СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology / Eds. J. Kropp, H. J. Schellnhuber. Berlin: Springer, 2011. 400 p.

2. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs // Trans. Am. Soc. Civil Eng. 1951. Vol. 116. P. 770.

3. On spurious and corrupted multifractality: The effects of additive noise, short-term memory and periodic trends / J. Ludescher, M. I. Bogachev, J. W. Kantelhardt et al. Amsterdam: Physica. Vol. 390. P. 2480–2490.

4. Богачев М. И. К вопросу об использовании долговременной зависимости при прогнозировании выбросов в системах метеорологического и гидрологического мониторинга // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 4. С. 45–53.

5. Bogachev M. I., Eichner J. F., Bunde A. On the Occurence of Extreme Events in Long-term Correlated and Multifractal Data Sets // Pure and App. Geophys. Vol. 165. P. 1195–1207.

6. Andrade R. F. S., Schellnhuber H.-J., Clausen M. Analysis of rainfall records: possible relation to self-organized criticality. Amsterdam: Physica, 1998. Vol. 254. P. 557.

7. Universality of rain event size distributions / O. Peters, A. Deluca, A. Corral et al. // J. Stat. Mech. 2010. Vol. 11. P. 11030.

8. Bogachev M. I., Bunde A. Universal scaling in precipitation and river runoff // Europhys. Lett. 2012. Vol. 97. P. 48011(1–6).

9. Bunde A., Bogachev M. I., Lennartz S. Precipitation and river flow: Long-term memory and predictability of extreme events // Geophys. Monogr. Ser. Vol. 196. P. 139–152.

10. Bogachev M. I., Eichner J. F., Bunde A. Effect of nonlinear correlations on the statistics of return intervals in multifractal data sets // Phys. Rev. Lett. Vol. 99. 2007. P. 240601 (1–4).

11. Богачев М. И. К вопросу о прогнозируемости выбросов динамических рядов с фрактальными свойствами при использовании информации о линейной и нелинейной составляющих долговременной зависимости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 5. 2009. С. 31–40.

12. Bogachev M. I., Bunde A. Return interval statistics in precipitation and river flow records // Proc. of the Eur. Geophys. Un. Gen. Assembly. 2009. Vol. 11. P. 13565.

M. I. Bogachev, A. R. Kayumov, O. A. Markelov, S. Yu. Shevchenko

ON THE OPTIMIZATION OF SPATIO-TEMPORAL DATA MINING IN ECOLOGICAL MONITORING GEOINFORMATION SYSTEMS

Meteorological, hydrological and ecological data representation in geoinformation systems is considered. It is shown that due to the recently obtained universal statistical laws in several climatic and ecological indicators, optimization of spatio-temporal data representation using combined mathematical models including regular seasonal trends as well as fluctuations around them is possible. An additional advantage of the proposed approach is its enhanced robustness under data incompleteness conditions.

Geoinformation systems, ecological monitoring, seasonal trends, extremes interval statistics, scaling properties, universal laws

УДК 612.76 616-001 617.3

Д. А. Рубашова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОГОВИЦЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТОНОМЕТРИИ

Построены три модели и проведены исследования напряжений и перемещений в капсуле глаза при компрессионной нагрузке. Модели реализованы в пакетах прикладных программ Solid Works, Cosmos Works. Исследовано влияние стадий развития кератоконуса и механических свойств роговицы на результаты измерения внутриглазного давления по методам Маклакова.

Кератоконус, тонометрия, внутриглазное давление

Существует несколько методов измерения внутриглазного давления (ВГД). В настоящее время самые широко применяемые методы: метод Маклакова и метод Гольдмана. Аппланационная нагрузка при измерении по методу Маклакова – 10 г (нагрузка, под давлением которой поверхность глазного яблока уплощается контактной поверхностью тонометра до определенного диаметра кружка сплющивания). При измерении ВГД по методу Гольдмана

диаметр кружка сплющивания равен 3,04 мм. Оба метода построены на качественных экспертных оценках. При измерении внутриглазного давления свойства структур глазного яблока не учитываются. Так, например, при измерении ВГД у одного и того же пациента разными методами тонометрии можно получить результаты с разницей в 11,5 мм рт. ст. [1] (среднее давление в норме 21 мм рт. ст.). Это приводит к существенным погрешностям при диагностике многих заболеваний. Первой причиной, влияющей на результаты аппланационной тонометрии [2], [3], считается толщина центральной зоны роговицы (ТЦЗР). Таким образом, занижение ВГД у лиц с более тонкой роговицей может приводить к запоздалой диагностике. Например, связанная с ТЦЗР ошибка при тонометрии по Гольдману колеблется от 3 до 5 мм рт. ст. на 100 мкм ТЦЗР [4]. Клинические исследования [5] показали, что на результаты тонометрии оказывают влияние не только ТЦЗР, но и ее кривизна и механические свойства.

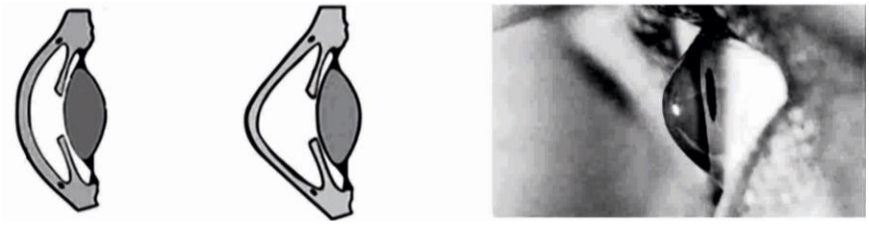
Существует ряд заболеваний, при которых структуры глаза меняют свою геометрию и механические свойства, что оказывает существенное влияние на результаты тонометрии, а следовательно и на диагностику ряда патологий.

При кератоконусе у роговицы (рис. 1, *а*) изменяется радиус кривизны и толщина центральной зоны. В итоге роговица истончается и принимает конусовидную форму (рис. 1, *б, в*). Выделяют три стадии развития кератоконуса:

1. При первой стадии *кератоконуса* отмечается снижение остроты зрения, радиус кривизны роговицы уменьшается до 7,5…7,2 мм, ТЦЗР – до 0,48 мм;

2. При второй стадии заболевания прогрессирует деформация роговицы, уменьшается ее радиус кривизны до 7,1…6,75 мм. ТЦЗР – до 0,44 мм;

3. При третьей стадии роговица еще больше истончается, ее радиус уменьшается до 6,7…6,0 мм, ТЦЗР – до 0,40 мм.



а *б* *в*

Рис. 1

Для исследования влияния структур глаза на результаты тонометрии активно используется компьютерное моделирование, которое является одним из эффективных методов изучения сложных биомеханических систем. Построение компьютерных моделей и последующий анализ, позволяют оценить допускаемые нагрузки в структурах глаза при моделировании различных патологических процессов.

В работах [6], [7] исследовалось влияние толщины центральной зоны роговицы в моделях роговицы и корнеосклеральной оболочки на результаты тонометрии по методу Гольдмана. Численное моделирование осуществлялось в конечно-элементном пакете ABAQUS. Роговица рассматривалась как многослойная сферическая оболочка переменной толщины. Роговица фиксировалась по краю. Вычисления проведены при разбиении модели роговицы на 2240 и модели корнеосклеральной оболочки на 3056 конечных элементов. Исследовалось изменение толщины центральной зоны роговицы и изменение ее механических свойств на результаты тонометрии по Гольдману.

Актуальность исследований влияния геометрических параметров и биомеханических свойств структур глаза и соединительнотканных образований глазницы на развитие различных патологий не вызывает сомнений [1]–[5].

Построены три содержательные и компьютерные модели (рис. 2, 3) и проведены вычисления ВГД при роговице в норме ($n = 0$) и при трех стадиях развития кератоконуса ($n = 1$–3).

В работе разработан алгоритм, позволяющий учитывать влияние механических свойств и геометрических параметров роговицы, склеры, теноновой капсулы и стяжей на напряженно-деформированное состояние (НДС) корнеосклеральной оболочки глаза при градиенте внутриглазного и компрессионного давлений.

На рис. 2 и 3 представлены три содержательные и компьютерные модели: модель роговицы (рис. 2, *а*, *б*); модель корнеосклеральной оболочки (рис. 2, *в*, *г*) и модель глаза с учетом соединительнотканных образований глазницы (рис. 3). По всем моделям исследовалось влияние формы роговицы и ее механических свойств, в зависимости от стадии кератоконуса на результаты аппланационной тонометрии.

Исследование проводилось в соответствии с нагружением, принятым в методе Маклакова. Принята компрессионная нагрузка 10 г при кружках сплющивания диаметром 3; 4; 5; 6 и 7 мм, что соответствует ВГД по таблице Маклакова $p_{\text{М}}$ (см. табл. 1. Соотношение диаметра кружка сплющивания $D_{\text{сп}}$ со значением ВГД по таблице Маклакова ($p_{\text{М}}$) и давлением, которое тонометр оказывает на роговицу ($p_{\text{к}}$)). Вычисления проведены при давлении контактной части тонометра на роговицу $p_{\text{к}}$.

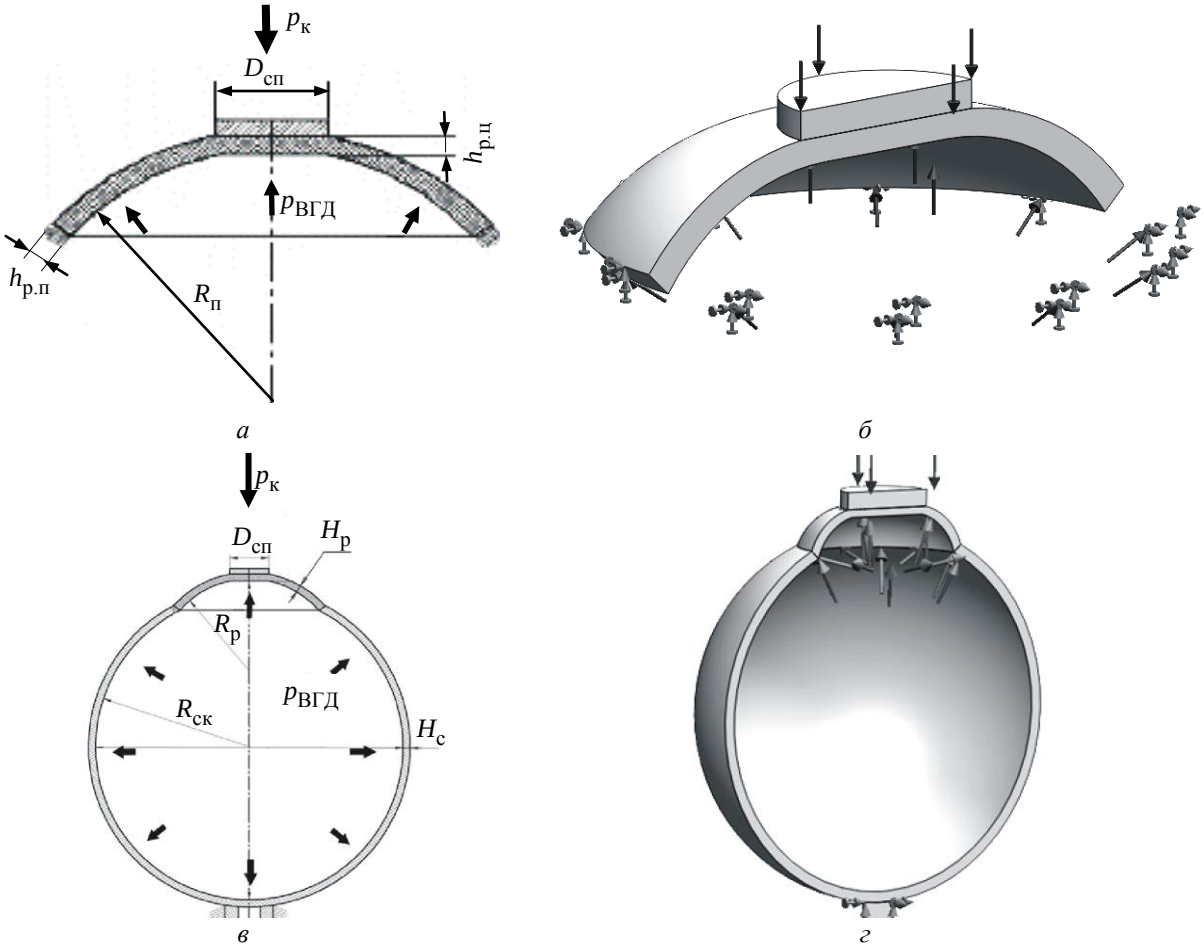


Рис. 2

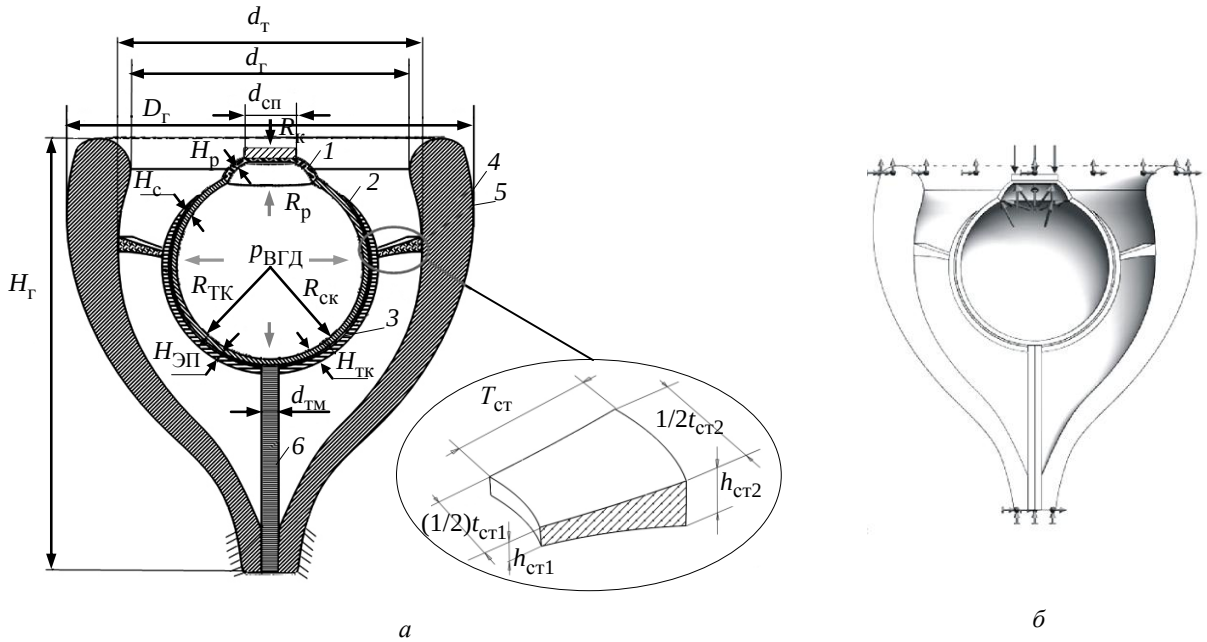
ВГД ($p_{ВГД}$) определяется из условия обеспечения выбранного кружка сплющивания при заданной компрессионной нагрузке.

Геометрические построения моделей проведены в программе Solid Works, вычисления НДС – в конечно-элементном пакете CosmosWorks.

Таблица 1

$D_{сп}$, мм	3	4	5	6	7
$p_М$, мм рт. ст. (кПа)	94 (12,5)	55 (7,315)	35 (4,655)	24 (3,192)	18 (2,394)
$p_к$, кПа	14	7,8	5	3,46	2,55

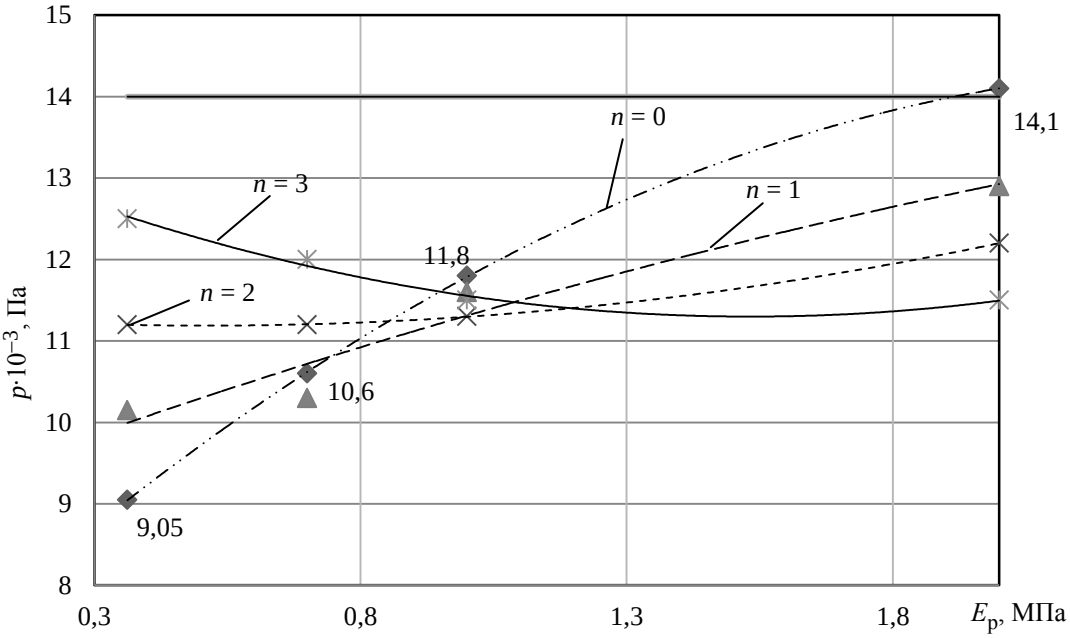
При исследовании влияния развития кератоконуса на результаты тонометрии по первой модели введены следующие допущения: 1) материал роговицы однородный, сплошной, изотропный с приведенным модулем упругости $E_р$; 2) роговица жестко закреплена по наружному контуру; 3) модуль упругости роговицы $E_р$ изменялся от 0,362 до 2 МПа, модуль упругости контактной части тонометра $E_т$ = 210 ГПа; 4) толщина роговицы $H_р$ на переферии принимается постоянной на всех стадиях кератоконуса; 5) радиус кривизны роговицы в нормальном состоянии (n = 0) $R_р$ = 7,8 мм, толщина центральной зоны $H_{р.ц}$ = 0,52 мм, толщина роговицы на периферии принимается постоянной во всех стадиях $H_{р.п}$ = 0,6 мм. В следующих трех стадиях (n = 1, 2, 3) роговица изменяет свою кривизну $R_{кр}$ = 7,2 мм (n = 1); 6,8 мм (n = 2) и 6,2 мм (n = 3) и толщину центральной зоны соответственно $H_{р.ц}$ = 0,48; 0,44 и 0,4 мм.



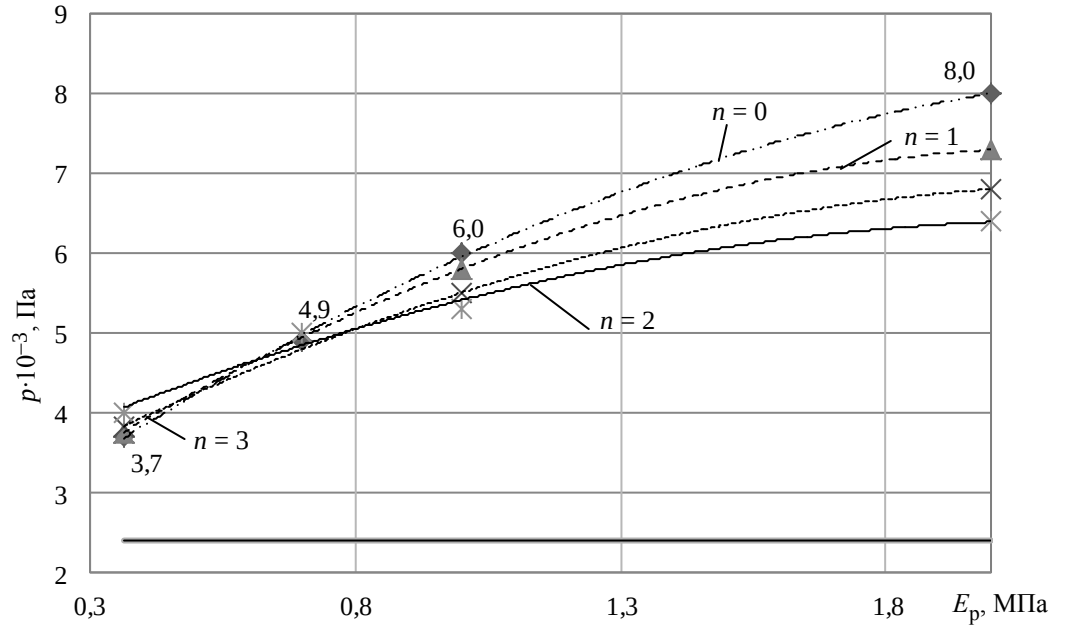
а *б*

Рис. 3

Число введенных конечных элементов в первой модели (до 14 тыс.) существенно влияет на результаты вычислений. Дальнейшее увеличение числа конечных элементов на результатах вычислений сказывается незначительно (не более 5 %). Поэтому, для достижения необходимой точности, при минимальных затратах времени на вычисления напряжений и перемещений в модели роговицы целесообразно задавать разбиение на 14 тыс. линейных тетраэдальных конечных элементов.



а

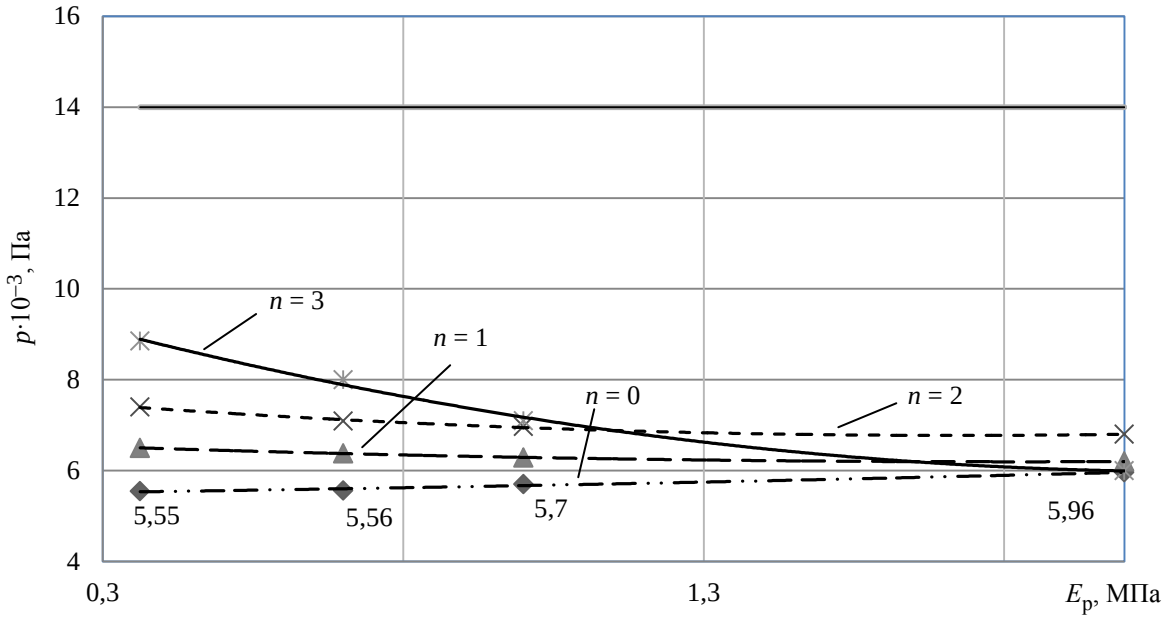


б

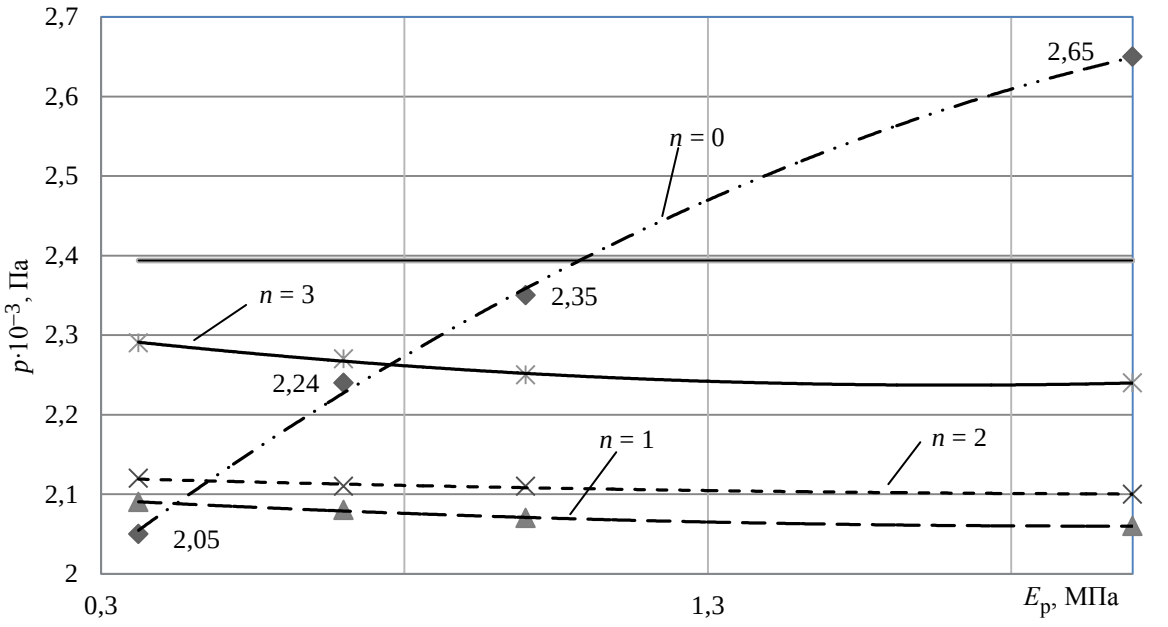
Рис. 4

Чем меньше кружок сплющивания, а следовательно, больше ВГД, тем больше разница между внутриглазным давлением по таблице Маклакова и ВГД, полученным в результате вычислений по первой модели. Максимальные расхождения полученного ВГД с табличными значениями Маклакова наблюдаются в норме, а минимальные – в третьей стадии развития кератоконуса. Изменение модуля упругости от 0,362 до 2 МПа сказывается не значительно на рассчитанном ВГД. ВГД увеличивалось в пределах 3,5 %.

При исследовании влияния развития кератоконуса на результаты тонометрии по второй модели в дополнение к первой модели введены следующие допущения: 1) материалы склеры и твердой мозговой оболочки однородные, сплошные, изотропные, с приведенными



а



б

Рис. 5

модулями упругости $E_с$ и $E_{ТМО}$; 2) корнеосклеральная оболочка жестко закреплена в твердой мозговой оболочке по наружному контуру; 3) склере, твердой мозговой оболочке заданы приведенные модули нормальной упругости, равные соответственно $E_с$ = 6 МПа; $E_{ТМО}$ = = 150 МПа; толщина и радиус кривизны склеры $H_с$ = 0,7 мм, $R_{ск}$ = 12 мм; диаметр твердой мозговой оболочки $D_{ТМО}$ = 2,1 мм.

По результату конечно-элементного анализа при вычислении в программе Cosmos Works вторая модель разбита на 59,5 тыс. линейных тетраэдальных конечных элементов.

На рис. 4 представлены зависимости ВГД, рассчитанного по второй модели от модуля упругости роговицы при кружках сплющивания 3 мм (рис. 4, *а*) и 7 мм (рис. 4, *б*). Сплошная горизонтальная линия на диаграммах обозначает табличное значение ВГД по методу Маклакова.

Максимальные расхождения в определении ВГД по таблице Маклакова и по второй модели при минимальном кружке сплющивания в норме и минимальные во второй стадии развития кератоконуса при кружке сплющивания 4 мм.

При исследовании влияния развития кератоконуса на результаты тонометрии по третьей модели в дополнение ко второй модели введены следующие допущения: 1) материалы стяжей, эписклерального пространства и кости глазницы – однородные, сплошные, изотропные, с приведенными модулями упругости; 2) модель жестко закреплена на внешней стороне кости глазницы; 3) эписклеральному пространству, стяжам, кости глазницы и теноновой капсуле задаются приведенные модули упругости, равные соответственно $E_{эп}$ = 30 кПа; $E_{ст}$ = 20 МПа; $E_{к}$ = 2,5 ГПа; $E_{т.к}$= 200 МПа; толщина и радиус кривизны эписклеры $H_{эп}$ = 0,26 мм, $R_{эп}$ = 12,26 мм; размеры стяжей – $T_{ст}$ = 5 мм, $t_{ст1}$ = 11,25 мм, $t_{ст2}$ = 16 мм, $h_{ст1}$ = 0,7 мм, $h_{ст2}$ = 1,76 мм, внешний диаметр стяжей $D_{ст}$ = 36,7 мм; высота глазницы $H_{г}$ = 52,5 мм; внешний диаметр глазницы $D_{г}$ = 49 мм; внутренний диаметр глазницы $d_{г}$ = = 33 мм; толщина и радиус кривизны теноновой капсулы $H_{т.к}$ = 0,74 мм, $R_{т.к}$ = 13 мм.

Третья модель разбита на 70 тыс. конечных элементов.

На рис. 5 представлены зависимости ВГД рассчитанного по третьей модели от модуля упругости роговицы при кружках сплющивания 3 мм (рис. 5, *а*) и 7 мм (рис. 5, *б*).

В первой модели влияние модуля упругости на рассчитанное ВГД несущественно. По результатам вычисления изменение модуля упругости роговицы приводит к максимальному изменению определяемого ВГД на 54,7 % во второй модели и на 32,3 % – в третьей. При этом рассчитанное ВГД по второй и третьей моделям увеличивается с увеличением модуля упругости роговицы.

В третьей модели рассчитанное ВГД:

– увеличивается в нормальной роговице от 7 до 22,6 %, с увеличением модуля упругости роговицы;

– уменьшается от 5 до 32,3 %, с увеличением степени развития кератоконуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потемкин В. В. Толщина роговицы как фактор первичной открытоугольной глаукомы: Автореф. дис… канд. мед. наук. СПб., 2009.

2. Douthy M. J., Zaman M. L. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure: A review and meta-analysis approach // Surv. Ophthalmol. 2000. Vol. 44. P. 367–408.

3. Ehlers N., Bramsen T., Sperling S. Applanation tonometry and central corneal thickness // Acta Ophtalmol. (Copenh.). 1975. Vol. 53. P. 34–43.

4. Tonnu P.-A., Ho T., Newson T. The influence of central corneal thickness and age on intraocular pressure measured by pneumotonometry, non-contact tonometry, the Tono-Pen XL, and Goldmann applanation tonometry // Brit. J. of Ophthalmolog. 2005. Vol. 89. P. 851–854

5. Аветисов С. Э., Бубнова И. А., Антонов А. А. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии // Биомеханика глаза: Сб. М., 2009. С. 72–75.

6. Любимова Д. Аппланационная тонометрия и биомеханические свойства роговицы // Биомеханика глаза – 2007: сб. мат. конф. / ФГУ «Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца Росмедтехнологий» М., 2007. С. 134–137.

7. Ljubimova D. Biomechanics of the Human Eye and Intraocular Pressure // Techn. rep. from Royal Inst. of Tecnol. Depart. of Mechan. 2009. Aug. 34 p.

D. A. Rubashova

RESEARCH OF INFLUENCE MECHANICAL PROPERTIES AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE CORNEAL ON TONOMETRY RESULTS

The authors have developed models and conducted studies of tensions and movements of the eye capsule during stress testing. The models were developed by Solid Works and Cosmos Works software packages. Was investigated Influence characteristics of eye structure on the result tonometry Maklakov.

Keratoconus, tonometry, intraocular pressure