



УДК 531/534:[57+61]

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ УПРУГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА

Д.А. Усанов¹, А.В. Скрипаль¹, Т.Б. Усанова², С.Ю. Добдин¹

¹ Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru, skripalav@info.sgu.ru

² Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, Россия, 410012, Саратов, ул. Большая Казачья, 112

Аннотация. Представлены результаты сравнения измерений внутреннего давления на упругую сферическую оболочку, моделирующую глазное яблоко, с помощью бесконтактного лазерного автодина и тонометра Маклакова. Показано, что величина измеренного давления зависит от толщины упругой сферической оболочки, моделирующей глазное яблоко. При измерении контактным тонометром установлено, что изменение толщины оболочки примерно на 100 мкм влечет за собой изменение давления на 10 мм рт. ст. При бесконтактном измерении оценка давления проводилась по параметрам движения участка оболочки под действием пневмоимпульса с использованием полупроводникового лазерного автодина. Полученные результаты показали, что использование в качестве информационного параметра отношения величины прогиба и ускорения позволяет уменьшить ошибку измерения внутреннего давления, связанную с различной толщиной оболочки.

Ключевые слова: биомеханика глаза, полупроводниковый лазер, автодинный сигнал, внутриглазное давление, тонометрия глаза, толщина оболочки.

В работах [9, 10] было показано, что упругую сферическую оболочку в виде резинового шарика, заполненного гелем, удобно использовать в качестве модели глазного яблока для отработки методов измерения внутриглазного давления. Определение внутриглазного давления является одной из ключевых задач офтальмологии, поскольку знание офтальмотонуса позволяет своевременно предсказать развитие различных заболеваний, например глаукомы. Для оценки офтальмотонуса используются бесконтактные и аппланационные тонометры [13, 14]. Одним из недостатков всех известных способов измерения давления является зависимость результатов измерений от толщины оболочек глаза, о чем свидетельствуют, например, сведения, приведенные в работах [12, 15, 18]. У разных людей может быть различная толщина роговицы, при этом будут различаться и измеренные тем или иным методом значения давления. В статьях [16, 17] показано, что толщина роговицы может сильно различаться для разных этнических и возрастных групп. Было установлено, что после проведения определенных видов лазерных

© Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю., 2013

Усанов Дмитрий Александрович, профессор, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики твердого тела, Саратов

Скрипаль Анатолий Владимирович, профессор, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой медицинской физики, Саратов

Усанова Татьяна Борисовна, к.мед.н., врач детского отделения клиники глазных болезней, Саратов

Добдин Сергей Юрьевич, инженер, к.ф.-м.н., Саратов

операций на глазах толщина роговицы может существенно отличаться [7], поэтому перед измерением внутриглазного давления нередко приходится предварительно измерять толщину роговицы и с учетом измеренного значения толщины вводить поправочный коэффициент в результаты измерений обычно используемым тонометром. Подобный способ позволяет повысить точность измерений, но в широкой клинической практике затрудняет оперативное проведение диагностики внутриглазного давления у большого количества пациентов. Зависимость результатов измерений внутриглазного давления от толщины роговицы исследовалась авторами работ [2, 4, 5, 19].

Ранее нами была показана возможность измерения внутриглазного давления с помощью полупроводникового лазерного автодина [11]. В отличие от существующих методов измерений данный метод позволяет одновременно измерять несколько параметров, характеризующих воздействие на глаз воздушной струи. На модели было экспериментально показано, что отношение величины прогиба и ускорения оболочки модели глазного яблока слабо зависит от давления пневмоимпульсов и от расстояния между глазом и измерителем, изменение которого может служить основным источником погрешности измерений. Таким образом, для оценки внутриглазного давления предложено использовать изменение отношения двух параметров (величины прогиба и ускорения, измеряемых одновременно). Предполагается, что измерение именно этого параметра позволит при использовании описанного в статье [11] метода уменьшить ошибку измерений офтальмотонуса, связанную с различной толщиной оболочки.

Целью работы являлось экспериментальное определение внутреннего давления на упругую сферическую оболочку, моделирующую глазное яблоко, при различной толщине оболочки и выяснение наличия связи между толщиной и внутренним давлением. Внутреннее давление предлагается измерять с помощью полупроводникового лазерного автодина и тонометром Маклакова.

Для моделирования деформации глазного яблока под действием воздушной внешней нагрузки использовались резиновые шарики, заполненные гелем, имеющие разную толщину оболочки, но одинаковое внутреннее давление. Возможность выбора такой модели обоснована в работе [11]. Измерение величины внутреннего давления p проводилось по методу Маклакова [8] грузом массой 10 г. Измерение диаметра сегмента сплющивания выполняли по отпечаткам с помощью цифрового штангенциркуля. Толщина оболочек Δl контролировалась цифровым микрометром. Для воздействия на анализируемый участок модели глаза использовался компрессор типа *Roteri RCC*. Частота воздушных импульсов выбиралась из интервала 1–10 Гц. Для измерения деформаций модели глаза при различном давлении использовался полупроводниковый лазер типа *RLD-650* с мощностью излучения до 1 мВт.

В работе [1] отмечалось возможное влияние радиуса кривизны роговицы на результат измерений внутриглазного давления известными методами. Радиус кривизны используемого авторами макета составлял 11 мм, что, по данным работы [6], соответствует среднему значению радиуса кривизны глазного яблока человека. Отметим, что площадь груза массой 10 г, используемого в методе Маклакова, составляет 78,5 мм². Площадь поперечного сечения излучения использовавшегося нами лазера составляла 0,8 мм², т.е. была намного меньше площадей аппланации в известных методах. Таким образом, использование предложенного фазового метода для измерения величины деформации глазного яблока с помощью лазерного автодина приводит к тому, что влияние разброса радиуса кривизны роговицы у разных пациентов на результат измерений при использовании описанного в работе метода оказывается существенно меньшим.

Параметры движения участка сферической оболочки определялись по сигналу полупроводникового лазерного автодина, нормированная переменная составляющая которого может быть представлена в виде

$$S(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} Z(t)\right), \quad (1)$$

где θ – набег фазы автодинного сигнала; λ_0 – длина волны лазерного излучения; t – интервал времени наблюдаемого автодинного сигнала на различных участках движения; $Z(t)$ – функция, описывающая продольные перемещения объекта.

В экспериментальной установке (рисунок) в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный автодин 1. На макет 2 воздействовали воздушным импульсом от компрессора 3. Отраженное излучение возвращалось в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось встроенным фотодетектором. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 4 на аналого-цифровой преобразователь 5 для обработки в ЭВМ 6. При проведении эксперимента воздушные импульсы от компрессора по гибкому шлангу и пластмассовой трубке направлялись на поверхность модели глазного яблока, что позволяло создавать нагрузку оболочки.

Отраженный от поверхности модели сигнал приводил к изменению величины автодинного сигнала полупроводникового лазера. Неизвестные параметры движения $Z(t)$ и a (прогиб и ускорение) можно найти, определив частоту переменной составляющей автодинного сигнала (1) по ее Фурье-спектру. Для этого весь интервал наблюдения автодинного сигнала разбивается на несколько временных окон. В каждом окне находилась скорость движения с использованием выражения

$$v = \frac{1}{2} \cdot \lambda_0 \cdot \nu_n, \quad (2)$$

где v – скорость движущегося участка глаза; ν_n – частота автодинного сигнала для разных временных окон. По рассчитанным значениям скорости определяли величину прогиба и ускорения, с которым движется участок модели глаза.

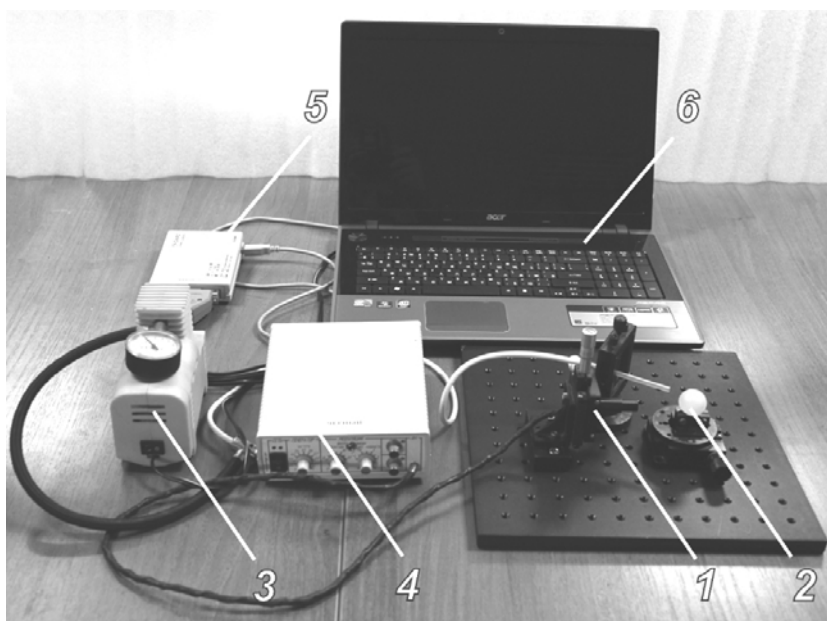


Рис. Экспериментальная установка

Результаты измерений величин прогиба ΔZ и ускорения a

Номер макета	Δl , мкм	p , мм рт. ст.	ΔZ , мкм	a , мкм/с ² $\times 10^{-2}$	$\Delta Z/a$, с ² $\times 10^{-4}$
1	642	40 \pm 3,2	0,6	0,67	0,89
2	550	31 \pm 3,1	0,9	0,86	1,04
3	445	22 \pm 3,4	1,2	1,005	1,19

Результаты измерений величин прогиба ΔZ и ускорения a , характеризующих движение и изменение свойств оболочки, полученные для трех образцов с различной толщиной Δl с помощью полупроводникового лазерного автодина и измерений внутриглазного давления p по методу Маклакова без использования поправочных коэффициентов, учитывающих различие в толщине оболочки, приведены в таблице.

Из приведенных в таблице данных видно, что результаты аппланационной тонометрии (с использованием тонометра Маклакова) существенно зависят от толщины оболочки. При изменении толщины оболочки примерно на 100 мкм отклонение давления от среднего значения составляет $\sim 30\%$, что коррелирует с данными работ [1, 3].

Значение измеренного отношения величины прогиба и ускорения $\Delta Z/a$ изменилось при изменении толщины оболочки примерно на 100 мкм на 14,4%, т.е. полученное отношение слабее зависит от толщины оболочки при измерении внутреннего давления, чем если бы в качестве информационного параметра использовался прогиб оболочки или связанная с ним величина, как это имеет место в серийно выпускаемых пневмотонометрах. Полученная особенность выгодно отличает предложенный метод измерения внутреннего давления.

Таким образом, показано, что использование в качестве информационного параметра отношения величины прогиба и ускорения позволяет уменьшить зависимость измеренного давления от толщины оболочки по сравнению с известными методами. Данную особенность можно использовать для уменьшения ошибок, связанных с зависимостью результатов измерений внутриглазного давления от толщины роговицы глаза, повышая, тем самым, точность проводимых измерений внутриглазного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии // Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. – 2009. – № 4. – С. 30–33.
2. Анисимова С.Ю. Центральная пахиметрия роговицы, внутриглазное давление, фактор напряжения оболочек и состояние поля зрения при открытоугольной глаукоме // Глаукома. – 2006. – № 1. – С. 3–5.
3. Астахов Ю.С., Акопов Е.Л., Потемкин В.В. Влияние толщины и биомеханических свойств роговой оболочки на современные методы измерения внутриглазного давления // VI Всероссийская школа офтальмолога: сб. науч. тр. под ред. проф. Е.А. Егорова. – М., 2007. – С. 28–39.
4. Балашевич Л.И., Качанов А.Б., Новак Я.Н. [и др.]. О влиянии толщины роговицы на показатели внутриглазного давления // Биомеханика глаза: сб. науч. тр. – М., 2005. – С. 119–120.
5. Егоров Е.А., Васина М.В. Внутриглазное давление и толщина роговицы // Глаукома. – 2006. – № 2. – С. 34–36.
6. Ермаков А.М. Напряженно-деформированное состояние склеры и роговицы как ортотропных неоднородных сопряженных сферических оболочек // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 49–60.
7. Костенев С.В., Литасова Ю.А., Черных В.В. Исследование изменений формы и толщины роговицы после *laser in situ keratomileusis (lasik)* // Офтальмохирургия. – 2010. – № 2. – С. 4–7.
8. Любимов Г.А. История развития и биомеханическое содержание измерения внутриглазного давления по методу Маклакова // Глаукома. – 2006. – № 1. – С. 43–49.

9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Измерение механических деформаций упругой сферической оболочки, заполненной несжимаемой жидкостью, с помощью полупроводникового лазерного автодина // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 4. – С. 372–374.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Исследование упругих свойств сферической оболочки с помощью полупроводникового лазерного автодина // ЖТФ. – 2012. – № 6. – С. 156–159.
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Метод измерения внутриглазного давления с помощью полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. – 2012. – № 3. – С. 69–74.
12. Brandt J.D., Beiser J.A., Gordon M.O. [et al.]. Central corneal thickness and measured IOP response to topical ocular hypotensive medication in the ocular hypertension treatment study // Am. J. Ophthalmol. – 2004. – Vol. 138 (5). – P. 717–722.
13. Erickson D.H., Goodwin D., Rollins M. [et al.]. Comparison of dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry and their relationship to corneal properties, refractive error, and ocular pulse amplitude // Optometry. – 2009. – Vol. 80. – P. 169–174.
14. Francis B.A., Hsieh A, Lai M.Y. [et al.]. Effects of corneal thickness, corneal curvature, and intraocular pressure level on goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry // Ophthalmology. – 2007. – Vol. 114 (1). – P. 20–26.
15. Jun Liu, Cynthia J.R. Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement // J. Cataract Refract Surg. – 2005. – Vol. 31 (1). – P. 146–155.
16. Muir K.W., Jin J., Freedman S.F. Central corneal thickness and its relationship to intraocular pressure in children // Ophthalmology. – 2004. – Vol. 111 (12). – P. 2220–2223.
17. Shimmyo M., Ross A.J., Moy A., Mostafavi R. Intraocular pressure, Goldmann applanation tension, corneal thickness, and corneal curvature in Caucasians, Asians, Hispanics, and African-Americans // Am. J. Ophthalmol. – 2003. – Vol. 136. – P. 603–613.
18. Sullivan-Mee M., Halverson K.D., Saxon G.B. [et al.]. The relationship between central corneal thickness-adjusted intraocular pressure and glaucomatous visual-field loss // Optometry. – 2005. – Vol. 76 (4). – P. 228–238.
19. Whitacre M.M., Stein R.A., Hassanein K. The effect of corneal thickness on applanation tonometry // Am. J. Ophthalmol. – 1993. – Vol. 115. – P. 592–596.

EFFECT OF THE ELASTIC SPHERICAL SHELL THICKNESS ON THE RESULTS OF MEASUREMENT OF INTERNAL PRESSURE USING SEMICONDUCTOR LASER AUTODYNE

D.A. Usanov, A.V. Skripal, T.B. Usanova, S.Yu. Dobdin (Saratov, Russia)

The results of the comparison of measurements of internal pressure on the elastic spherical shell, which simulates the eyeball, by means of a non-contact laser autodyne and Maklakov tonometer have been demonstrated. It has been shown that the measured pressure depends on the thickness of the elastic spherical shell, which simulates the eyeball. Measurement by means of the contact tonometer determined that the changes of the shell thickness of about 100 microns correlate with the changes of pressure in 10 mm Hg. Non-contact measurement of pressure was conducted with parameters of the shell part motion under the pneumopulse using the semiconductor laser autodyne. The obtained results showed that the using the ratio of the deflection value to the acceleration, as an information parameter, allows to reduce the error of the internal pressure measurement associated with the different thickness of the shell.

Key words: eye biomechanics, semiconductor laser, autodyne signal, intraocular pressure, eye tonometry, thickness of the shell.

Получено 11 марта 2013