочки.

Усилия в оболочке определяются по следующим формулам:

$$N_\theta = Q_i \frac{R\theta}{4\pi r^2} \left[2(1+\nu) \frac{R^2 \gamma^2 \sin^2 \theta}{r^2} - 3 - \nu \right],$$

$$N_\gamma = -Q_i \frac{R\theta}{4\pi r^2} \left[2(1+\nu) \frac{R^2 \gamma^2 \sin^2 \theta}{r^2} + 1 - \nu \right],$$

$$T_\theta = T_\gamma = -Q_i \frac{R\gamma}{4\pi r^2} \left[2(1+\nu) \frac{R^2 \theta^2}{r^2} + 1 - \nu \right].$$

В приведенных далее формулах ν – коэффициент Пуассона, характеризующий упругие свойства оболочки.

В каждой точке оболочки можно определить эквивалентные напряжения с учетом только нормальных напряжений $\sigma'_s = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\gamma^2 - \sigma_\theta \sigma_\gamma}$ и эквивалентные напряжения с учетом напряжений сдвига $\sigma_s = \sqrt{(\sigma'_s)^2 + 3\tau^2}$. Поскольку внутриглазная жидкость создает в оболочке напряжения σ_p , то в каждой точке оболочки существуют суммарные на-

пряжения, определяемые по формуле $\sigma = \sigma_s + \sigma_p$, и главные напряжения, определяемые по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\sigma_\theta + \sigma_\gamma + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_\gamma)^2 + 4\tau^2} \right] + \sigma_p,$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_\theta + \sigma_\gamma - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_\gamma)^2 + 4\tau^2} \right] + \sigma_p,$$

где σ_1 — максимальные напряжения; σ_2 — минимальные.

Приведенные формулы являются асимптотическими, они описывают напряженное состояние оболочки в окрестности точки приложения силы Q_i . К главному яблоку приложены четыре такие силы, потому результирующие напряжения в каждой точке оболочки определяют как суперпозицию напряжений, создаваемых каждой силой.

2. Результаты и их обсуждение

При проведении расчета распределения напряжений в оболочке мы исходили из того, что вблизи точки приложения силы напряжения большие, но они существенно уменьшаются с расстоянием. Результирующие напряжения в оболочке рассчитывались путем сложения значений напряжений от каждой силы. Поскольку линии равных напряжений (изохромы) наблюдаются на фоне радужной оболочки глаза, то есть как бы спроектированы на плоскость, то расчетные кривые строились в проекции на плоскость, что осуществлялось на основе геометрических представлений. При проведении расчетов были использованы значения параметров, соответствующие их значениям для реальных глаз.

В качестве иллюстрации осуществления метода расчета с использованием модели на рис. 4 представлены фотография и схема интерференционной картины глаза с косоглазием, обусловленным смещением места прикрепления внутренней прямой мышцы в сторону лимба и ослаблением силы действия наружной прямой мышцы.

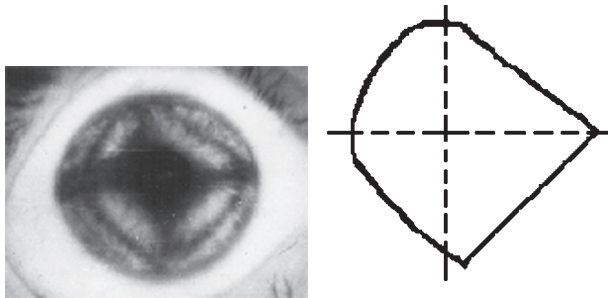


Рис. 4. Фотография и схема интерференционной картины глаза с косоглазием

На рис. 5 представлены расчетные изохромы для разных случаев смещения места прикрепления внутренней прямой мышцы.

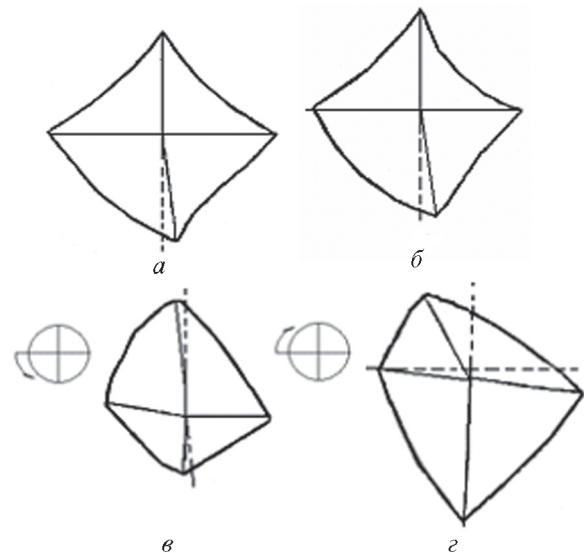


Рис. 5. Расчетные изохромы для случаев смещения места прикрепления внутренней прямой мышцы: вдоль линии действия к лимбу (а), к экватору (б), вниз от меридиана (в) и вверх от меридиана (г)

Расчетные изохромы по форме сходны с экспериментальными и могут быть использованы для диагностики структурно-функциональной патологии ЭОМ.

Выводы

1. Модель напряженно-деформированного состояния глаза может быть использована для расчета линий равных напряжений, поскольку форма расчетных изохром хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. Расчет линий равных напряжений при всех возможных вариантах дислокации ЭОМ позволит создать набор эталонов интерференционных картин, пригодных для диагностических целей.

Список литературы: 1. Пеньков М.А., Кочина М.Л. Интерференционный метод в диагностике косоглазия // Офтальмо-логический журнал. — 1979. — N8. — С. 497-498. 2. Пеньков М.А., Алтухер Г.М., Кочина М.Л. Расчет изохром и изоклин роговой оболочки глаза // Биофизика. — Вып. 2. — 1982. — Т. XXVIII. — С. 313-316. 3. Пеньков М.А., Кочина М.Л., Уткин Ю.А. Анализ интерференционных изохром роговой оболочки глаза и выделение диагностических признаков // Проблемы бионики. — 1983. — Вып. 30. — С. 22-28. 4. Аветисов Э.С. Содружественное косоглазие. — М.: Медицина, 1977. — 312 с. 5. Научно-практический анализ результатов хирургического этапа лечения детей с врожденным косоглазием / Е.И. Ковалевский, М.Р. Гусева, М.И. Грязнов, А.А. Холмский // Офтальмологический журнал. — 1979. — N5. — С. 272-275. 6. Кочина М.Л. Некоторые результаты моделирования напряженного состояния роговой оболочки глаза // Кибернетика и вычислительная техника. — 1991. — Вып. 90. — С. 97-99. 7. Результаты моделирования врожденной патологии экстраокулярных мышц / М.А. Пеньков, С.Ф. Зубарев, М.Л. Кочина, Т.А. Босенко // Офтальмологический журнал. — 1990.

– N4. – С. 197-200. 8. *Босенко Т.О.* Діагностика асиметрії зовнішніх м'язів ока у поляризованому світлі при різних видах співдружньої косоокості: Автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. мед. наук. (14.00.08). – Одеса, 1994. – 16 с. 9. *Кочина М.Л., Калиманов В.Г.* Модель напружено-деформованого состояния роговицы глаза // Матер. І укр. наукової конф. «Проблеми біологічної і медичної фізики». 20-22 вересня 2004 р., Харків. – С. 146.

Поступила в редколлегию 10.10.2008

УДК: 1612.841/.844:611.84:620.171.51.001.5:616-07

Дослідження та моделювання поляризаційно-оптичних властивостей рогівки ока при різних станах екстраокулярних м'язів / М.Л. Кочина, В.Г.Каліманов // // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал – 2008. – № 2 (69). – С. 132-136.

Наведена модель напружено-деформованого стану ока та результати розрахунків внутрішніх напружень, які виникають в рогівці під впливом екстраокулярних м'язів і внутрішньоочного тиску. Розглянути різні варіанти

змін інтерференційних картин при патології екстраокулярних м'язів.

Л. 5. Бібліогр.: 9 найм.

UDK: 1612.841/.844:611.84:620.171.51.001.5:616-07

Research and modeling of polarization optical properties eye's cornea under various states of oculomotor muscles / M.L. Kochina, V.G.Kalimanov // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2008. – № 2 (69). – P. 132-136.

The optical anisotropy of alive eye's cornea is caused by properties of corneal collagen, interposition of its fibres in a tissue of a cornea, level of intraocular pressure and a structurally functional condition of oculomotor muscles. The interferential picture in a form of rhombus which parameters depend on force of action and a place of attachment of oculomotor muscles is observed in polarized light on a cornea in a usual self. A method of calculation tensions in the eye was described. These tensions were provoked by mechanical influence of oculomotor muscles and intraocular pressure. The method is suitable for calculating tensions for eyes with different pathology oculomotor muscles.

Fig. 5. Ref.: 9 items.