

УДК 535.551

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ПНЕВМООПТИЧЕСКОМ ТОНОМЕТРЕ

К.Ю. Кузнецов, Ю.Т. Нагибин, В.А. Трофимов, С.А. Алексеев

Разработана оптико-электронная методика обработки информации при пневмооптическом бесконтактном измерении внутриглазного давления. Выполнен анализ ограничений при реализации схемы измерения при гармонической деформации роговицы глаза.

**Ключевые слова:** внутриглазное давление, роговица глаза, тонометр, глаукома.

### Введение

Развитие техники медико-биологических исследований предъявляет к используемым приборам особые требования. Наряду с такими параметрами как точность, быстродействие, информативность, предъявляются повышенные требования к объективности и удобству проведения измерений, наглядности отображения информации, компактности и снижению себестоимости измерительной техники.

Одной из актуальнейших задач в области медицины является борьба с широко распространенным заболеванием – глаукомой. Особенность этого заболевания состоит в том, что оно является одной из наиболее частых причин слепоты. Успех лечения зависит от ранней диагностики глаукомы. Но на ранней стадии заболевания, как правило, единственным симптомом, характеризующим его, является внутриглазное давление (ВГД). Для успешного проведения профилактических работ в этом случае необходима техника, обеспечивающая высокую производительность и низкую себестоимость измерений. Эти требования к качеству приборов могут быть реализованы с помощью бесконтактных оптических методов измерений ВГД.

В настоящее время применение получили «бесконтактные» оптико-электронные тонометры [1–5]. В основу этих приборов положен метод пневматической аппланации роговицы, измерение величины которой позволяет определить ВГД. Эти приборы, безусловно, знаменуют собой прогресс в области тонометрии, но из-за пневматического воздействия на глаз их можно назвать бесконтактными лишь условно. Действительно, для изменения формы роговицы глаза требуется достаточно высокое давление в «рабочей» струе воздуха, которое вследствие инерционности процесса измерения вызывает ее избыточную деформацию. Кроме того, аппланация оказывает заметное воздействие на все процессы, происходящие в глазном яблоке, в том числе и на измеряемую величину. Одним из свойств таких приборов является необходимость активного участия пациента в процессе измерения, что требует удовлетворительного качества его зрения и состояния роговицы. В противном случае проведение измерений становится невозможным.

Рассмотренные выше недостатки тонометров определяют необходимость поиска новых методик измерения ВГД. В связи с этим особый интерес могут представлять исследования в разработке пневмооптических методов измерения ВГД.

### Оптико-электронная методика обработки информации

Пусть на роговицу глаза падает световой пучок под углом  $\varphi_0$  к оптической оси глаза (рис. 1). Можно показать, что угол отражения  $\beta$  зависит от  $\varphi_0$ , радиуса кривизны роговицы  $R$  и координаты  $y$  точки падения:

$$\beta = \varphi_0 + 2y/R.$$

При пневматическом воздействии атмосферное давление  $p_a$  вблизи поверхности роговицы изменяется (увеличивается) на величину  $\Delta p_a$ , т.е.  $p_a = p_{a0} + \Delta p_a$ , где  $p_{a0}$  – атмосферное давление без воздействия. Это приводит к соответствующему изменению радиуса кривизны роговицы на величину  $\Delta R$ .

В работе [6] показано, что малое изменение угла  $\Delta\beta$  равно

$$\Delta\beta = -\frac{\Delta p_a}{\sigma} \left[ y - \frac{\varphi_0(d^2 - y^2)}{4\sigma} P \right], \quad (1)$$

где  $P$  – значение ВГД;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $d$  – координата падения светового пучка на роговицу после деформации.

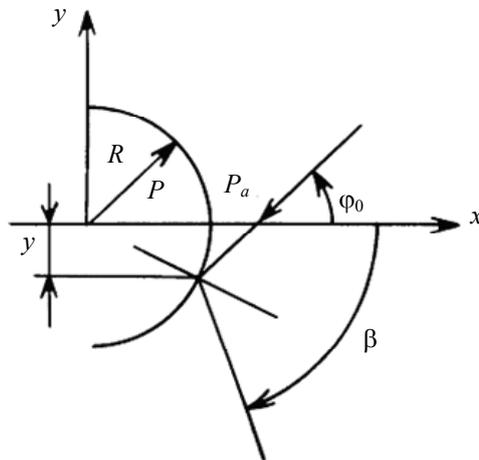


Рис. 1. Схема падения светового пучка на роговицу глаза:  $\varphi_0$  – угол падения;  $\beta$  – угол отражения;  $R$  – радиус кривизны поверхности роговицы;  $y$  – координата падения светового пучка на роговицу глаза

Предположим, что на роговицу глаза действует периодическое пневматическое воздействие (например, гармоническое с частотой  $\omega$ ), т.е. атмосферное давление вблизи поверхности роговицы изменяется во времени по закону

$$P_a = P_{a0} \sin \omega t.$$

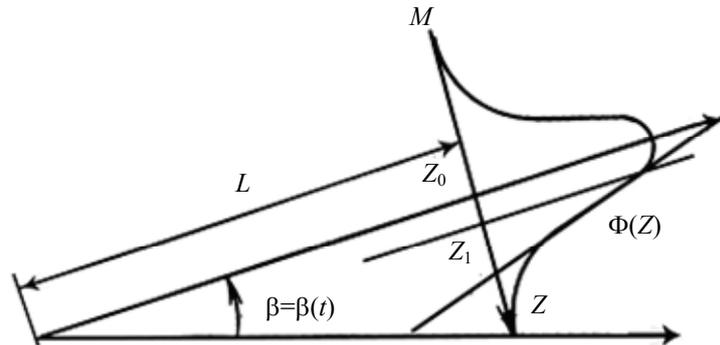


Рис. 2. Распределение интенсивности отраженного от роговицы света в плоскости  $M$ , удаленной от роговицы на расстояние  $L$

Пусть наблюдается распределение интенсивности света  $\Phi(Z)$ , отраженного от роговицы, в плоскости  $M$ , удаленной от поверхности роговицы на расстояние  $L$  (рис. 2). В плоскости  $M$  расположен фотоприемник с установленной перед ним щелевой диафрагмой, расположенной на расстоянии  $Z_1$  от центра  $\Phi(Z)$  (на участке квазилинейного спада функции  $\Phi(Z)$ , рис. 2). Обозначим функцию пропускания диафрагмы  $\varphi(Z)$ . Тогда сигнал фотоприемника будет равен

$$U = S \int_{-\omega}^{\omega} \Phi(Z) \varphi(Z) dZ, \quad (2)$$

где  $S$  – чувствительность фотоприемника. На участке квазилинейного спада функцию  $\Phi(Z)$  (рис. 2) аппроксимируем линейной зависимостью вида

$$\Phi(Z) = A - kZ,$$

где  $k$  – угловой коэффициент;  $A$  – коэффициент линейного смещения, а функцию  $\varphi(Z)$  – дельта-функцией

$$\varphi(Z) = \delta(Z - Z_1).$$

Тогда из (2) следует:

$$U = S \int_{-\omega}^{\omega} (A - kZ) \delta(Z - Z_1) dZ = \eta(A - kZ_1).$$

При периодическом изменении  $p_a$  смещение всех точек распределения интенсивности света  $\Phi(Z)$  будет равно

$$\Delta Z_0 = \Delta Z_1 \approx L\Delta\beta = L\Delta\beta_0 \sin\omega t,$$

где  $\Delta\beta_0$  – амплитуда угловых колебаний отраженного от роговицы света. Тогда, очевидно, сигнал фотоприемника будет равен

$$U = S(A - k(Z_1 + \Delta Z_1)) = S(A - k\Delta Z_1 - kL\Delta\beta_0 \sin\omega t),$$

т.е. переменная составляющая сигнала  $U(t)$

$$U(t) \sim SkL\Delta\beta_0 \sin\omega t.$$

Соответственно амплитуда сигнала  $U_0$  равна

$$U_0 = SkL\Delta\beta. \tag{3}$$

С учетом (1) это уравнение принимает вид

$$U_0 = -SkL \frac{\Delta p_a}{\sigma} \left[ y - \frac{\varphi_0(d^2 - y^2)}{4\sigma} P \right].$$

Таким образом, амплитуда сигнала фотоприемника  $U_0$  пропорциональна величине ВГД ( $P$ ).

Очевидно, что максимальное значение амплитуда сигнала примет при максимальном значении  $k$ , т.е. при положении щелевой диафрагмы на участке наибольшего спада распределения интенсивности света  $\Phi(Z)$  (рис. 2). Для этого диафрагма и фотоприемник устанавливаются с возможностью перемещения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения отраженного от роговицы луча света. Следовательно, по амплитуде сигнала фотоприемника  $U_0$ , соответствующей амплитуде угловых колебаний отраженного роговицей пучка света, можно судить о величине ВГД.

### Схема измерения ВГД

Примером возможной практической реализации рассмотренной оптико-электронной методики измерения ВГД может служить схема, изображенная на рис. 3. Центр поверхности роговицы глаза освещается узким пучком света от источника 1, направленным под углом  $\varphi_0$  к оптической оси глаза. Периодическое пневматическое воздействие на роговицу глаза осуществляется с помощью устройства, выполненного в виде сужающегося полого канала 5, выходное окно которого расположено вблизи роговицы, а входное окно совмещено с плоскостью диффузора низкочастотного акустического динамика 6, установленного в корпусе 7 и соединенного с генератором низкочастотных сигналов 8. Перемещением диафрагмы 2 и фотоприемника 3 перпендикулярно направлению распространения отраженного от роговицы пучка можно добиться получения максимального значения амплитуды регистрируемого сигнала. С помощью регистрирующего устройства 4 измеряется значение амплитуд полученного сигнала при действии периодического пневматического воздействия на роговицу глаза. Измеренные значения пропорциональны амплитудам угловых колебаний  $\Delta\beta$ , отраженного от роговицы света (3). По предварительно построенной градуировочной кривой и среднему значению амплитуды измеренных сигналов можно определить искомое значение ВГД.

Таким образом, процедура измерения ВГД безопасна для глаза, так как пневматическое воздействие значительно слабее известных примеров [1–4], а сами измерения точнее, поскольку величина ВГД определяется по большому числу значений измеренных амплитуд электрического сигнала фотоприемника. При частоте пневматического воздействия, равной 40 Гц, и измерении 50 значений ВГД требуется 1,25 секунды.

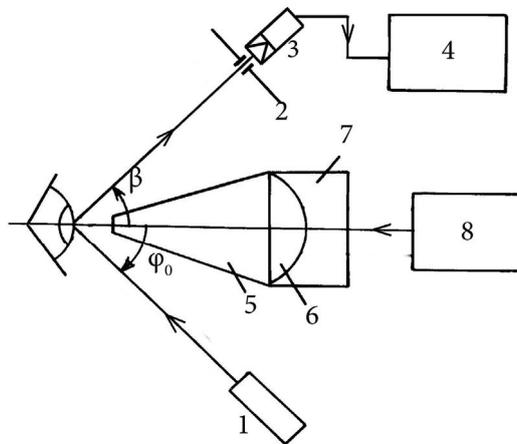


Рис. 3. Функциональная схема измерения ВГД

### **Заключение**

В настоящей работе рассмотрена оптико-электронная методика обработки светового сигнала, отраженного от роговицы глаза, при использовании бесконтактного способа измерения ВГД. При этом глаз подвергается периодическому пневматическому внешнему воздействию, что приводит к периодической деформации роговицы и соответствующему изменению угла отражения зондирующего луча. Показано, что переменная составляющая сигнала на выходе фотоприемника, соответствующая амплитуде угловых колебаний отраженного роговицей пучка света, будет пропорциональна величине ВГД, а максимальное значение амплитуды этого сигнала соответствует оптимальному положению щелевой диафрагмы на участке наибольшего спада распределения интенсивности света.

### **Литература**

1. Jorge J., Gonzales-Meijome J.M., Diaz-Rey J.A. et al. Clinical performance of non-contact tonometry by Reichert AT 550 in glaucomatous patients // *Ophthalmic and Physiological Optics*. – 2003. – V. 23. – № 6. – P. 503–506.
2. Voshita T., Kobajashi A., Takahashi M. et al. Intraocular pressure by non-contact tonometry over an amniotic membrane patch in humans // *American Journal of Ophthalmology*. – 2006. – V. 141. – № 3. – P. 508 – 511.
3. Stamper M., Robert I. A history of intraocular pressure and its measurement // *Optometry and Vision Science. (The Journal of the American Academy of Optometry)*. – 2011. – V. 88. – № 1. – P. E16–E28.
4. Liang S.Y., Lee G.A., Shields D. Self-tonometry in glaucoma measurement – past, present and future // *Survey of Ophthalmology*. – 2009. – V. 54. – № 4. – P. 450–462.
5. Patent 7481767 USA. Method and apparatus for determining true intraocular pressure / M. Luce, A. David. January 27, 2009.
6. Патент 2067845 РФ. Бесконтактный способ измерения внутриглазного давления и бесконтактный тонометр / В.А. Трофимов, А.Л. Дмитриев, Ю.Т. Нагибин, В.Т. Прокопенко, В.В. Сальников // *Бюлл. Открытия, изобретения*. – 1996. – № 29.

- Кузнецов Константин Юрьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, skuznetsov@gmail.com
- Нагибин Юрий Тихонович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nagibin77@mail.ru
- Трофимов Владимир Анатольевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, troftu@mail.ru
- Алексеев Сергей Андреевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, asast@mail.ru