

## Формирование и представление результата измерения внутриглазного давления тонометром динамического типа

### Аннотация

Рассмотрены вопросы исключения субъективного фактора из процесса формирования результата измерения тонометром внутриглазного давления динамического типа. Проведен анализ неопределенности результатов измерения, полученных при помощи устройства для калибровки тонометра динамического типа. Предложена процедура формирования и представления на дисплее прибора результатов измерения внутриглазного давления.

### Введение

В работе [1] дано обоснование принципа построения тонометра внутриглазного давления динамического типа, заключающегося в измерении периода свободных колебаний динамической системы, образованной элементами тонометра и глаза. В настоящее время серийно выпускается тонометр ТВГД-02, основанный на этом принципе. Опыт применения данных приборов в медицинской практике [2], [3] показал их достоинства, в частности неинвазивность, оперативность получения результата, удобство применения в детских клиниках. В то же время выявились вопросы, решение которых необходимо для дальнейшего совершенствования таких тонометров и методики их применения.

Особенность конструктивного исполнения чувствительного элемента тонометров типа ТВГД (вибратора) заключается в том, что его подвижный элемент (шток), находящийся при выполнении измерения внутриглазного давления (ВГД) в контакте с веком пациента, должен свободно перемещаться вдоль продольной оси внутри катушки индуктивности. При этом на выходах катушки появляется электрический сигнал, период повторения которого несет информацию о значении ВГД. Перемещение штока обеспечивается его подвеской на двух мембранных пружинах, закрепленных на противоположных торцах корпуса катушки индуктивности [1]. В процессе измерения шток вибратора должен быть расположен строго вертикально.

На практике это не всегда обеспечивается. Поскольку измерение ВГД проводится оператором без применения каких-либо технических средств, фиксирующих положение тонометра относительно пациента, то возможны покачивания прибора, его дрожание, что приводит к отклонению прибора от вертикали. В эти моменты могут появиться сбойные результаты. Наличие сбойных результатов влияет на результат измерения и может привести к неопределенности измерения, превышающей предельно допустимую. В соответствии с руководством по эксплуатации [4] пределы допустимой абсолютной неопределенности результата измерения ВГД составляют  $\pm 2$  мм рт. ст. в диапазоне измерения 7...23 мм рт. ст. и  $\pm 5$  мм рт. ст. в диапазоне измерения 23...50 мм рт. ст.

Для исключения влияния на результат измерения силы тяжести подвижной части вибратора (штока) алгоритм работы тонометра ТВГД-02 предусматривает парное измерение значений периодов свободных колебаний системы «вибратор-глаз». Для первого измерения система «вибратор-глаз» выводится из состояния равновесия внешней силой (подачей импульса тока соответствующей полярности в катушку индуктивности вибратора) в направлении, противоположном действию силы тяжести, а для второго измерения – в направлении по действию силы тяжести. Для последующей обработки используется среднее значения результатов указанных измерений.

Шестнадцать последовательно полученных значений периодов свободных колебаний усредняются. По этим усредненным значениям периодов свободных колебаний системы «вибратор-глаз» рассчитывается значение ВГД  $P_{ВГД}$ , которое вы-

водится на дисплей тонометра в качестве результата измерения ВГД. Из-за указанных выше особенностей использования тонометра выведенный результат может отличаться от реального значения ВГД на величину, превышающую допустимую абсолютную неопределенность измерения.

**Целью работы** является совершенствование алгоритма формирования результата измерения внутриглазного давления динамическими тонометрами типа ТВГД-02 для исключения субъективных составляющих неопределенности измерения и повышения достоверности значений внутриглазного давления, выводимых на дисплей прибора.

### Материалы и методы

Для оценки надежности результата измерения стандартом [5] рекомендуется определять кроме стандартной неопределенности еще и расширенную неопределенность.

Для подтверждения стабильности показаний тонометра и получения достоверных исходных данных для разработки алгоритма формирования результата измерения ВГД было выполнено 29 серий измерений периодов свободных колебаний системы «вибратор-мера ВГД» с использованием мер внутриглазного давления [6], предназначенных для настройки и контроля правильности показаний тонометра в контрольных точках.

В комплекте мер ВГД предусмотрены устройства для контрольных точек 7, 16, 23 и 50 мм рт. ст. Такие контрольные точки предусмотрены стандартом [7]. В эксперименте использовались устройства для контрольных точек 50 и 7 мм рт. ст. Выбор меры «50 мм рт. ст.» обусловлен тем, что при увеличении внутриглазного давления период свободных колебаний системы «вибратор-глаз» уменьшается. Следовательно, при прочих равных условиях относительная погрешность измерения внутриглазного давления увеличивается при увеличении ВГД. Таким образом, используя меру «50 мм рт. ст.», получим наихудший вариант в оценке неопределенности измерения внутриглазного давления. Мера «7 мм рт. ст.» соответствует нижней границе измеряемого внутриглазного давления. Если на границах диапазона измерений требования по обеспечению предельно допустимой неопределенности измерения будут выполнены, то при линейной характеристике преобразования средства измерения они будут выполнены и во всем диапазоне.

Таблица 1

Градуировочная характеристика системы «вибратор-мера ВГД»

Номер контрольной точки $m$	1	2	3	4
$T_{K_m}$ , мкс	7172	6724	6420	5320
$P_{K_m}$ , мм рт. ст.	7	16	23	50

Соответствие между расчетным значением внутриглазного давления и периодом свободных колебаний системы «вибратор-глаз» («вибратор-мера ВГД») определяется градуировочной характеристикой, приведенной в табл. 1, где  $P_{K_m}$  – значе-

ние ВГД для контрольной точки  $m$ ;  $T_{k_m}$  – соответствующий период свободных колебаний. Между контрольными точками зависимость между ВГД и периодом свободных колебаний аппроксимирована линейной функцией.

В каждом  $j$ -м измерении  $i$ -й серии в соответствии с существующим алгоритмом работы тонометра определялся средний период  $T_{ji}$  колебаний после вывода системы «вibrator-мера ВГД» из состояния равновесия внешней силой (подачей импульса тока в катушку индуктивности вибратора):

$$T_{ji} = \frac{T_{ji}^+ + T_{ji}^-}{2}, \quad (1)$$

где  $T_{ji}^+$  – значение периода свободных колебаний после вывода системы из состояния равновесия внешней силой в направлении, противоположном действию силы тяжести;  $T_{ji}^-$  – значение периода свободных колебаний после вывода системы из состояния равновесия внешней силой в направлении по действию силы тяжести;  $j = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  – число пар измерений в каждой серии (из приведенного выше описания алгоритма работы тонометра  $N = 16$ );  $i = 1, 2, \dots, I$ , где  $I$  – количество серий измерений ( $I = 29$  серий).

Далее с использованием градуировочной характеристики (табл. 1) рассчитывалось соответствующее периоду  $T_{ji}$  значение внутриглазного давления  $P_{ji}$ .

Для диапазона ВГД 7 мм рт. ст. значение давления определяется как

$$P7_{ji} = P_{K_1} + \frac{T_{K_1} - T_{ji}}{T_{K_1} - T_{K_2}} (P_{K_2} - P_{K_1}), \quad (2)$$

где  $T_{k_m}$ ,  $P_{k_m}$  – значения периода свободных колебаний и внутриглазного давления в контрольных точках градуировочной характеристики соответственно (табл. 1).

Для диапазона ВГД 50 мм рт. ст. значение давления в каждой серии измерений определяется как

$$P50_{ji} = P_{K_3} + \frac{T_{K_3} - T_{ji}}{T_{K_3} - T_{K_4}} (P_{K_4} - P_{K_3}). \quad (3)$$

В соответствии со значениями  $T_{k_m}$  периодов колебаний, приведенных в табл. 1, для получения значения усредненного периода свободных колебаний в одном измерении требуется время не более 15 мс. Для получения одного расчетного значения внутриглазного давления в соответствии с алгоритмом работы тонометра (последовательное выполнение 16 пар измерений) требуется порядка 240 мс, причем измерение и формирование новых значений ВГД будут непрерывно продолжаться до тех пор, пока тонометр находится в контакте с веком (в эксперименте – с мерой ВГД). Таким образом, быстрое действие тонометра позволяет выполнить в минуту до 250 измерений внутриглазного давления.

Несмотря на возможность проведения большого количества серий измерений в одном эксперименте (установив тонометр на меру ВГД только один раз и зафиксировав его), каждая из 29 серий измерений проводилась независимо от предыдущих. Этим имитировались действия оператора при проведении измерения ВГД у разных пациентов. Для исключения субъективной составляющей неопределенности измерения при выполнении каждой очередной серии тонометр механически фиксировался относительно меры ВГД.

## Результаты

В каждой серии измерений определялись оценки:

- среднего

$$Pcp_i = \frac{1}{N} \sum_j P_{ji}; \quad (4)$$

- среднего квадратического отклонения

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (P_{ji} - Pcp_i)^2}{N-1}}; \quad (5)$$

- стандартной неопределенности измерения

$$u_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

Из средних значений  $Pcp_i$  всех серий выбирались минимальное  $Pcp_{\min}$  и максимальное  $Pcp_{\max}$  значения и соответствующие им значения стандартной неопределенности  $u$ .

Для расчета расширенной неопределенности использовались данные таблицы  $t$ -распределения Стьюдента при числе степеней свободы  $N - 1 = 15$  и уровне доверия  $p = 0,95$  [5]:  $t_p(v) = t_{0,95}(15) = 2,13$ .

Расширенная неопределенность измерения определялась как

$$U = t_{\alpha}(v)u. \quad (7)$$

Предельные отклонения  $\Delta$  результатов измерения от номинала в «минус» и «плюс» определялись в соответствии с выражениями

$$-\Delta = Pcp_{\min} - U - P_{\text{ном}};$$

$$\Delta = Pcp_{\max} + U - P_{\text{ном}},$$

где  $P_{\text{ном}}$  принималось равным 7 мм рт. ст. для меры «7 мм рт. ст.» и 50 мм рт. ст. для меры «50 мм рт. ст.».

Результаты расчетов минимального и максимального отклонений показаний тонометра от соответствующей меры, полученные на основе обработки данных эксперимента, приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты обработки данных эксперимента

Параметр, мм рт. ст.	Мера «7 мм рт. ст.»	Мера «50 мм рт. ст.»
$P_{\min}$	7,39	49,38
$P_{\max}$	7,77	51,31
$u_{\min}$	0,05	0,41
$u_{\max}$	0,28	0,75
$U_{\min}$	0,11	0,87
$U_{\max}$	0,6	1,6
$\Delta_{\min}$	- 0,15	- 1,49
$\Delta_{\max}$	1,06	2,8

Приведенные результаты показывают, что расширенная неопределенность измерения ВГД на образцовой мере и отклонения от номинала ни в одной из серий не превысили предельно допускаемую неопределенность измерений, указанную в руководстве по эксплуатации на прибор [4]:  $\pm 2$  мм рт. ст. для диапазона 7...23 мм рт. ст. и  $\pm 5$  мм рт. ст. для диапазона 23...50 мм рт. ст.

Как отмечалось выше, результат измерения ВГД серийным прибором формируется путем усреднения 16 промежуточных значений. Отклонение тонометра от вертикали в момент измерения может дать сбойный результат, который при усреднении может привести к изменению измеренного значения ВГД и отличию его от истинного значения на величину, превышающую допускаемую неопределенность измерения ВГД. Этот факт в настоящее время никак не отражается на выводимом результате, поэтому при дальнейшей интерпретации результата измерения могут быть сделаны неверные диагностические заключения.

Основываясь на результатах эксперимента, подтверждающих стабильность в допустимых пределах показаний прибора, можно сделать вывод о том, что на дисплей прибора целесообразно выводить наряду с измеренным значением ВГД, определяемым формулой (4), еще и расчетное значение [формула (7)] расширенной неопределенности:

$$P_{\text{изм}} \pm U \text{ (мм рт. ст.)}$$

Появление на экране прибора такой комбинации будет свидетельствовать о корректности измерения ВГД.

## Заключение

Таким образом, опираясь на данные проведенных исследований, можно предложить следующую процедуру формирования результата измерения внутриглазного давления тонометром динамического типа и вывода результата измерения на дисплей прибора.

1. Выполнить последовательно  $N$  раз по два измерения периода свободных колебаний системы «вибратор-глаз». Одно измерение при предварительном отклонении системы «вибратор-глаз» от состояния устойчивого равновесия в направлении, противоположном направлению действия силы тяжести, и другое – по направлению действия силы тяжести.

2. Для каждой  $j$ -й пары измерений ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) усреднить полученные результаты в соответствии с выражением (1).

3. Определить диапазон, в который попадает значение периода  $T_j$  (табл. 1).

4. Рассчитать значение внутриглазного давления  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) по формулам, аналогичным выражениям (2) и (3).

5. Запомнить каждое из полученных значений  $P_j$ .

6. Определить среднее значение  $P_{ср}$  в соответствии с выражением (4).

7. Вычислить стандартную неопределенность измерения  $u$  в соответствии с выражениями (5) и (6).

8. Вычислить расширенную неопределенность измерения  $U$  в соответствии с формулой (7).

9. Сравнить полученное значение  $U$  расширенной неопределенности измерения с допускаемой неопределенностью  $\Delta_{доп}$  для данного диапазона ВГД ( $\pm 2$  мм рт. ст. для диапазона 7...23 мм рт. ст. и  $\pm 5$  мм рт. ст. для диапазона 23...50 мм рт. ст.).

10. Если  $U \leq \Delta_{доп}$ , то на дисплей прибора вывести:  $P_{ВГД} \pm U$  мм рт. ст., где  $P_{ВГД} = P_{ср}$  из п. 6, иначе повторить пп. 1...9.

## Список литературы:

1. Дыкин В.И., Иванищев К.В., Корнев Н.П., Михеев А.А., Соломаха В.Н. Тонометр внутриглазного давления динамического типа // Медицинская техника. 2013. № 3. С. 18-21.

2. Макашова Н.В., Иванищев К.В. Клинические результаты транспальпебральной тонометрии // Глаукома. Журнал НИИ глазных болезней РАМН. 2013. № 2. С. 42-46.
3. Тугеева Э.З., Воронцова Т.Н. Возможности применения транспальпебрального тонометра ТВГД-01 в детской офтальмологической практике // Клиническая офтальмология. 2013. № 2. С. 61-63.
4. ТВГД-02 Руководство по эксплуатации (электронный ресурс) / <http://files.elamed.com/tvgd-02-rukovodstvo.pdf> (дата обращения 24.01.2021).
5. ГОСТ Р 54500.3–2001/Руководство ИСО-МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
6. Дыкин В.И., Иванищев К.В., Корнев Н.П., Михеев А.А., Соломаха В.Н. Устройство для калибровки тонометра динамического типа ТВГД-01 // Медицинская техника. 2013. № 4. С. 33-37.
7. ГОСТ Р ИСО 8612–2010 Приборы офтальмологические. Тонометры.

Михаил Юрьевич Даниченко,  
ведущий инженер,  
АО «Елатомский приборный завод»,  
г. Елатьма, Рязанская область,  
Анатолий Александрович Михеев,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра автоматизированных  
систем управления,  
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
им. В.Ф. Уткина»,  
г. Рязань,  
e-mail maa0312@yandex.ru

В.Г. Никитаев, А.Н. Проничев, О.Б. Тамразова, В.Ю. Сергеев,  
М.А. Соломатин, О.А. Медведева, В.С. Козлов

## Модель распознавания бесструктурных гиперпигментированных областей в онкодерматологии

### Аннотация

Представлена разработка модели распознавания бесструктурных гиперпигментированных областей на изображениях новообразований кожи. Решение указанной задачи важно для диагностики быстропрогрессирующего онкологического заболевания – меланомы кожи. В качестве исходных данных использовались изображения, полученные с применением цифрового оптического прибора – дерматоскопа РДС-2. Выделение областей гиперпигментации на изображениях новообразований кожи рассмотрено как ключевой этап решения поставленной задачи. На основе предложенной модели разработана программа по распознаванию исследуемых областей новообразования в онкодерматологии. Точность распознавания по результатам проведенного эксперимента составила 82 %. Предложенная модель может быть рекомендована к использованию в разработке систем поддержки принятия врачебных решений при диагностике меланомы.

### Введение

Опухоли кожи уже не первый год входят в список самых распространенных онкологических заболеваний в мире. На долю меланомы кожи, которая по сегодняшний день остается причиной более 80 % смертей в группе новообразований кожи, приходится 3...5 % от всех первичных злокачественных опухолей кожи. Причем во всех регионах мира констатируют ус-

тойчивый рост заболеваемости меланомой [1]. Преимущества органосохраняющих технологий, обуславливающих тенденции современной медицины, стали причиной стремительного развития новых неинвазивных методов исследования морфологии тканей. К наиболее распространенным из них относится дерматоскопия [2].

Дерматоскопия кожи – неинвазивный метод диагностики пигментных образований, позволяющий посредством визуа-