

# Оптимальные параметры модифицированного лазерного триангуляционного измерителя толщины

А.А. Адамов<sup>1</sup>, В.И. Храмов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный университет, просп. Университетский 100, Волгоград, Россия, 400062

**Аннотация.** В данной работе проводится поиск оптимальных параметров установки для проведения измерений толщины биологических тканей. Создана математическая модель измерителя. Проведён анализ различных конфигураций составляющих частей модели. Предложены способы определения оптимальных параметров и найдены численные значения для наиболее важных случаев.

## 1. Введение

В современной офтальмологической практике требуется проводить измерение толщины тонких биологических тканей (роговицы, остаточных роговичных слоев, склеры) при оперативном вмешательстве в рефракционной хирургии. Измеритель толщины должен удовлетворять ряду критериев, основные из которых — это требование безопасности (риск осложнения после использования должен быть минимальным или отсутствовать), проведение измерений бесконтактным методом (из-за специфики использования) и в режиме реального времени (экспресс-измерения).

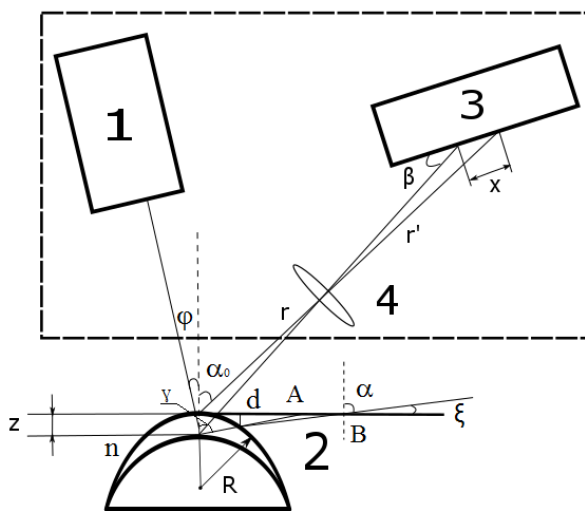
В работах [1-3] была предложена модификация метода лазерной триангуляции, которая позволила бы разработать устройство, способное проводить измерения толщины биотканей с соблюдением вышеуказанных ограничений. Анализ работ [4-8], посвящённых свойствам различных биологических тканей и их окон прозрачности для соответствующего излучения, а также сравнение параметров существующих измерителей толщин тонких прозрачных тканей и плёнок [9] и экспериментальные исследования привели к созданию лазерного триангуляционного измерителя толщины роговицы и остаточных роговичных слоев глаза [10]. Кроме этого, данный измеритель может применяться для определения глубины поражения при язве роговицы у людей и животных.

Были исследованы вопросы фокусировки лазерного излучения [11], используемого в данном методе, и его зависимость спектральных характеристик от температуры активной среды [12,13], а также рассматривался вопрос об обработке получаемых экспериментальных данных [14] с использованием библиотеки для машинного зрения [15]. В работе [16] были попытки осуществить полуэмпирический подбор оптимальных значений параметров экспериментальной установки для проведения измерений. Нижний предел измерений для толщины тканей и пленок составил 0,2 мм.

Цель данной работы состоит в том, чтобы разработать математическую модель лазерного триангуляционного измерителя толщины роговицы и на основе строгого анализа данной модели получить численно оптимальные значения для параметров этого измерителя.

### 2. Математическая модель измерительной системы

Методика измерения основана на способности коллимированного лазерного пучка распространяться на большие расстояния в средах с достаточно малыми коэффициентами поглощения и рассеяния. На рисунке 1 изображена функционально-оптическая схема измерительной установки. Световые метки (триангулограмма), получаемые отражением лазерного луча от границ воздух-измеряемая биоткань (роговица) и роговица-влага передней камеры (подложка), регистрируются на ПЗС-матрице фотоприёмного устройства. Зная расстояние между изображениями световых меток можно вычислить толщину измеряемого слоя.



**Рисунок 1.** Функционально-оптическая схема измерительной установки: 1 — лазер, 2 — роговица, 3 — фотоприёмное устройство, 4 — объектив

Согласно общим принципам моделирования [17-19] и законам геометрической оптики в работе [1] показан вывод формулы, которая связывает значение толщины измеряемого слоя в случае плоскопараллельных границ (радиус кривизны слоя  $R \rightarrow \infty$ ) с параметрами измерителя и оптическими свойствами самого слоя (показателем преломления). Толщина биоткани (плёнки, слоя)  $z$  связана с углом наблюдения  $\alpha$ , углом между приёмником оптического излучения (поверхностью ПЗС-матрицы) и оптической осью системы  $\beta$ , линейным увеличением объектива  $M = r'/r$ , расстоянием между изображениями световых меток на ПЗС-матрице фоторегистрирующего устройства  $x$  и показателем преломления  $n$  следующим образом:

$$z = 2x \frac{r}{r'} \frac{\sin \beta}{\sin 2\alpha} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}. \tag{1}$$

Величина поправки, которая бы учитывала радиус кривизны в точке измерения, была получена в работе [20]:

$$\begin{cases} x_{AB} = AB = d(\operatorname{ctg} \xi - \operatorname{tg} \gamma); \\ d = R \left( 1 - \sqrt{1 - (a/2R)^2} \right); \\ \operatorname{tg} \gamma = \sin \alpha / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \end{cases} \tag{2}$$

где  $\xi = \frac{\pi}{2} - \alpha$ ,  $a^2 = z(2R - z)$ .

После нетрудных алгебраических преобразований используя формулы (1) и (2) можно получить зависимость расстояния между изображениями световых меток на ПЗС-матрице (с учётом угла падения  $\varphi$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} x = K_1^{-1} \left( z - K_1 K_2 \left( R - \frac{\sqrt{(z-R)^2 + 3R^2}}{2} \right) \right); \\ K_1 = \frac{2 \sin \beta}{M} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\sin 2\alpha} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}{n}; \\ K_2 = \operatorname{tg} \alpha \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha - \cos \alpha}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Формула (3) есть функция 4 переменных  $x = x(\varphi, \alpha, \beta, M)$  с параметрами биоткани  $(z, n, R)$ , которая представляет собой математическое описание данного измерителя.

В предельном случае, когда  $R \rightarrow \infty$  — границы измеряемой ткани являются плоскопараллельными, формула (3) переходит в формулу (1) с точностью до учёта угла падения  $\varphi$ :

$$z = x \cdot K_1.$$

### 3. Поиск оптимальных значений для параметров измерителя

Чтобы получить значение для толщины  $z$  измеряемого слоя нужно знать расстояние между изображением световых меток  $x$ , то есть разрешить 2 отдельные световые метки на фотоприёмнике. Математически это соответствует условию  $x \rightarrow x_{\max}$ . Таким образом, задача сводится к безусловной оптимизации функции  $x = x(\varphi, \alpha, \beta, M)$  — поиску её глобального или хотя бы локального (абсолютного) максимума. Значение функции  $x$  ограничено только физическими размерами матрицы фотоприёмника.

Используя математические пакеты компьютерных программ [21,22] или их аналоги с открытым исходным кодом [23,24], в которых реализованы алгоритмы поиска абсолютного экстремума, применяющие аппарат математического анализа [25], можно найти оптимальные значения параметров системы  $(\varphi, \alpha, \beta, M)$  для толщины биоткани (роговицы человеческого глаза)  $z = 0,1$  мм с показателем преломления  $n = 1,36$  и радиусом кривизны в точке измерения  $R = 7,8$  мм, когда в эксперименте уже не удалось разрешить 2 отдельные световые метки на изображении триангулограммы:  $\varphi \approx 6,9^\circ$ ,  $\alpha \approx 31^\circ$ ,  $\beta \rightarrow 0^\circ$ ,  $M \approx 4,4$ . Однако такое значение параметра  $\beta$  даёт бесконечно малое значение энергии, попадающее в фотоприёмное устройство, и, строго говоря, не реализуемо технически. В эксперименте [26] в качестве фотоприёмного устройства использовалась камера 1080P Full HD SONY IMX322 Low illumination 0.01 Lux CMOS H.264 AEC AEB AGC (производство: Китай), для которой минимальное значение угла составляло  $\beta_{\min} \approx 7^\circ - 8^\circ$ . Если же  $\alpha \approx 50,4^\circ$ , а  $\beta \approx 9,7^\circ$ , как было получено полуэмпирическим подбором в работе [16], то  $M \approx 1,1 \cdot 10^6$ , что трудно реализуемо технически, так как в этом случае расстояние от предмета (биоткани) до линзы должно быть примерно равно фокусному расстоянию  $d = F + \delta(F)$ . Этого сложно добиться при таких значениях  $M$  из-за конечного значения физических размеров фокусирующей системы (толщины линз) объектива.

### 4. Заключение

В данной работе была разработана математическая модель лазерного триангуляционного измерителя толщины роговицы и проведён её численный анализ. Были получены оптимальные значения для параметров установки, работающей по предложенному методу проведения измерений. Для значений толщины биоткани (роговицы человеческого глаза)

$z = 0,1$  мм с показателем преломления  $n = 1,36$  и радиусом кривизны в точке измерения  $R = 7,8$  мм:

- 1) угол падения лазерного излучения на поверхность измеряемого слоя  $\varphi \approx 6,9^\circ$ ;
- 2) угол наблюдения  $\alpha \approx 31^\circ$ ;
- 3) угол между приёмником оптического излучения (поверхностью ПЗС-матрицы) и оптической осью системы  $\beta \approx 7^\circ - 8^\circ$ ;
- 4) линейное увеличение объектива  $M \approx 4,4$ .

Полученный результат позволит уменьшить нижний предел для толщины биологических тканей и плёнок при проведении экспериментальных измерений.

## 5. Литература

- [1] Адамов, А.А. Оценка возможности применения метода лазерной триангуляции к измерениям толщин тонких пленок / А.А. Адамов, В.И. Храмов // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 83-94. DOI: 10.15688/jvolsu.2017.4.8.
- [2] Адамов, А.А. Применение метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких биологических тканей / А.А. Адамов // Материалы Научной сессии. Волгоград. – 2017. – С. 454-459.
- [3] Khramov, V.N. Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers / V.N. Khramov, A.A. Adamov // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10717. – P. 1071703. DOI: 10.1117/12.2314820.
- [4] Тучин, В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / В.В. Тучин. – М.: Физматлит, 2013. – 812 с.
- [5] Bashkatov, A.N. Optical properties of human sclera in spectral Range 370-2500 nm / A.N. Bashkatov, E.A. Genina, V.I. Kochubey, V.V. Tuchin // Optika i Spektroskopiya. – 2010. – Vol. 109(2). – P. 226-234.
- [6] Красников, И.В. Распространение оптического излучения в биологических тканях / И.В. Красников, В.Е. Привалов, А.Ю. Сетейкин, А.Э. Фотиади // Вестник СПбГУ. – 2013. – Т. 11, № 4. – С. 202-217.
- [7] Optical properties of the human cornea: Shape and wave aberration measurements using the VU topographer and Scheimpflug photography [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/254762883> (05.11.2018).
- [8] База данных “Аномальные и патологические изменения роговичного слоя человеческого глаза”: номер регистрации (свидетельства) № 2018620589 / А.А. Адамов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). – М.: ФИПС, 2018.
- [9] База данных “Измерители толщин тонких прозрачных тканей и пленок”: номер регистрации (свидетельства) № 2018620590 / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.И. Храмов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). – М.: ФИПС, 2018.
- [10] Адамов, А.А. Лазерный триангуляционный измеритель толщины роговицы и остаточных роговичных слоев глаза / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.И. Храмов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // Патент на полезную модель №179826. Опубл. 24.05.2018. Бюл. №15. Приоритет полезной модели, 07.11.2017.

- [11] Адамов, А.А. Повышение разрешения световых меток при измерении толщины роговичного слоя глаза в методе лазерной триангуляции / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.Н. Храмов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов. – Москва, 2018. – С. 542-543.
- [12] Adamov, A.A. Influence of temperature on the spectral characteristics of semiconductor lasers in the visible range / A.A. Adamov, M.S. Baranov, V.N. Khramov // Proc. SPIE. Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical . – 2018. – Vol. 10717. – P. 1071709. DOI: 10.1117/12.2314918.
- [13] Адамов, А.А. Зависимость спектральных характеристик полупроводниковых и твердотельных лазеров видимого диапазона от температуры активной среды / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.Н. Храмов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 356-362. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-356-362.
- [14] Программа для ЭВМ. Программное средство обработки изображений экспериментальных данных для оценки расстояния между световыми метками: номер регистрации (свидетельства) № 2017664237 / А.А. Адамов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). – М.: ФИПС, 2017. – №12.
- [15] Библиотека обработки изображений OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org> (05.11.2018).
- [16] Адамов, А.А. Модифицированный метод лазерной триангуляции / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.Н. Храмов, В.Л. Абдрахманов, А.В. Голубев, И.А. Чечеткин // Тезисы докладов международной конференции Физика. СПб. – Санкт-Петербург: ФТИ им. А. Ф. Иоффе. – 2018. – С. 123-124.
- [17] Куликов, К.Г. Математическое моделирование медико-биологических систем: учеб. пособие / К. Г. Куликов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 240 с.
- [18] Пушкарева, А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. Учебное пособие / А.Е. Пушкарева. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.
- [19] Пушкарева, А.Е. Компьютерное моделирование в оптике биотканей / А.Е. Пушкарева, А.А. Кузнецова. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 93 с.
- [20] Adamov, A.A. Modified method of laser triangulation / A.A. Adamov, M.S. Baranov, V.N. Khramov, V.L. Abdrakhmanov, A.V. Golubev, I.A. Chechetkin // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1135. – P. 012049.
- [21] Computer algebra system Wolfram Mathematica [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.wolfram.com/mathematica/> (05.11.2018).
- [22] Application package MATLAB [Electronic resource]. – Access mode: <https://matlab.ru/products/matlab> (05.11.2018).
- [23] Scientific Programming Language GNU Octave [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.gnu.org/software/octave/> (05.11.2018).
- [24] Система компьютерной алгебры Maxima [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maxima.sourceforge.net/ru/> (05.11.2018).
- [25] Никольский, С.М. Курс математического анализа: Учебник для вузов / С.М. Никольский. – М.: Физматлит, 2001. – 592 с.
- [26] Адамов, А.А. Вариации модифицированного метода лазерной триангуляции / А.А. Адамов, М.С. Баранов, В.Н. Храмов // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов. – Москва: НИЯУ МИФИ. – 2019. – С. 631-632.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-42-343003 и гранта УМНИК 17-12 (б), Волгоградская область - 2017 № 12926ГУ/2018.

# The optimal parameters of the laser triangulation modified thickness meter

A.A. Adamov<sup>1</sup>, V.N. Khramov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volgograd State University, Ave. University 100, Volgograd, Russia, 400062

**Abstract.** In this paper, we search for optimal installation parameters for measuring the thickness of biological tissues. Created a mathematical model of the meter. The analysis of various configurations of the constituent parts of the model. Methods for determining the optimal parameters are proposed and numerical values are found for the most important cases.