

И. Г. Пальчикова^{1}, Е. С. Смирнов¹*

Об экспериментальной оценке качества изображения интраокулярных линз

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: palchikova@gmail.com

Аннотация. Выделены особенности построения изображений различными типами современных интраокулярных линз (ИОЛ). Представлена модель глаза и концепция экспериментального стенда для непосредственного тестирования и сравнения оптических характеристик ИОЛ с увеличенной глубиной фокуса с оптическими характеристиками монофокальных ИОЛ.

Ключевые слова: интраокулярная линза, каустика, функция рассеяния точки, построение изображения, контраст изображения

I. G. Palchikova^{1}, E. S. Smirnov¹*

On Experimental Evaluation of the Visual Quality of Intraocular Lenses

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: palchikova@gmail.com

Abstract. The features of image construction by different types of modern intraocular lenses (IOLs) are highlighted. An eye model and the concept of an experimental setup for direct testing and comparison of the optical characteristics of IOLs with increased depth of focus with the optical characteristics of monofocal IOLs are presented.

Keywords: Intraocular lens, caustics, point spread function, image formation, image contrast

Введение

В настоящее время потерю зрения в результате катаракты можно восстановить с помощью операции, при которой помутневший хрусталик разрушается (факоэмульсификация) и заменяется имплантированной интраокулярной линзой (ИОЛ) [1]. Современные улучшенные технологии факоэмульсификации, использование мягких ИОЛ, имплантированных через микроразрезы, существенно снизили риск индуцированного роговичного астигматизма и уменьшили количество осложнений в целом. Одновременно улучшились и оптические свойства ИОЛ, появились их различные новые конструкции. Все это привело к широкому внедрению в клиническую практику ИОЛ различных типов и сформировало необходимость исследований особенностей изготовления дифракционно-рефракционных ИОЛ (моно-, мультифокальных с увеличенной глубиной фокуса (Extended Depth of Focus (EDOF))), тонких аспектов оптических свойств у разных конструкций и клинических проявлений при

их использовании. В процессе разработки ИОЛ необходимо обеспечить, во-первых, приемлемость конструкции ИОЛ и, во-вторых, – изготовление линзы в соответствии с конструкцией. Конечная эффективность имплантированных линз оценивается путем клинических исследований. Однако, первым этапом оценки качества разработки является объективное тестирование оптических свойств ИОЛ на лабораторных оптических стендах [2]. Тестирование ИОЛ позволяет выявить все особенности их функционирования и произвести объективное и независимое сравнение оптических свойств ИОЛ различных конструкций и производителей. Последнее является чрезвычайно важным, поскольку производители, как правило, не предоставляют протоколов лабораторных исследований оптических свойств ИОЛ, ограничиваясь лишь рекламными заявлениями и ординарными характеристиками. Этот факт определяет актуальность разработки адекватного метрологического обеспечения для оценки качества изображения EDOF ИОЛ и сравнения его с монофокальными изображениями. Актуальность разработки современных цифровых методов и устройств тестирования характеристик ИОЛ подтверждается, например, наличием значительного количества публикаций на эту тему в ведущих мировых журналах [3].

При разработке новых конструкций ИОЛ важно изучить их свойства в условиях, приближенных к реальному человеческому глазу. Для этого в экспериментальном стенде необходимо предусмотреть возможность использовать искусственные роговицы со сферическими аберрациями различной степени. Необходимо так же обеспечить возможность использовать несколько источников освещения с различными спектральными характеристиками. Кроме того, желательно исследовать оптические характеристики ИОЛ вне оси, а также при контролируемой децентрации и/или наклоне. Основным блоком экспериментального стенда является модель глаза, в которую помещается ИОЛ. Разработка такой модели глаза является целью настоящей работы.

Материалы и методы

Качество оптического изображения ИОЛ оценивается с помощью таких распространенных показателей, как частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) [4, 5], функция рассеяния точки (ФРТ) [6] и/или коэффициент Штреля, а также путем регистрации волнового фронта ИОЛ с помощью датчика Гартмана-Шака [7] и его анализа посредством разложения по полиномам Цернике. Тестирование ИОЛ должно производиться на оптическом стенде, соответствующем стандарту ISO119679-2 [8].

Перечисленные показатели и методы тестирования превосходно оценивают характеристики и качество изображения монофокальных ИОЛ, которые являются линейными и пространственно-инвариантными оптическими системами, обладающими единственной оптической силой. То есть эти линзы устанавливают взаимно-однозначное соответствие между пространством предметов и пространством изображений. Распределение интенсивности в изображении определяется как свертка [9] идеальной функции распределения интенсивности изображения и ФРТ ИОЛ. А частотно-контрастная характеристика связана с ФРТ через преобразование Фурье.

Некоторые сложности [5] возникают уже при оценке характеристик и качества изображения мультифокальных рефракционных и гибридных (дифракционно-рефракционных) ИОЛ [10-12]. Мультифокальные ИОЛ фокусируют плоскую монохроматическую световую волну в несколько (две и более) точек (фокусов). То есть каустику можно описать математически как сумму нескольких (двух и более) каустик монофокальных ИОЛ с различными оптическими силами. Мультифокальные ИОЛ обладают свойствами нескольких линейных и пространственно-инвариантных оптических систем, каждая из которых может быть охарактеризована вышеперечисленными показателями. Проблема заключается в том, что в каждой из фокальных плоскостей, кроме собственно фокуса, имеется сильный ореол рассеянного света от остальных каустик. Этот факт затрудняет [5] определение вышеперечисленных показателей оптического качества и приводит к резкому падению контраста получаемых изображений. Однако, оптическая система глаза является лишь начальной частью визуальной перцепции, когнитивные способности во многом определяются обработкой информации сетчатки в зрительной коре больших полушарий головного мозга. Это приводит к тому, что визуальная система человека проявляет толерантность к вариациям в контрасте изображений на сетчатке глаза [13, 14].

Оптические системы современных EDOF ИОЛ, как правило, включают дифракционные элементы, фазовая функция пропускания которых содержит аксиконные компоненты. Однако, классическое понятие функции рассеяния точки неприменимо к аксиконным изображениям [15]. То есть вышеперечисленные показатели оптического качества теряют смысл для аксиконных изображений, поскольку отсутствует взаимно однозначное соответствие между пространством предметов и пространством изображений. Этот факт определяет актуальность разработки адекватного метрологического обеспечения для оценки качества изображения EDOF ИОЛ и сравнения его с монофокальными изображениями.

Эскиз разрабатываемого экспериментального стенда приведен на рис. 1. Основными элементами стенда являются: сменные коллиматоры с источником освещения и тест-объектом, модель глаза с искусственной роговицей и иммерсионной камерой, в которую погружается ИОЛ, и, наконец, блок регистрации и анализа изображения и волнового фронта, включающий либо 10-кратный микроскоп с цифровой камерой, либо датчик Гартмана-Шака. Последние устройства могут быть в перспективе заменены спектрофотометром.

Приведем некоторые особенности элементов стенда.

Источники освещения. В стандарте ISO рассматривается осветитель с длиной волны 546 ± 10 нм. В экспериментальном стенде предполагается использовать He-Ne лазер и четыре типа светодиодов: три квазимонохроматических светодиода с полосой излучения вблизи длин волн $r=637$ нм, $g=521$ нм и $b=459$ нм и один белый светодиод. При наличии такого освещения можно тестировать хроматические аберрации ИОЛ, что особенно актуально для мультифокальных дифракционных линз, где хроматическая дисперсия имеет противоположный знак и значительно выше, чем в чисто рефракционных ИОЛ.

Тестовые объекты: отверстия различного диаметра, мишень USAF (см. рис. 1), сетчатый тест, тестовые миры и т.д. для тестирования оптических харак-

теристик ИОЛ на основе анализа качества изображения (частотноконтрастной характеристики края изображения (ЧКХ), изображения микроотверстия (pinhole)), в том числе, на различных расстояниях от модели глаза. Диаметр pinhole является критическим параметром. С одной стороны, он должен быть достаточно большим, чтобы пропускать достаточное количество света, но, с другой стороны, он должен быть меньше 300 мкм для того, чтобы получить плоский волновой фронт для освещения модельного глаза.

Коллимация: для тестирования ИОЛ в соответствии со стандартом ISO объект должен находиться на бесконечности. Для этого объект помещается в фокус коллиматора с фокусным расстоянием порядка 200 мм. Чтобы оценить эффективность работы ИОЛ вблизи, объект необходимо поместить на конечное расстояние. Наконец, для оценки работы ИОЛ вне оси весь коллиматор необходимо поворачивать.

Модель глаза: согласно стандарту ISO, ИОЛ должна быть погружена в воду или физиологический раствор, находящийся в камере. Сходящийся луч, преломленный искусственной роговицей, освещает центральную часть ИОЛ диаметром $3,0 \pm 0,1$ мм. Эффективный диаметр освещаемой области ИОЛ регулируется диафрагмой. Прецизионные регуляторы положения X, Y, Z и наклона X и Y позволяют исследовать оптические характеристики ИОЛ при ее смещении и/или наклоне.

Анализ изображения и волнового фронта: изображение, формируемое модельным глазом с тестируемой ИОЛ, фиксируется 12-разрядной цифровой камерой через 10-кратный микроскоп. Используя объект USAF, можно оценить оптическое качество ИОЛ по значениям ЧКХ. Трехмерное распределение интенсивности в объемной каустике EDOF ИОЛ определяется экспериментально с помощью pinhole в качестве объекта.

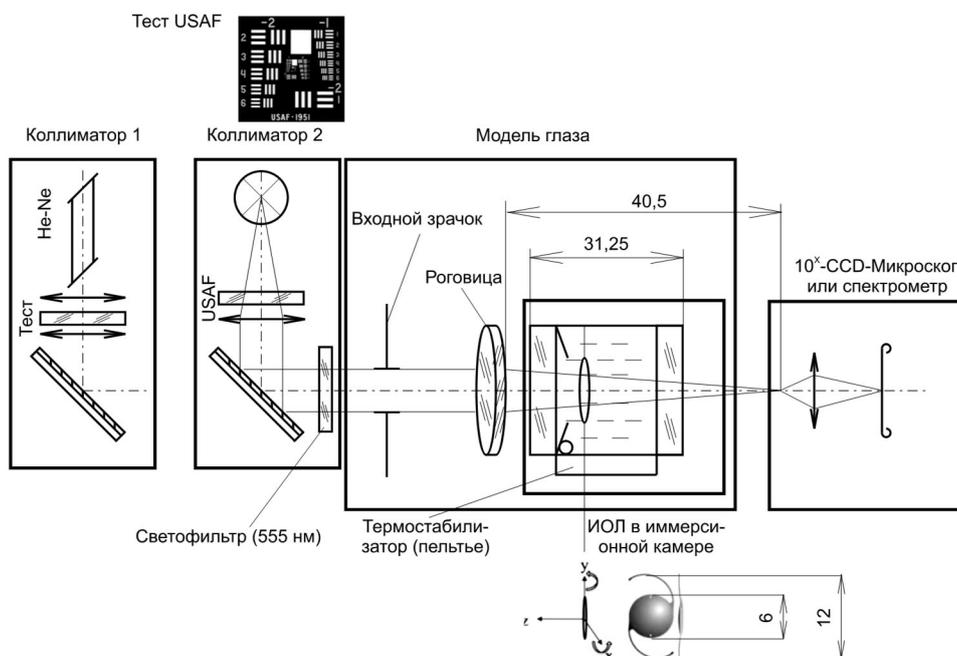


Рис. 1. Эскиз экспериментального стенда для тестирования оптических характеристик ИОЛ

Основным элементом стенда является модель глаза. На рис. 2 приведена фотография изготовленной модели.

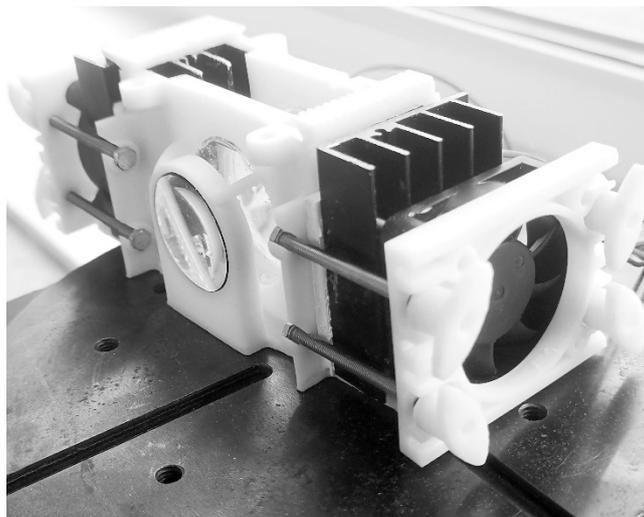


Рис. 2. Внешний вид модели глаза

Согласно [16], модель глаза должна отвечать следующим требованиям:

а) передняя поверхность ИОЛ расположена на расстоянии от (27 ± 1) мм перед фокальной точкой модели роговицы, показатель преломления пространства изображений составляет 1,336;

б) сходящийся пучок, проходящий через модель роговицы, должен освещать в центре ИОЛ круглый участок диаметром от 3,0 до $6,0 \pm 0,1$ мм.

Корпус кюветы выполнен по технологии аддитивного производства, которая превращает жидкие фотополимеры (в частности, ABS-подобная смола, чувствительная к УФ-излучению 355–405 нм от ShenZhen Eryone Technology Co., Ltd., Китай) слой за слоем в твердый объект. Мы использовали 3D принтер Anycubic Photon S (Shenzhen Anycubic Technology Co., Ltd., Китай). Для имитации оптической силы роговицы глаза использована стеклянная ахроматическая линза с фокусным расстоянием 40 мм. Линза и плоскопараллельные пластины вклеиваются в корпус с помощью прозрачного каучукового высокоэластичного клея-герметика В7000. Нагревают и поддерживают температуру окружающей среды ИОЛ ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) модули Пельтье TEC1-12707 (40×40), 12 В, до 75 Вт (Китай), установленные по обе стороны от направления оптической оси (как показано на рис. 2) совместно с температурным контроллером HW-735/3001, имеющим выносной герметичный датчик температуры NTC 10 кОм. Модули снабжены радиаторами и электрическими вентиляторами с подшипниками качения. Для подачи энергии используется блок питания ATX Power Man 350 Вт, обеспечивающий мощность по 12-вольтовой линии, равную 300 Вт. Таким образом, ИОЛ находится в контролируемо подогреваемой жидкости, заключенной между двумя плоскими пластинами из стекла.

Заключение

Представленная модель глаза и концепция экспериментального стенда позволят создать метрологическую базу для тестирования и сравнения оптических характеристик различных современных ИОЛ, а также выработать критерии оценки качества изображения нелинейных и пространственно неинвариантных EDOF ИОЛ путем экспериментального сравнения их с оптическими характеристиками монофокальных ИОЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Искаков И.А., Тахчиди Х.П. Интраокулярная коррекция дифракционно-рефракционными линзами. М.: Гэотар Медиа, 2016. – 240 с.
2. Advanced Physiological Optics Laboratory Yoon Lab. Available online: <https://www.cvs.rochester.edu/yoonlab/research/> (accessed on March, 12 2024).
3. US National Library of Medicine National Institute of Health. Available online: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed> (accessed on August, 24 2023).
4. Portney V. Optical testing and inspection methodology for modern intraocular lenses// J Cataract Refract Surg. – 1992. – V.18. – P. 607–613.
5. Simpson M.J. Optical quality of intraocular lenses // J Cataract Refract Surg. –1992.– V.18 – P. 86 – 94.
6. Simpson M.J. Diffractive multifocal intraocular lens image quality// Applied Optics. – 1992– V.31, N. 19. –P. 36231 – 3626.
7. Razgulin A.V., Kuzhamaliyev Y.Zh, Goncharov A.S., Larichev A.V. A variational method for wavefront reconstruction from Shack–Hartman sensor measurements // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2017. – V 30, № 4. – P. 399–403. DOI: 10.1134/S1024856017040091.
8. ISO119679-2 1999 года (Ophthalmic implants. Интраокулярные линзы. Часть 2. Оптические свойства и методы испытаний).
9. Дж. Гудман. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970, с. 364.
10. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Корольков В.П., Искаков И.А. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Оптический журнал. – 2007. – Т.74, №12. – С. 34–39.
11. Freeman M.H., Stone J. A new diffractive bifocal contact lens // Journ. Br. Contact Lens Assoc. – 1987. – V.10. – P. 15–20.
12. Cohen A.L. Bifocal contact lens optics// Spectrum. – 1989. – N 6. – P. 43–52.
13. Burton G.J. Contrast discrimination by the human visual system // Biol. Cybern. –1981. – V. 40. – P. 27 – 38.
14. Olson T., Corydon L. Contrast sensitivity in patients with a new type of multifocal intraocular lens//J. Cataract Refract. Surg.– 1990. – V.16. – P.42 – 46.
15. Пальчикова И.Г., Жукова Ю.В., Смирнов Е.С. Построение изображений аксиконами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь.– 2021. – Т. 8. – С.118–125. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-8-118-125.
16. ГОСТ 31580.2-2012 Имплантаты офтальмологические. ИНТРАОКУЛЯРНЫЕ ЛИНЗЫ. Часть 2. Оптические свойства и методы испытаний (ISO 11979-2:1999, MOD). Утв. и введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01 ноября 2012 г.) № 645-ст. – М.: Стандартинформ, 2013.

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, 2024