

УДК 531/534: [57+61]

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМАЦИИ ХРУСТАЛИКА ГЛАЗА ПРИ АККОМОДАЦИИ

О.В. Иванова

Кафедра теоретической и прикладной механики Санкт-Петербургского государственного университета, Россия, 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский проспект, 28, e-mail: arta@tepcom.ru

Аннотация. Рассмотрена задача деформации капсулы хрусталика глаза при аккомодации с учетом влияния стекловидного тела. Получено изменение давления внутри капсулы хрусталика глаза при аккомодации.

Ключевые слова: биомеханика глаза, теория аккомодации, хрусталик, деформация.

Введение

Аккомодация – приспособление глаза к ясному видению предметов, находящихся на различных расстояниях. Аккомодация достигается изменением кривизны хрусталика глаза. Классическая теория аккомодации была создана Гельмгольцем. В моменты отсутствия аккомодации, т.е. при взгляде вдаль, по Гельмгольцу, происходит увеличение натяжения волокон цинновой связки, капсула хрусталика растягивается и уплощается, позволяя более четко видеть предметы, находящиеся вдали, поскольку преломляющая способность поверхностей капсулы и хрусталика в целом при этом становится минимальной. При включении процесса аккомодации, т.е. при взгляде вблизи, по Гельмгольцу, происходит ослабление натяжения волокон цинновой связки, в результате чего передняя и задняя поверхности капсулы хрусталика принимают более округлые формы, сокращаясь в силу своих упругих свойств, что позволяет увеличить преломляющую способность хрусталика в целом для улучшения качества изображения на сетчатке глаза тех предметов, которые находятся на более близком расстоянии. В начале 90-х годов появилось несколько работ Р. Шахара [1, 2], в которых опровергается классическая теория аккомодации Гельмгольца и сделана попытка построить новую теорию аккомодации. Сразу после этого появился ряд работ, опровергающих теорию Р. Шахара и, в свою очередь, поддерживающих классическую теорию Гельмгольца. Отметим некоторые из них.

В первую очередь, в работах [3, 4] были отмечены ошибочные результаты модели [1], основанной на линейной (малой) деформации капсулы хрусталика глаза. Однако, как и в работе [1], в [3, 4] не учитывалось влияние стекловидного тела и сила, имитирующая сокращение мышц (растягивающая или сжимающая капсулу хрусталика), действовала в горизонтальной плоскости. Совсем недавно появились работы, в которых сила мышц действует под углом к горизонтальной плоскости. В работе [5] приводятся результаты ряда биомеханических моделей аккомодации, где в рассмотрение введены стекловидная камера и её контакт с хрусталиком. Таким образом, сделана попытка учесть влияние стекловидного тела, но в работе нет связи

геометрических построений с реальными данными. Рассмотрение хрусталика и стекловидного тела с формой, геометрически близкой к реальным данным, позволяет получить более точное описание деформации капсулы хрусталика при аккомодации. Также в работе [5] в рассмотрении хрусталика отсутствует более жесткое ядро, что влияет на качественное изменение формы хрусталика и, как следствие, преломляющей силы. Натяжение волокон цинновой связки представлено силой, точно приложенной под углом к горизонтальной плоскости.

В работе [6] для изучения процесса аккомодации рассматривалась контактная пара с параметрами, отсутствующими в предыдущих работах. Но и здесь не обращено должного внимания на геометрию стекловидного тела.

Известно, что при аккомодации прогибы не являются малыми и, следовательно, адекватная модель может быть получена только с использованием нелинейной теории оболочек.

В настоящей работе проводится численное исследование аккомодации хрусталика для различной геометрии стекловидного тела и распределенной по поверхности нагрузки. В ранее представленных работах рассматривалась точно приложенная нагрузка.

Капсула хрусталика моделируется как тонкая осесимметричная оболочка из линейно-упругого материала, деформирующаяся под действием распределенной по поверхности нагрузки и, для сравнения, под действием точно приложенной силы. Для построения геометрии оболочки использовались соотношения, предложенные Шахаром [1]. Точки крепления мышц также были взяты из работы [1].

Форма *стекловидного тела* рассматривалась в трех вариантах.

1. Стекловидное тело представлено шаром с радиусом, равным расстоянию до оси вращения стекловидного тела, которое в реальной жизни, как отмечено в [5, 6], равно в среднем 11,7 мм.

2. Стекловидное тело представлено телом шарообразной формы с выемкой в месте расположения хрусталика.

3. Геометрия близкая к оригинальной (см. рис. 1). Здесь кривая 1 строится аналогично построению нижней части хрусталика. Кривая 2 – часть окружности с радиусом 11,7 мм. Кривая 3 – часть окружности с радиусом, меньшим на величину Δ радиуса кривой 2.

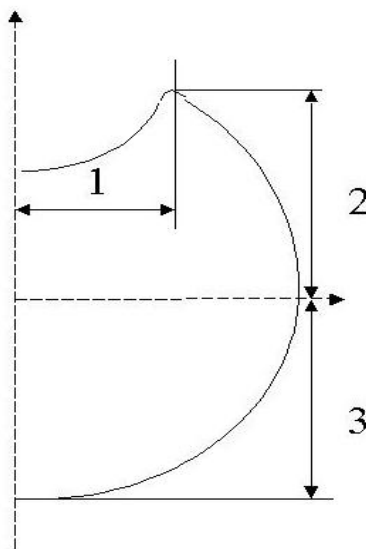


Рис. 1. Геометрическая схема стекловидного тела

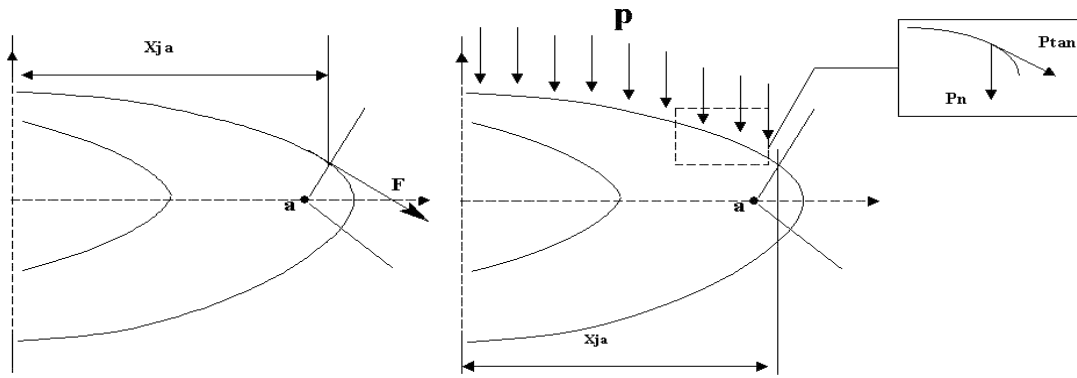


Рис. 2. Геометрическая и силовая схемы капсулы хрусталика глаза (в обозначениях [1])

Контактная пара с геометрией, приближенной к оригинальной, рассматривалась для двух случаев внешнего воздействия.

- Нагрузка, распределенная по части верхней поверхности хрусталика. В стекловидном теле запрещено любое перемещение нижней точки по всем осям.
- Помимо воздействия на хрусталик глаза дополнительно прикладывается распределенная нагрузка к нижней полусфере стекловидного тела (по кривой от нижней точки до максимальной по экватору).

В процессе работы над вопросом процесса аккомодации было решено несколько задач и, на основе полученных результатов, сделаны выводы об изменении формы (и, как следствие, преломляющей силы) хрусталика глаза в зависимости от модели стекловидного тела и характера приложенной нагрузки. В данной работе представлены результаты наиболее интересных, по мнению автора, задач.

Модель

Оболочка заполнена гелеобразным веществом, внутренний объем оболочки считается постоянным и, дополнительно, присутствует более жесткое ядро, полученное пересечением двух сфер. По первой схеме натяжение волокон цинновой связки представлено силой F , приложенной согласно [1] в точке x_{ja} и направленной под углом α к горизонту. По второй схеме оболочка подвергается деформации под действием распределенной по верхней поверхности нагрузки, имитирующей сокращение мышц, соединяющих капсулу хрусталика со стекловидным телом.

Стекловидное тело состоит из гелеобразного вещества, сходного с ядром хрусталика.

Практическая реализация задач. Контакт с жестким диском

Следует заметить, что порядок рисунков идет согласно расположению на рис. 2, а именно: слева – воздействие точно приложенной силы, справа – распределенной по поверхности нагрузки. В качестве стекловидного тела взят абсолютно жесткий диск. К верхней части хрусталика прикладывается давление, имитирующее сокращение мышц, соединяющих хрусталик со стекловидным телом и, для сравнения, в точке x_{ja} [1] прикладывается сила F . После деформации контактная пара выглядит так, как показано на рис. 3-5.

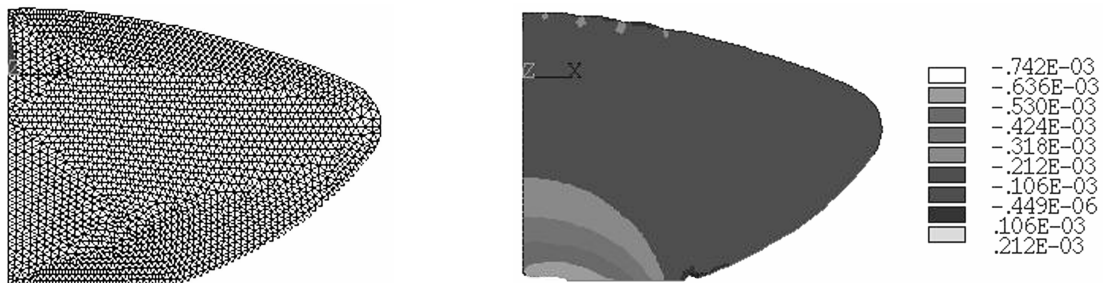


Рис. 3. Контактная пара после деформации

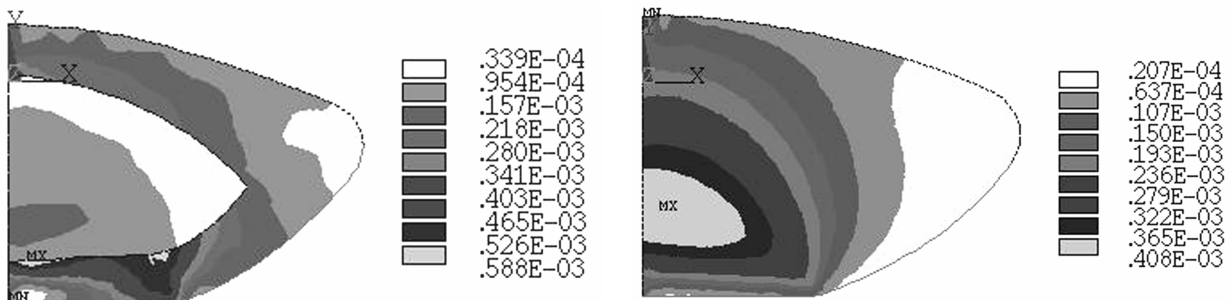


Рис. 4. Вывод изолиний экваториального напряжения по Мизесу



Рис. 5. Поля перемещений U_x

Из первой задачи видно, что более информативным является случай с приложением распределенной нагрузки по поверхности хрусталика, поэтому далее будет продемонстрировано решение только этого типа нагрузки для различной геометрии стекловидного тела.

Контакт с шаром

В качестве стекловидного тела берется шар с радиусом $R = 11,7$ мм. Стекловидное тело состоит из гелеобразного вещества. В статье приведены результаты двух задач для данной формы стекловидного тела.

Деформация хрусталика происходит посредством приложения нагрузки, распределенной по верхней поверхности хрусталика. В стекловидном теле запрещено любое смещение для нижней точки стекловидного тела. Вторая модель помимо воздействия на капсулу хрусталика глаза включает в себя еще и воздействие на стекловидное тело. К нижней полусфере (по кривой от нижней точки до максимальной по экватору) прикладывается распределенная по поверхности нагрузка. Рисунки, отвечающие второй постановке, будут располагаться справа. Напомним, что все механические и геометрические данные для хрусталика глаза остаются без изменений (рис. 2).

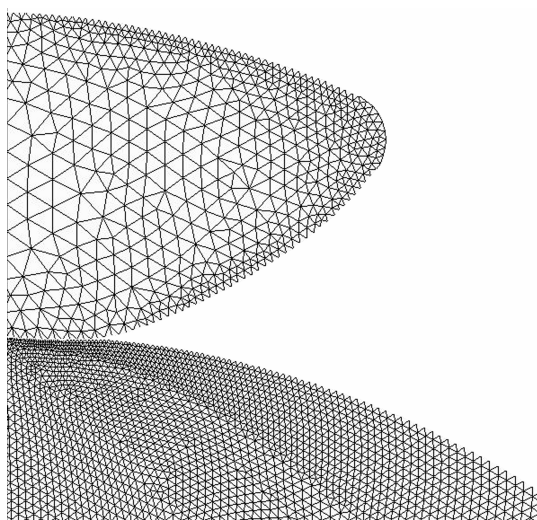


Рис. 6. Контактная пара после деформации

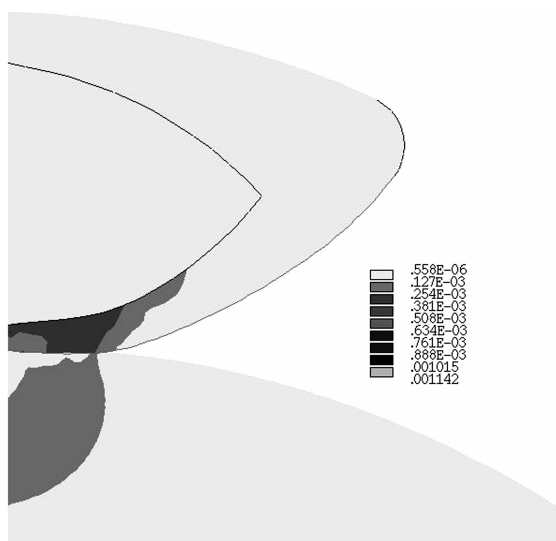


Рис. 7. Вывод изолиний экваториального напряжения по Мизесу

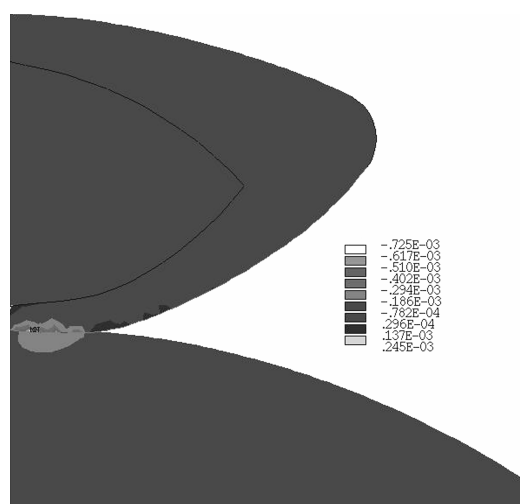


Рис. 8. Вывод изолиний изменения гидростатического давления

Контакт с телом шарообразной формы (геометрия, близкая к оригинальной)

В этом пункте представлены результаты решения самой полной из поставленных задач. Хрусталик остается без изменений (рис. 2). Геометрическая схема стекловидного тела была представлена на рис. 1. Деформация хрусталика глаза происходит посредством воздействия как на хрусталик, так и на стекловидное тело. Силовая схема как для капсулы хрусталика, так и для стекловидного тела аналогична представленной на рис. 2. К хрусталику прикладывается нагрузка, равномерно распределенная по верхней поверхности (по кривой от верхней точки до x_{ja} [1]). К стекловидному телу прикладывается нагрузка, равномерно распределенная по нижней поверхности (от нижней точки до максимальной по экватору).

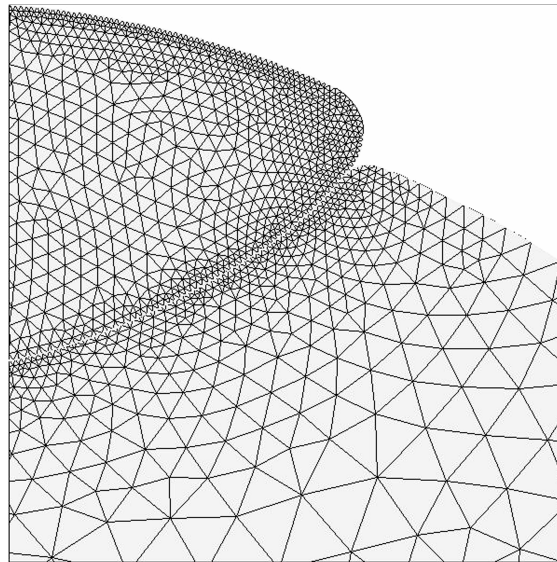


Рис. 9. Контактная пара после деформации

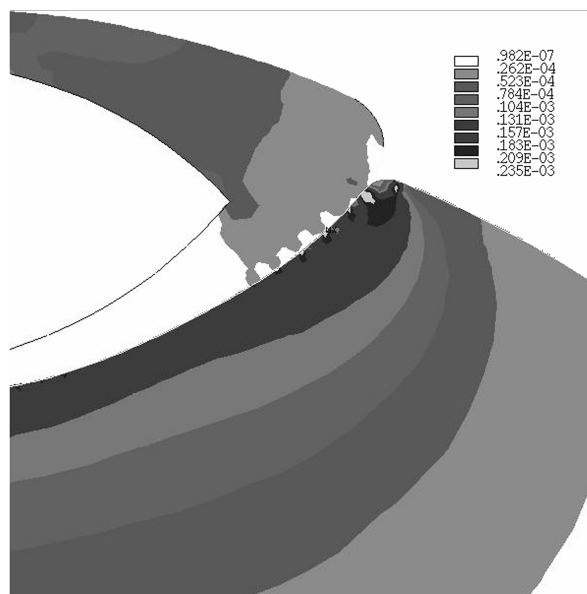


Рис. 10. Вывод изолиний экваториального напряжения по Мизесу

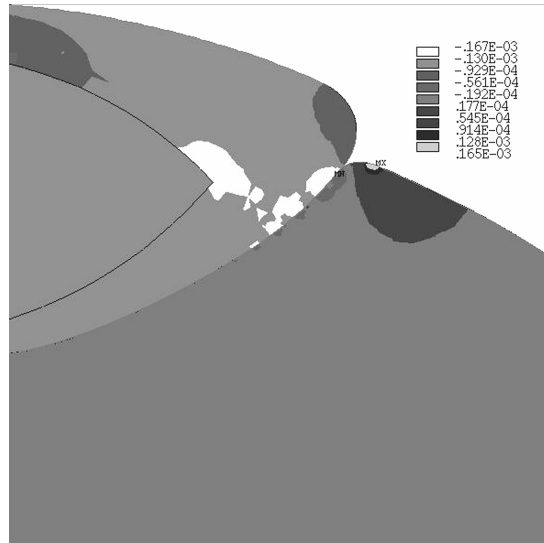


Рис. 11. Вывод изолиний изменения гидростатического давления

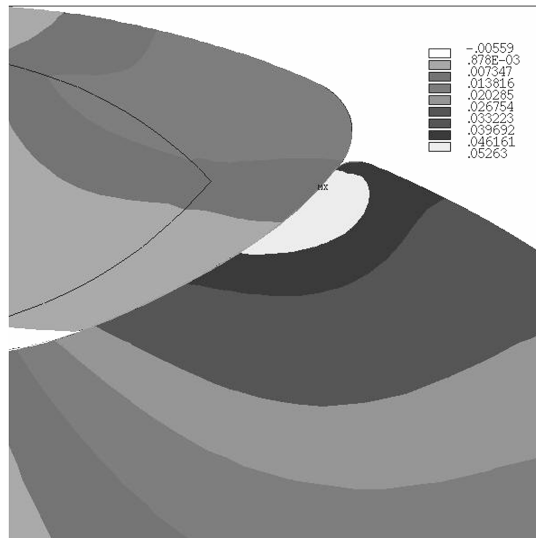


Рис. 12. Поля перемещений U_x

Результаты и выводы

Целью работы было исследование процесса аккомодации с учётом проведенных ранее работ, современных данных о строении человеческого глаза и анализ полученных результатов.

Для этого использовались условия Р. Шахара [1] (геометрия для построения хрусталика глаза, точки крепления мышц и т.п.) с некоторыми "улучшениями", такими как: ввод в рассмотрение более жесткого ядра в хрусталике; ввод в рассмотрение стекловидной камеры с геометрией, близкой к оригинальной, и ее контакт с хрусталиком; натяжение волокон цинновой связки представлено нагрузкой, распределенной по поверхности хрусталика (в дополнение к точечно приложенной).

Полученные результаты, рис. 6-12, подтверждают корректность теории Гельмгольца. Расчеты также показывают, что при взгляде вдаль давление внутри хрусталика увеличивается, а при взгляде вблизи – уменьшается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 04-01-00258.

Список литературы

1. *Schachar, R.A.* Mathematical Proof of Schachar's Hypothesis of Accommodation / R.A. Schachar, Tseng Huang, Xin Huang // *Annals of Ophthalmology*. – 1993. – Vol. 25. – P. 5-9.
2. *Schachar, R.A.* Cause and Treatment of Presbyopia With a Method for Increasing the Amplitude of Accommodation / R.A. Schachar // *Annals of Ophthalmology*. – 1992. – Vol. 24. – P. 445-452.
3. *Burd, H. J.* Numerical modelling of the accommodation lens / J. S. Burd, H. J. Judge, J. A. Cross // *Vision Research*. – 2002. – Vol. 42. – P. 2235-2251.
4. *Burd, H. J.* Mechanics of accommodation of the human eye / H. J. Burd, S. J. Judge, M. J. Flavell // *Vision Research*. – 1999. – Vol. 39. – P. 1591-1595.
5. *Исполова, Е.А.* Статистический анализ процесса хрусталиковой аккомодации / Е.А. Исполова, Б.А. Смольников, О.В. Светлова, И.Н. Кошиц // *Биомеханика глаза. Сборник трудов IV семинара*. Москва, 12 марта 2004. – М., 2004.
6. *Ljubimova, D.* Numerical study of effect of vitreous support on eye accommodation / D. Ljubimova, A. Erikson, S. Bauer // *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. – 2005. – Vol. 5.

ON THE DEFORMATION OF THE EYE CRYSTALLINE LENS AT ACCOMMODATION

O.V. Ivanova (St. Petersburg, Russia)

The problem of the eye crystalline lens deformation at accommodation, when it is influenced by the vitreous, is considered. As a result, the change of pressure in the eye crystalline lens at accommodation is studied.

Key words: eye biomechanics, theory of accommodation, crystalline lens, deformation.

Получено 11 октября 2005