

УДК 531/534: [57+61]

СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ РОГОВИЦЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

Е. Слесорайтите

Department of Signal Processing, Kaunas University of Technology, 50 Studentų street, LT-51368, Kaunas, Lithuania, e-mail: sliesoraityte@yahoo.com

Кафедра обработки сигналов, Каунасский технологический университет, Каунас, Литва

Аннотация. Величина внутриглазного давления имеет большое значение в диагностике различных форм глаукомы. В связи с этим очень важным является определение нормальных и патологических показателей внутриглазного давления, изучение влияния различных параметров глаза на величину внутриглазного давления. Анализ расчетных и экспериментальных данных, проведенный в статье, показывает, что значения внутриглазного давления, измеренные аппланационным тонометром Гольдмана, увеличиваются по мере увеличения толщины роговицы. Увеличение срединной толщины роговой оболочки на 10 мкм вызывает повышение измеряемого внутриглазного давления на 0,63 мм рт. ст.

Ключевые слова: биомеханика глаза, внутриглазное давление, толщина роговицы в центральной зоне, гипертензия.

Введение

Оценка влияния толщины роговицы в центральной зоне на показатели внутриглазного давления у пациента, несомненно, имеет большое значение в практике врача. Расчет истинного давления на основе данных тонометрии в целом правилен как среднестатистический показатель, однако для каждого конкретного случая недостаточно достоверен. Тонometr Гольдмана полвека считался одним из самых действенных и надежных классических методов измерения внутриглазного давления [3]. Тонometr Гольдмана является, как и тонometr Маклакова, тонометром аппланационного типа. Идея аппланационной тонометрии состоит в том, что для нагружения роговицы используется груз с плоским основанием. В тонометре Маклакова используется груз определенной величины (обычно 5 или 10 г) и регистрируется диаметр зоны контакта груза с роговицей (т.к. роговица имеет форму, близкую к сферической, площадь контакта груза и роговицы близка к кругу). По измеренному диаметру оценивают внутриглазное давление с помощью специальных таблиц, которые прилагаются к прибору. При аппланационной тонометрии по Гольдману измеряется сила, которая требуется, чтобы сделать плоской определенную часть роговицы. Диаметр зоны контакта всегда постоянен и равен 3,06 мм. Эта величина выбрана в связи с тем, что, как предполагают офтальмологи, обеспечивает соотношение, когда внешнее давление на роговицу в 1,0 г соответствует внутриглазному давлению в 10 мм рт. ст. Так как сила аппланации зависит от

внутриглазного давления, то инструмент откалиброван таким образом, чтобы давление можно было прочесть на указателе тонометра. По-видимому, первое теоретическое обоснование аппланационной тонометрии принадлежит Имберту (*Imbert*, 1885). Он предположил, что имеет место соотношение $P = W / S$, где P – внутриглазное давление, W – вес тонометра, S – площадь зоны контакта. Теоретически этот закон применим к бесконечно тонким, мягким оболочкам. Оболочки глаза имеют конечную толщину, и очевидно, что величина силы, которую надо приложить для образования определенной зоны контакта роговицы и тонометра, зависит не только от давления внутри оболочки, но и от ее толщины. В тонометрии глаза постоянно проводится поиск новых измерительных приборов [9], чтобы уменьшить ошибку, вызванную методами калибровки (исправления фактически измеренных величин) [4–6, 8, 11–14]. Создаются также новые математические модели, описывающие аппланационную тонометрию [1, 2]. В данной работе представлены дополнительные статистический и численный анализы влияния толщины роговицы на показатели внутриглазного давления по Гольдману.

1. Статистическое моделирование

Были обследованы две группы пациентов – группа здоровых пациентов и группа людей с гипертензией. Всего было исследовано 99 глаз, из них 65 глаз с гипертензией: 23 женщины (23 правых глаза и 18 левых глаз) и 13 мужчин (13 правых глаз и 11 левых глаз). Группа здоровых пациентов состояла из 34 человек (11 женщин и 6 мужчин). Возраст всех пациентов от 51 до 79 лет. Разброс возраста субъектов исследования охватывал границы максимального риска для развития глаукомы.

В процессе исследования учитывались следующие параметры: возраст человека, пол, соматические заболевания, местные способы лечения, глазные болезни и травмы, визуальная четкость и коррекция, сведения о глазном дне, внутриглазное давление, толщина роговицы в центральной оптической зоне. Все исследования проводились с 9 до 11 часов утра с целью минимизации колебаний рассматриваемых параметров.

Измерения внутриглазного давления осуществлялись с использованием тонометра Гольдмана (модель *AT 900 C/M*). Средняя величина трех тонометрических показаний (в мм рт. ст.) на каждый глаз использовалась для последующего анализа.

Измерения срединной толщины роговицы были выполнены посредством ультразвукового пахиметра – прибора, измеряющего толщину роговицы (пахиметрия) – (*Quantel medical BVI France*, карманная модель, тип *BF*, II класс), регистрируемые с систематической ошибкой прибора ± 5 мкм. Средняя величина трех измерений срединной толщины роговицы (в мкм) использовалась для дальнейшего анализа. Статистический анализ проводился с помощью программы “*SPSS*, версия 12.0“. Уровень достоверности исследования (P) был принят за 0,95, а уровень значимости, соответственно, (p) 0,05.

Проанализировано рассеивание параметров внутриглазного давления, соответствующего группе с глазной гипертензией, против группы со здоровыми глазами. В группе с глазной гипертензией средняя величина внутриглазного давления 21,69, стандартное отклонение 0,164 мм рт. ст., во второй группе, соответственно, было 16,44 и 2,15 мм рт. ст.

Измеренная срединная толщина роговицы: в группе с глазной гипертензией – $594,65 \pm 16,91$ мкм; в группе со здоровыми глазами – $530,85 \pm 12,80$ мкм ($p < 0,01$). Использование t -статистики Стьюдента показало отсутствие влияния пола как на внутриглазное давление, так и на величину толщины роговицы.

Можно утверждать, что пол не является клинически значимым фактором проявления глазной гипертензии.

Была выдвинута гипотеза, что центральная зона роговицы при диагнозах глазной гипертензии на 10% толще, чем у субъектов со здоровыми глазами. Эта гипотеза была проверена с помощью t -статистики Стьюдента.

Анализ корреляционных связей глазной гипертензии, пахиметрии (измерения толщины роговицы), тонометрии и возрастных параметров показал высокую положительную корреляцию между внутриглазным давлением, измеренным тонометром Гольдмана, и данными пахиметрии ($r = 0,648$; $p < 0,001$) среди страдающих гипертензией. С помощью уравнения регрессии было получено, что приращение на 10 мкм срединной толщины роговицы дает повышение показателей измеряемого внутриглазного давления на 0,63 мм рт. ст.

2. Численное моделирование

В первом приближении глаз можно рассматривать как биомеханическую систему, состоящую из эластичной наружной оболочки сферической формы и жидкого несжимаемого содержимого. Фактически роговица находится под постоянным внутренним давлением P , которое у здоровых людей варьируется от 8 мм рт. ст. до 20 мм рт. ст. (1,064 кПа – 2,66 кПа). Измеренное внутреннее давление P в случаях глазной гипертензии превышает 21 мм рт. ст. (2,793 кПа). Проведенные автором эксперименты показали, что пограничное значение внутриглазного давления между нормальным состоянием и гипертензией согласно измерениям по тонометру Гольдмана составляет 21,7 мм рт. ст. (2,89 кПа).

Представляется важным получить при неизменном внутриглазном давлении $P = 2,89$ кПа зависимость величины силы давления тонометра Гольдмана от толщины роговицы. Интересно также при тех же условиях построить зависимость величины апикального смещения (смещение самой высокой центральной точки) роговицы от толщины роговицы. В качестве модели роговицы рассматривается изотропная оболочка (модуль упругости роговицы $E = 10,3$ МПа.) радиуса 7,77 мм [7, 10]. Расчеты производились в прикладной программе “*MATRIX FRAME*”. Разбиение оболочки проводилось по координатным линиям сферической системы координат (40 элементов вдоль меридиана и 100 элементов вдоль параллели). Задавалась величина силы, прикладываемой к плоскому штампу, и определялась зона контакта. Так как зона контакта плоского штампа и оболочки увеличивается при увеличении прикладываемой силы, то, используя метод пристрелки, можно определить и величину силы, необходимую для заданной зоны контакта. На рис. 1 представлен пример полученной деформации роговицы при толщине $t = 0,6$ мм. Различные оттенки характеризуют распределение напряжений в оболочке.

На рис. 2 представлена зависимость апикального смещения (a) в зависимости от толщины роговицы (t) при внутриглазном давлении, равном 21,7 мм рт. ст. Анализ данных показывает, что данная зависимость носит слегка нелинейный характер.

Расчетные и экспериментальные данные, характеризующие давление, измеренное по тонометру Гольдмана (давление, которое необходимо приложить, для того, чтобы зона контакта тонометра и роговицы имела диаметр 3,06 мм), представлены на рис. 3.

Рассеивание экспериментальных данных можно объяснить факторами неоднородности роговицы, индивидуальными изменениями коэффициента эластичности, систематической ошибкой измерений внутриглазного давления. Но, как

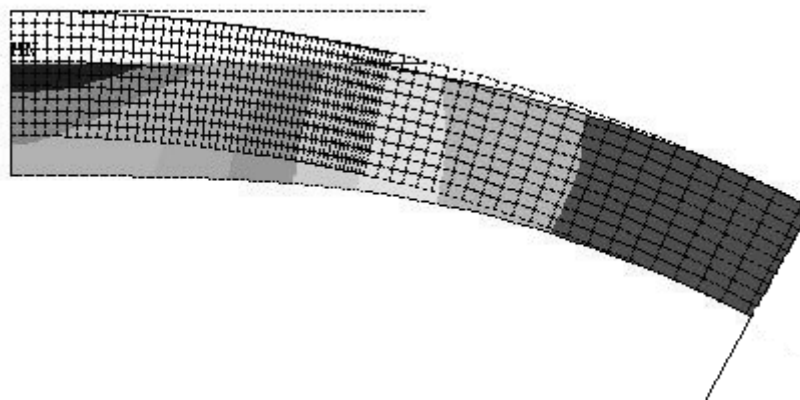


Рис. 1. Центральное сечение деформированной оболочки

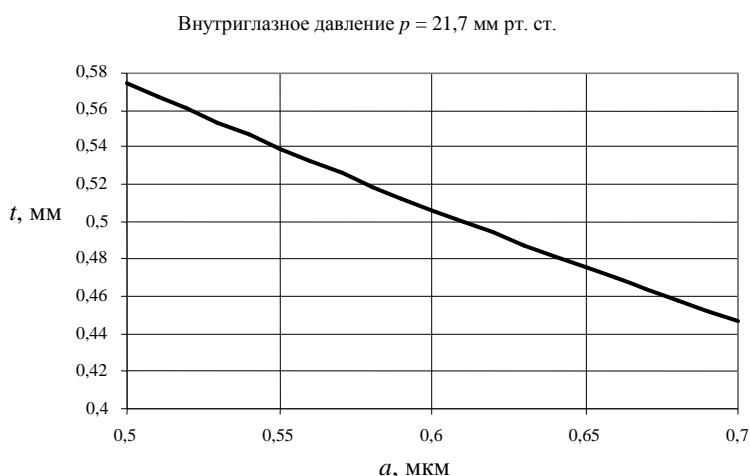


Рис. 2. Уменьшение апикального смещения с ростом толщины роговицы

видно из рис. 3, можно построить регрессионную модель, дающую хорошее приближение расчетных данных к экспериментальным.

Изменение толщины роговицы вызывает адекватное изменение показателей внутриглазного давления.

Выводы

Проведенный регрессионный анализ и результаты численного моделирования свидетельствуют о необходимости соотносить фактор коррекции измеренного внутриглазного давления с изменением толщины роговицы. Увеличение срединной толщины роговой оболочки на 10 мкм вызывает повышение измеряемого внутриглазного давления на 0,63 мм рт. ст. Если не учитывать данный фактор, то это может приводить к неверному диагностированию глазной гипертензии в девяти случаях из десяти, в которых толщина роговицы в центральной зоне превосходит ее среднестатистическое значение.

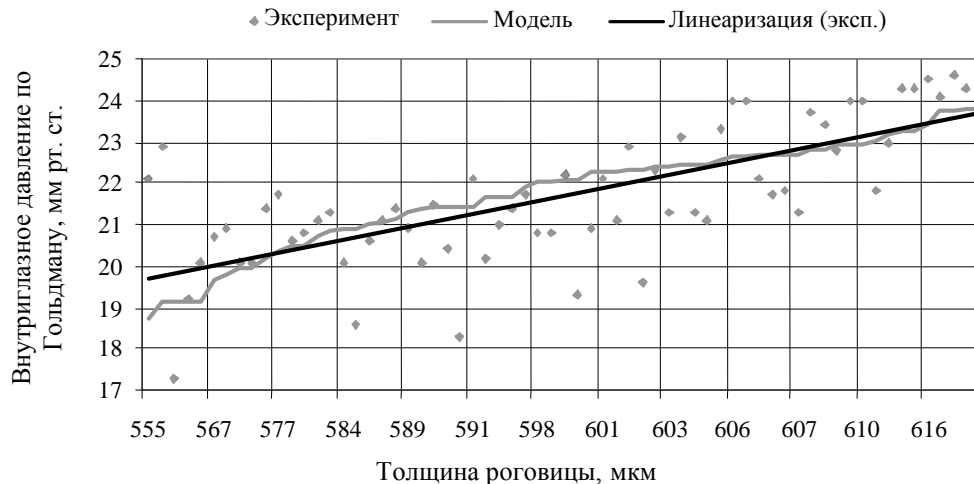


Рис. 3. Моделируемые и экспериментальные величины внутриглазного давления по Гольдману в зависимости от толщины роговицы в центральной зоне

Клиницисты, измеряющие величины внутриглазного давления тонометром Гольдмана, должны проводить дополнительный анализ для достижения объективности полученных результатов, то есть учитывать зависимость показателей внутриглазного давления от толщины роговицы в центральной зоне (рис. 3).

Список литературы

1. *Anderson, K.* Application of structural analysis to the mechanical behaviour of the cornea / K. Anderson, A. El-Sheikh, T. Newson // J. R. Soc. Lond. Interface. – 2004. – No. 1. – P. 1–13.
2. *Бауэр, С.М.* Математическое моделирование метода Маклакова измерения внутриглазного давления / С.М. Бауэр, Г.А. Любимов, П.Е. Товстик // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – Том 1, № 40. – С. 24–39.
3. *Cantor, L.* Glaucoma / L. Cantor. – The Foundation of the American Academy of Ophthalmology, 2000.
4. *Djotyan, G.P.* An Analytically Solvable Model for Biomechanical Response of the Cornea to Refractive Surgery / G.P. Djotyan, R.M. Kurtz, T. Juhasz // Journal of Biomedical Engineering. – 2001. – Vol. 5, No. 123. – P. 440–445.
5. *Doughty, M.J.* Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: a review and meta-analysis approach / M.J. Doughty, M.L. Zaman // Surv. Ophthalmol. – 2000. – Vol. 5, No. 44. – P. 367–408.
6. *Herman, D.C.* Increased corneal thickness in patients with ocular hypertension / D.C. Herman, D.O. Hodge, W.M. Bourne // Arch. Ophthalmol. – 2001. – Vol. 3, No. 119. – P. 334–336.
7. *Hjortdal, J.O.* On the biomechanical properties of the cornea with particular reference to refractive surgery / J.O. Hjortdal // Ophthalmol. J. Nordic Countries. – 1998. – Vol. 76, No. 225. – P. 1–23.
8. *Katsube, N.* Biomechanical response of the cornea to phototherapeutic keratectomy when treated as a fluid-filled porous material / N. Katsube, R. Wang, E. Okuma, C. Roberts // J. Refract. Surg. – 2002. – Vol. 5, No. 18. – P. 593–597.
9. *Kirstein, E.M.* New tonometer provides IOP readings without influence of corneal thickness / E.M. Kirstein // Primary Care Optometry News Online 12/1/03.
10. *Orssengo, G.* Determination of the True Intraocular Pressure and Modulus of Elasticity of the Human Cornea *in vivo* / G. Orssengo, D. Pye // Bulletin of Mathematical Biology. – 1999. – Vol. 61. – P. 551–572.
11. *Sheher, K.P.* Biomechanical simulation for refractive corneal eye surgery / K.P. Sheher, H. Eggert, P. Guth // Proceedings of IASTED International Conference Applied Simulation and Modelling. – Marbella, Spain. – 2001. – P. 188–191.
12. *Shimmyo, M.* Intraocular pressure, Goldmann applanation tension, corneal thickness, and corneal curvature in Caucasians, Asians, Hispanics, and African Americans / M. Shimmyo, A.J. Ross, A. Moy, R. Mostafavi // American Journal of Ophthalmology. – 2003. – Vol. 4, No. 136. – P. 603–613.

13. *Stodtmeister, R.* Applanation tonometry find correction on corneal thickness / R. Stodtmeister // *Acta Ophthalmol.* – 1998. – No. 76. – P. 319–324.
14. *Thomas, R.* Five-year risk of progression of ocular hypertension to primary open angle glaucoma. A population-based study / R. Thomas, R. Parikh, R. George, R.S. Kumar, J. Muliylil // *Indian J. Ophthalmol.* – 2003. – Vol.4, No. 51. – P. 329–333.

STATISTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF CORNEAL THICKNESS ON THE INTRAOCULAR PRESSURE ESTIMATION

I. Sliesoraityte (Kaunas, Lithuania)

The magnitude of the intraocular pressure is of main importance in diagnostics and monitoring of various forms of glaucoma. In this connection the determination of the intraocular pressure at norm as well as at ocular hypertension and investigation of the influence of different eye parameters on the intraocular pressure are of main importance. Analysis of experimental and simulated data performed in this paper shows that increasing of central corneal thickness increases the intraocular pressure measured with Goldmann applanometer. Increase of central corneal thickness by 10 μm increases the measured intraocular pressure by 0.63 mm Hg.

Key words: eye biomechanics, intraocular pressure, central corneal thickness, ocular hypertension.

Получено 12 марта 2006