

А. В. БАХОЛДИН, Н. Ф. КОРШИКОВА, Д. Н. ЧЕРКАСОВА

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАЗА ИНДИВИДУУМА

Предложен алгоритм компьютерного моделирования оптической системы глаза индивидуума. Показана возможность применения алгоритма в офтальмологической практике. Приведен пример создания модели глаза с пресбиопией.

Ключевые слова: зрительный анализатор, оптическая система глаза, аметропия, пресбиопия, расчет оптических систем.

Биологическая оптическая система — зрительный анализатор человека — это предельно сложный для компьютерного моделирования объект. В частности, оптические характеристики глаз в норме даже у одного человека (парные глаза) различны и находятся в пределах биологической изменчивости (закон нормального распределения) [1, 2]. Две области знания требуют учета индивидуальных характеристик зрительного анализатора: эргономика зрительной деятельности и офтальмология как область медицины. Однако обращение к компьютерному моделированию роговицы, хрусталика или оптической системы глаза индивидуума в целом актуально именно в офтальмологии. Это связано с развитием контактной и интраокулярной коррекции, а также с появлением индивидуальных однофокальных и мультифокальных (прогрессивных) очковых линз [2].

Этап схематизации устройства оптической системы глаза индивидуума пока неизбежен [1—4]. Для разработки алгоритма компьютерного моделирования глаза индивидуума используют результаты врачебных метрологических исследований данного глаза и численные характеристики выбранной математической модели „Схематический глаз“ по Гульстранду [1, 3, 5]. Аметропия подразделяется на эметропию (соразмерность), миопию (близорукость), гиперметропию (дальнозоркость) в покое аккомодации и пресбиопию (утрата способности к аккомодации). Индивидуумов с соответствующей оптической системой глаз называют эметропами, миопами, гиперметропами и пресбиопами. Только у эметропов при изменении одного из оптических параметров глаза остальные характеристики изменяются соразмерно, а задний фокус всегда совмещен с сетчаткой (в покое аккомодации) [2—4]. Эти принятые в офтальмологии принципы схематизации оптической системы глаза положены в основу приведенных на блок-схеме (рис. 1) алгоритмов компьютерного моделирования глаз индивидуумов.

В качестве исходных данных принимаются сведения о характере изменения оптической системы каждого из парных глаз на протяжении жизни человека, получаемые из анамнеза, как это принято в офтальмологической практике.



Рис. 1

Необходимые метрологические сведения об аметропии оптической системы парных глаз и оптических параметрах роговицы получают в результате оптометрических исследований стандартизованными методами рефрактометрии (с помощью рефрактометра, проектора знаков, набора пробных очковых линз) и офтальмометрии (с помощью офтальмометра) соответственно [3, 4].

В качестве математических моделей выбраны: асферическая компьютерная модель соразмерный „Схематический глаз“ по Гульстранду (далее — „Соразмерный глаз“) и стандартизованная составная система очковая линза I — асферическая компьютерная модель „Схематический глаз“ по Гульстранду с аметропией (далее — „Глаз с аметропией“) II (рис. 2). В обеих моделях глаза полностью сохранены композиция и параксиальные оптические характеристики схемы Гульстранда (в состоянии покоя аккомодации), а именно: 1 — роговица, 2 — зрачок глаза (апертурная диафрагма), 3 — хрусталик, 4 — сетчатка; H_{II} , H_{II}' — передняя и задняя главные плоскости глаза; F_{II} , F_{II}' — передний и задний фокусы модели глаза; f_{II} , f_{II}' — переднее и заднее фокусные расстояния глаза; ПЗО — переднезадний отрезок (длина глазного яблока); a_{II} , a_{II}' — передний и задний отрезки; R_{II} — дальнейшая точка ясного видения глазом [5]. В результате оптимизации угол поля 2ω моделей составил 60° .

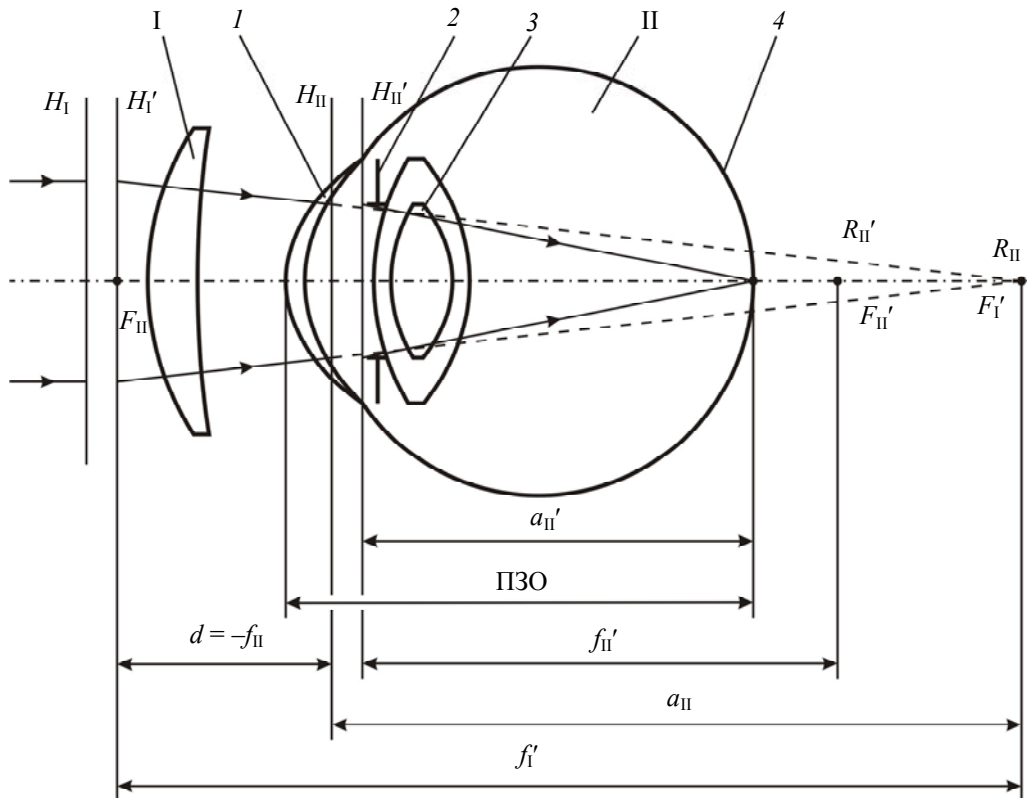


Рис. 2

В композиции стандартизованной составной оптической системы очковой линзы I и модели „Глаз с аметропией“ II (рис. 2) соблюдено следующее условие: $d = -f_{II}$ — очковая линза I располагается в передней фокальной плоскости глаза II, в этом случае оптическая сила системы в целом Φ_{I-II} при любом значении оптической силы линзы Φ_I равна оптической силе глаза Φ_{II} :

$$\Phi_{I-II} = \Phi_I + \Phi_{II} - \Phi_I \Phi_{II} d = \Phi_{II}.$$

На рис. 2 также указаны H_I , H_I' — передняя и задняя главные плоскости линзы, F_I' — задний фокус очковой линзы, f_I' — заднее фокусное расстояние линзы. При данной композиции системы отсутствует эффект изменения масштаба изображения на глазном дне.

Стандартизованная составная система из очковой линзы I и модели „Глаз с аметропией“ II (рис. 2) использовалась на этапах габаритного расчета и оптимизации различных вариантов модели „Глаз с аметропией“. На этапе оптимизации компьютерных моделей поверхности системы задавались как асферические поверхности вращения высшего порядка.

При расчете по алгоритму (см. рис. 1) необходимо также учесть данные о состоянии рефракционного равновесия пресбиопы в возрасте 18—45 лет. В качестве критерия адекват-

ности полученных компьютерных моделей „Соразмерный глаз“ и „Глаз с аметропией“ выбрана длина ПЗО (рис. 2), измеренная врачом-офтальмологом [3].

Алгоритм (рис. 1) построен на основе следующих допущений.

1. Выбрав оптическую схему модели „Соразмерный глаз“ и измерив один из оптических параметров глаза эметропа, остальные можно рассчитать через коэффициент пересчета $K_{II} = R_{1 \text{ изм}} / R_{1 \text{ ср}}$, как это принято в технической оптике, где $R_{1 \text{ изм}}$, $R_{1 \text{ ср}}$ — радиус измеренной передней поверхности роговицы и модели „Соразмерный глаз“ соответственно.

2. Близорукость (миопия) или дальнозоркость (гиперметропия) возникают из-за несоответствия соразмерной оптической системы 1—3 глаза II и длины ПЗО. Поэтому в случае аметропии строится и оптимизируется компьютерная модель „Соразмерный глаз“, затем производится расчет длины ПЗО с учетом измеренной степени аметропии и выполняется оптимизация в схеме с параксиальной очковой линзой.

3. Пресбиопия возникает вследствие стойкого нарушения соразмерности оптических систем хрусталика 3 и глаза II в целом. Вначале строятся модели „Соразмерный глаз“ или „Глаз с аметропией“ по результатам анамнеза. Считается, что при пресбиопии соразмерно изменяются оптические параметры хрусталика 3, оптическая система глаза утрачивает соразмерность с длиной ПЗО. Поэтому в случае пресбиопии строится модель соразмерного хрусталика с коэффициентом пересчета $K_3 = f'_3 / f'_{3 \text{ ср}}$, где f'_3 — расчетное заднее фокусное расстояние хрусталика, $f'_{3 \text{ ср}}$ — заднее фокусное расстояние хрусталика по данным моделей „Соразмерный глаз“ или „Глаз с аметропией“.

На этапе оптимизации компьютерных моделей „Глаз с аметропией“ используется составная схема с параксиальной очковой линзой I (рис. 2).

Алгоритм моделирования оптической системы глаза индивидуума расширен этапами ввода в модели измеренного правильного астигматизма (разность аметропий в двух взаимно перпендикулярных главных меридианах глаза) и моделирования оптической системы глаз в состоянии аккомодации.

В качестве примера рассмотрим моделирование оптической системы парных глаз пресбиопии [3]. Анамнестический опрос выявил, что до 45 лет пациент был эметропом. Измерения показали, что после 45 лет он стал пресбиопом: максимальная острота зрения вдаль правого глаза (OD): $V_{OD} = 0,7 + sph + 2,0$ дптр = 1,6; левого глаза (OS): $V_{OS} = 1,0 + sph + 1,75$ дптр = 1,6; рефракция стигматической очковой линзы для правого глаза (OD): $\Phi_1 = sph + 2,0$ дптр, рефракция стигматической очковой линзы для левого глаза (OS): $\Phi_1 = sph + 1,75$ дптр; рефракция роговицы 3 (рис. 2): 44,5 дптр (OD), 44,0 дптр (OS); радиус кривизны $R_{1 \text{ изм}}$ роговицы 7,6 мм (OD), 8,1 мм (OS); длина ПЗО 24,5 мм (OD) (расчет 25,0 мм); 24,1 мм (OS) (расчет 24,3 мм) [3].

Последовательность габаритного расчета, выполненного с использованием программы *MathCad*, соответствует блок-схеме (рис. 1). При этом два этапа компьютерного моделирования парных глаз (эметроп, возраст 18—45 лет и гиперметроп) заканчиваются оптимизацией. Оптимизированные оптические параметры каждого глаза используются в расчете конструктивных параметров соразмерно изменившегося хрусталика.

Оптимизация полученной модели выполнена в пакете прикладных программ *Zemax* в схеме с параксиальной очковой линзой за счет асферизации поверхностей хрусталика, а оптические параметры роговицы берутся как результат измерений с использованием офтальмометра.

Исходя из предположения, что поверхности оптических элементов 1, 3, 4 глаза II (рис. 2) являются асферическими, определялся порядок асферичности, достаточный для получения дифракционного качества изображения. Оказалось, что для достижения углового поля $2\omega = 60^\circ$ достаточно применить асферические поверхности десятого порядка на компонентах 1, 3 и 4,

а для $2\omega = 90^\circ$ — шестнадцатого порядка. По результатам компьютерного моделирования в пакете прикладных программ *Zemax* рассчитана функция передачи модуляции (рис. 3) правого глаза (*OD*) пресбиопса с параксиальной линзой (*sph*+2,0 дптр). Расчетная длина ПЗО близка к измеренной.

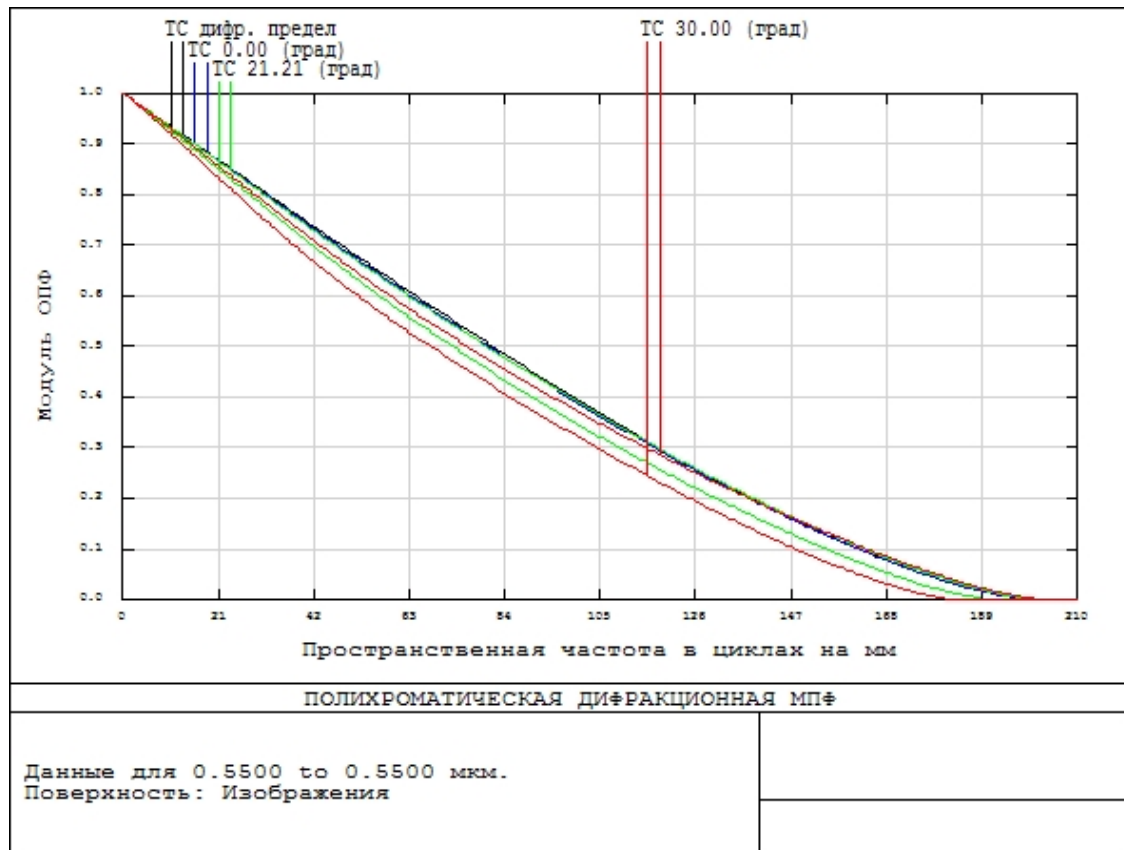


Рис. 3

Предложенный алгоритм позволяет строить компьютерные модели оптической системы соразмерных глаз и глаз с аметропией на основе анамнеза, оптометрических исследований аметропии и измерений параметров роговиц. Это подтверждается на примере создания моделей парных глаз с пресбиопией.

Использование данных анамнеза расширит возможности практического применения компьютерного моделирования оптической системы глаз индивидуумов в офтальмологической практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mütze K., Rochlter F. *Praktische Augenoptik. Formelnsammlung und Tabellenbuch.* Berlin: Verlagstechnik, 1968.
2. Волков В. В., Горбань А. И., Джалиашвили О. А. *Клиническая визо- и рефрактометрия.* Л.: Медицина, 1976.
3. Черкасова Д. Н. *Оптические офтальмологические приборы: Учеб. пособие.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.
4. Черкасова Д. Н., Бахолдин А. В. *Оптические офтальмологические приборы и системы: Учеб. пособие. Ч. 1.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.
5. ГОСТ 14934-88. *Офтальмологическая оптика. Термины и определения.*

Сведения об авторах

Алексей Валентинович Бахолдин — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

- Наталья Федоровна Коршикова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: ganasha_sun@mail.ru
- Дина Николаевна Черкасова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.