



DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2019.2.03

УДК 531/534: [57+61]

## **КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ ТОНОМЕТРОМ ШИОТЦА**

**С.М. Бауэр, Л.А. Венатовская, Г.С. Шалпегин**

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: s.bauer@spbu.ru, l.venatovskaya@spbu.ru, shalpg@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлена конечно-элементная модель, описывающая изменение напряженно-деформированного состояния внешней оболочки глаза при нагружении тонометром импрессионного типа – тонометром Шиотца. Моделирование выполняется в программном пакете ANSYS. Упругая система «роговица – склера» представляется в виде двух сопряженных трансверсально-изотропных сферических сегментов, нагруженных внутренним давлением и двумя грузами с вогнутыми основаниями (стопой и плунжером). Исследуются зависимости тонометрических давлений, получаемых по стандартной методике обработки данных при тонометрии по Шиотцу, от веса плунжера и толщины роговицы. Полученные результаты сравниваются со значениями, определяемыми из условия постоянства внутреннего объема деформированной составной оболочки.

**Ключевые слова:** внутриглазное давление, тонометр Шиотца, сопряженные трансверсально-изотропные оболочки.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Уровень внутриглазного давления является важным показателем при диагностике и лечении ряда глазных болезней, а развитие и совершенствование методик определения внутриглазного давления до сих пор остается актуальной задачей [2]. В настоящее время существует много различных устройств для измерения внутриглазного давления, в которых оно оценивается по деформации глазного яблока в результате механического воздействия на роговицу. Практически всегда оценки внутриглазного давления, полученные тонометрами, предполагают, что роговица имеет средние стандартные радиус кривизны и толщину. Между тем современные исследования показывают, что упругие характеристики разных глаз могут различаться многократно и изменяться с возрастом, заболеванием и т.д. Поэтому вопросам тонометрии и созданию моделей, позволяющих оценить влияние различных параметров глаза на показатели внутриглазного давления и тонографии, в частности после рефракционных операций, уделяется большое внимание [2].

Первая механическая модель измерения внутриглазного давления по тонометру Маклакова была представлена в работе [1]. Корнеосклеральная оболочка глаза моделировалась двумя сферическими сегментами. Роговица рассматривалась как мягкая оболочка (не сопротивляющаяся изгибным деформациям). При принятых предположениях деформация части оболочки, моделирующей роговицу, описывалась,

---

© Бауэр С.М., Венатовская Л.А., Шалпегин Г.С., 2019

Бауэр Светлана Михайловна, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

Венатовская Людмила Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

Шалпегин Григорий Сергеевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

как и предполагалось первоначально в аппланационной тонометрии, соотношением  $p_i = W/S$ , где  $p_i$  – тонометрическое внутриглазное давление,  $W$  – вес тонометра,  $S$  – площадь контакта. Последнее соотношение справедливо только для бесконечно тонких, мягких оболочек. Расчеты, проведенные в [1] при различных параметрах роговицы и склеры, дают результаты, которые хорошо согласуются с данными, представленными в калибровочных таблицах [7], и слабо зависят от геометрических и механических параметров оболочек глаза.

В работе [4] роговица представляется безмоментной однородной изотропной линейно-упругой двумерной поверхностью, а склера и прилегающие к ней ткани – упругим элементом, откликающимся изменением объема на изменение давления. Разработанный в работе [4] метод был эффективно применен к анализу механического смысла данных, получаемых с помощью различных тонометров [3–5]. Показано, что нагружение одного и того же глаза тонкими стержнями и плоскими штампами разных весов дает возможность найти при клиническом обследовании индивидуальные упругие характеристики глазного яблока и давление в ненагруженном глазу.

В [6] рассмотрена процедура измерения внутриглазного давления тонометром Шиотца и проведено сравнение расчетных данных с теми, которые используются при стандартной методике обработки результатов измерений. Проведенные расчеты показали влияние отклонения упругих констант от средних значений на оценки истинного внутриглазного давления, получаемые для тонометров с весами плунжеров 5,5 и 7,5 г. При этом отмечается, что влияние геометрических параметров роговицы незначительно.

Разработанные в работах [8, 9] конечно-элементные модели были эффективно применены к анализу данных, получаемых тонометрами Гольдмана и Маклакова до и после операций по коррекции зрения. При измерении глазного давления тонометром Шиотца нагружение осуществляется не единственным грузом – штампом, а вогнутым штампом и тонким, более легким вогнутым стержнем (плунжером).

Целью данной работы является построение механической модели измерения внутриглазного давления, позволяющей оценить влияние толщины роговицы при средних значениях упругих характеристик роговицы и склеры на показатели тонометрического и истинного внутриглазного давления, получаемые тонометром Шиотца.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается осесимметричная деформация составной оболочки, в которой роговица и склера представляются сопряженными сферическими сегментами с разными радиусами и разными упругими свойствами (рис. 1). Предполагается, что составная оболочка заполнена несжимаемой жидкостью с давлением  $p_0$ . С механической точки зрения, решается задача о напряженно-деформированном состоянии составной трансверсально-изотропной оболочки под действием двух грузов с вогнутым основанием и внутреннего давления.

Устройство и стандартная методика интерпретации данных, получаемых тонометром Шиотца, подробно описана в работе [3]: «Роговица нагружается стопой весом 11 г с радиусом кривизны 15 мм, т.е. приблизительно вдвое больше, чем у нормальной роговицы человека. В центральной части стопы имеется отверстие, в которое свободно опускается грузик в виде тонкого стержня (плунжера). Диаметр стержня 3 мм, его вдавливающаяся в роговицу поверхность так же, как и стопа, вогнута и имеет тот же радиус кривизны. Вес стержня варьируется. Стандартный вес – 5,5 (наиболее употребителен); 7,5; 10; 15 г. О внутриглазном давлении судят по глубине погружения стержня под контактную поверхность стопы...».

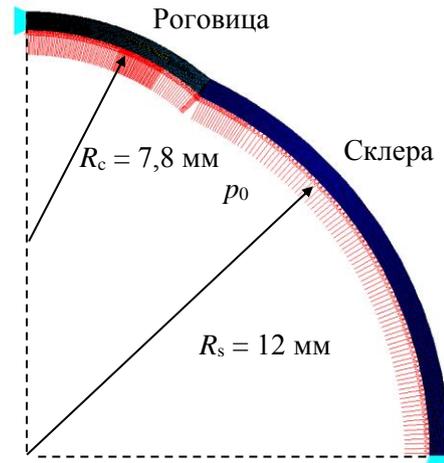


Рис. 1. Модель сопряженных трансверсально-изотропных оболочек

Измерение внутриглазного давления тонометром Шиотца моделируется контактной задачей в программном пакете ANSYS. В силу симметрии выполняется двумерное моделирование (2D) с использованием в качестве конечного элемента *PLANE182*. При моделировании применяются контактные элементы «поверхность – поверхность» для создания двух жестко-податливых контактов между поверхностями тонометра (стопы и плунжера) с роговицей. Жесткие целевые поверхности тонометра связываются с так называемыми «ведущими узлами»: к стопе прикладывается ее вес  $F = 11$  г, а к плунжеру – сила давления груза  $G$ , вес которого варьируется от 5,5 до 15 г (рис. 2). Веса к стопе и плунжеру прикладываются постепенно – методом последовательных нагружений. На каждом шаге проверяется условие постоянства внутреннего объема деформированной составной оболочки.

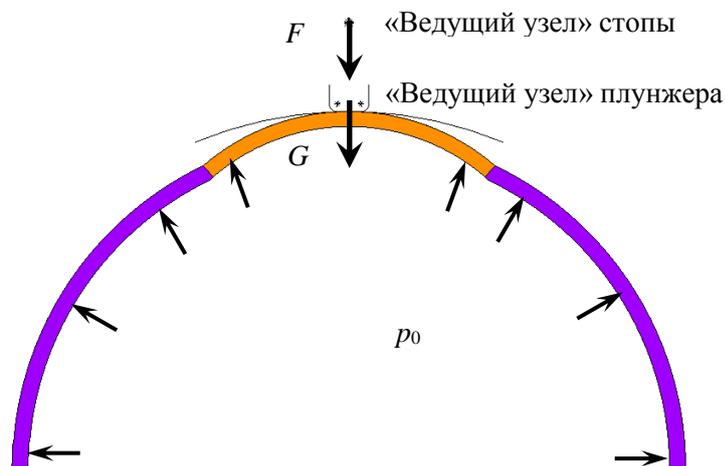


Рис. 2. Модель импрессионного тонометра Шиотца

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Задача решалась численно подбором такого значения тонометрического давления  $p_t$ , при котором приложение нагрузки (стопы и груза) не меняет внутренний объем до нагружения. Давление  $p_0$  соответствует давлению до нагружения тонометром Шиотца.

Расчеты проводились для сферических слоев, материал которых близок к трансверсально-изотропному. Упругим константам задавались значения для здоровых глаз: модуль упругости для роговицы полагался  $E_c = 1$  МПа, для склеры –  $E_s = 15$  МПа [2, 4]. Модули упругости в направлении толщины полагались в 20 раз меньше, чем в тангенциальном направлении [2]. Коэффициенты Пуассона на поверхности изотропии принимались равными  $\nu = 0,49$ , в направлении толщины –  $\nu' = 0,01$ ; модуль сдвига на поверхности изотропии определялся как  $G = E/2(1 + \nu)$  и  $G' = G/2$  – в направлении толщины.

На рис. 3 представлены деформированный профиль и контактные напряжения для оболочки, нагруженной внутренним давлением 15 мм рт. ст., стопой грузом 11 г и плунжером весом 5,5 г. Толщина роговицы принималась равной среднему значению  $h_c = 562$  мкм.

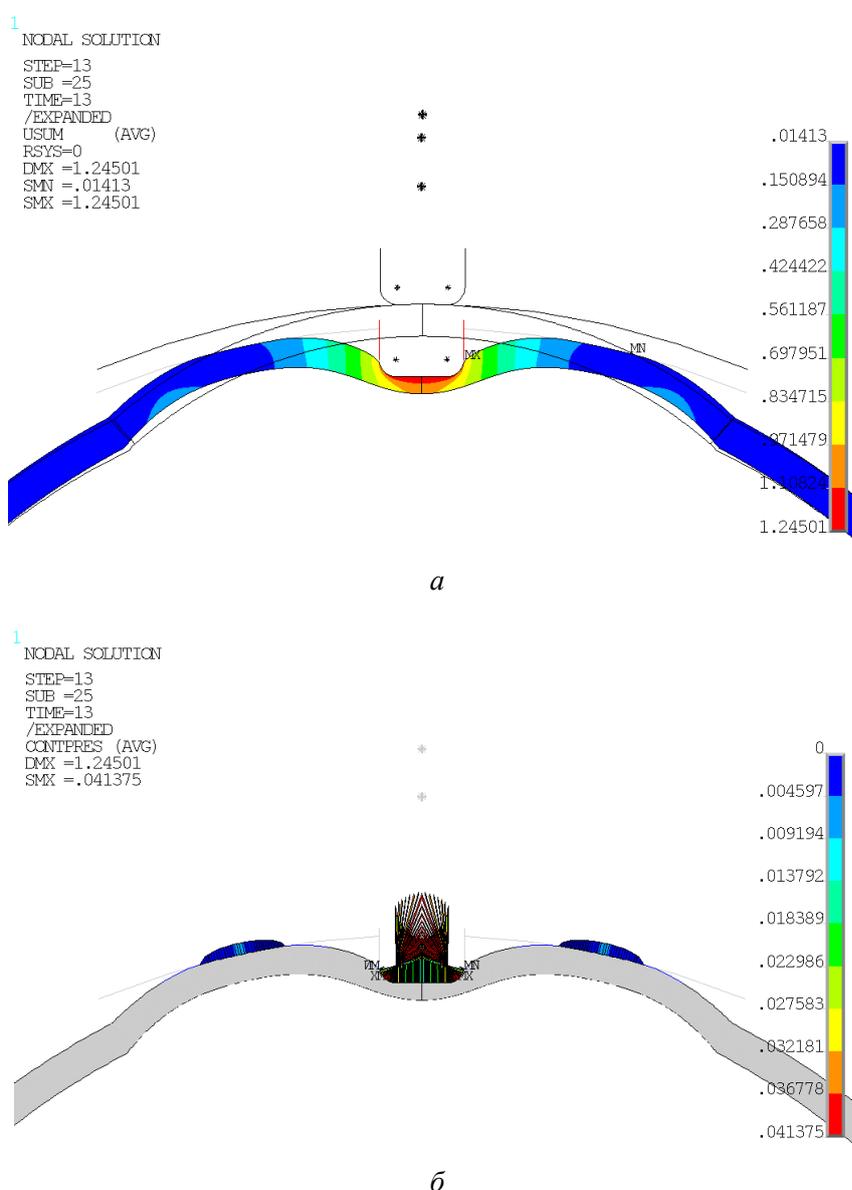


Рис. 3. Деформированный профиль (а) и контактные напряжения (б) для оболочки, нагруженной внутренним давлением 15 мм рт. ст., стопой грузом 11 г и плунжером весом 5,5 г

Стандартная обработка данных тонометрии по Шиотцу базируется на двух алгоритмах: сначала по измеренной глубине погружения  $h$  и известному весу плунжера  $G$  определяется тонометрическое давление  $p_t$ , а затем по  $p_t$  находится истинное внутриглазное давление  $p_0$ .

Зависимость  $p_t$  определяется по стандартной формуле [6]

$$p_t = \frac{G}{\zeta_1 + \zeta_2 h}, \quad (1)$$

здесь  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  – эмпирические константы, которые имеют фиксированные значения:  $\zeta_1 = 0,107$ ,  $\zeta_2 = 0,0138$ . Для остальных величин используются внесистемные единицы измерения:  $G$  измеряется в граммах силы;  $p_t$  – в миллиметрах ртутного столба;  $h$  – в единицах Шиотца (1 ед. Шиотца = 50 мкм).

На рис. 4 приведены результаты расчетов тонометрических зависимостей давления от веса плунжера и толщины роговицы, получаемые по формуле (1), и истинные значения, определяемые численно из условия постоянства объема.

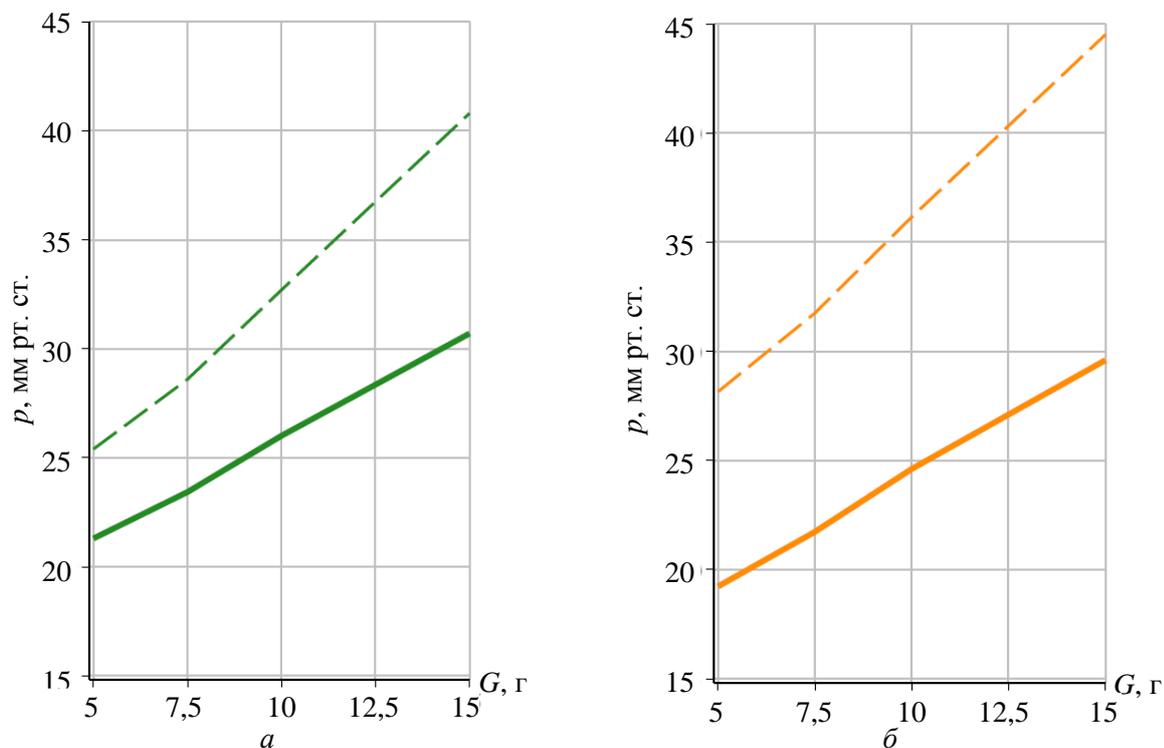


Рис. 4. ТонOMETрические кривые для роговиц толщиной 470 мкм (а) и 582 мкм (б) для давлений, определяемых при тонометрии по Шиотцу (сплошные линии), и истинных давлений, получаемых из условия постоянства объема (пунктирные линии)

В тонометрии под эластоподъемом понимают разность показаний тонометров большей и меньшей массы (15 и 5 г). Расчеты для тонкой роговицы ( $h_c = 470$  мкм) показали, что эластоподъем кривой для значений, получаемых при стандартной методике обработки данных по Шиотцу, составляет  $\Delta = 10,36$  мм рт. ст., для значений, получаемых из условия постоянства объема, –  $\Delta = 16,35$  мм рт. ст. Расчетные значения эластоподъема для толстой роговицы ( $h_c = 582$  мкм), получаемые при тонометрии по Шиотцу, –  $\Delta = 9,40$  мм рт. ст., для истинных давлений –  $\Delta = 15,40$  мм рт. ст.

## Выводы

Представлена конечно-элементная модель, описывающая изменение напряженно-деформированного состояния внешней оболочки глаза при нагружении тонометром импрессионного типа – тонометром Шиотца.

В результате численного моделирования было получено, что зависимость тонометрических давлений от веса грузов практически линейна, что согласуется с расчетами, проведенными в работах [3–6]. Показатели тонометрического давления, вычисленные по методике, используемой при стандартной обработке данных при тонометрии по Шиотцу, оказались заниженными по сравнению с реальным тонометрическим давлением, определяемым нами из условия постоянства объема. При этом чем тоньше, а следовательно слабее, роговица, тем сильнее снижаются показатели тонометрического давления  $p_t$  и тем сильнее увеличивается эластоподъем тонометрических кривых.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00832-а и с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета «Обсерватория экологической безопасности».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауэр С.М., Любимов Г.А., Товстик П.Е. Математическое моделирование метода Маклакова измерения внутриглазного давления // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 1. – С. 24–39.
2. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. – М.: Реал Тайм, 2015. – 208 с.
3. Любимов Г.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А. Исследование свойств двухкомпонентной механической модели глазного яблока и возможности ее использования при практической оценке механических свойств глаза человека // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2014. – № 6. – С. 5–16.
4. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Анализ зависимости давление – объем для глазного яблока, нагруженного плоским штампом, на основе двухсегментной упругой модели // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2011. – № 5. – С. 3–15.
5. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Исследование зависимости давление – объем для глазного яблока при нагружении тонким стержнем // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2013. – № 4. – С.3–14.
6. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Оценка корректности стандартной методики расчета внутриглазного давления при тонометрии по Шиотцу // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 3. – С. 243–257.
7. Нестеров А.П., Вургафт М.Б. Калибровочные таблицы для эластонометра Филатова – Кальфа // Вестник офтальмологии. – 1972. – № 2. – С. 20–25.
8. Bauer S.M., Venatovskaia L.A. Analysis of stress-strain state of a human eye by the method of elastotometry after the surgical correction of hyperopia // Proceedings of International Scientific Conference on Mechanics: 8th Polyakhov's Reading. AIP Conference Proceedings. – St. Petersburg, 2018. – Vol. 1959. – Article number 09000.
9. Bauer S.M., Venatovskaia L.A. Biomechanical analysis of the human eye after the surgical correction of hyperopia // Stability and Control Processes: Proceedings of the International Conference in Memory of V.I. Zubov / Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – St. Petersburg, 2015. Article number 7342200. – P. 513–515.

## FINITE ELEMENT MODEL OF MEASUREMENT OF INTRAOCULAR PRESSURE BY THE SCHIÖTZ TONOMETER

**S.M. Bauer, L.A. Venatovskaya, G.S. Shalpegin (Saint-Petersburg, Russia)**

The finite-element model describing the change of the stress-strain state of the sclera (the outer shell of an eye) loaded by an impression-type tonometer – the Schiøtz tonometer is presented. The simulation is performed with the software package ANSYS, Inc. The elastic system cornea–sclera is modeled as two thin transversely isotropic adjoint spherical shells with different radii of curvature and biomechanical properties loaded by the internal pressure and two loads with concave bases (footplate and plunger). The effect of the weight of the plunger and the thickness of the cornea on the tonometric pressure readings obtained due to the standard method of data processing for Schiøtz tonometry is studied. The obtained values are compared with the values found from the condition of constant internal volume of the deformed composite shell.

**Key words:** intraocular pressure, Schiøtz tonometer, adjoint transversely isotropic shells.

*Получено 8 марта 2019*