

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической теории упругости и биомеханики

Биомеханическая модель глазного яблока

АВТОРЕФЕРАТ

студентки 2 курса 237 группы
направления 01.04.03 Механика и математическое моделирование
механико-математического факультета
Яковлевой Ирины Валерьевны

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м. н.

А. А. Голядкина

подпись, дата

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

Л. Ю. Коссович

подпись, дата

Саратов, 2022

Введение

Зрение является важнейшим и очень сложным механизмом. Почти 90% информации воспринимается именно благодаря зрению поэтому важно следить нормальным функционирование этого органа.

Внутриглазное давление (ВГД) или офтальмотонус — важный диагностический критерий нормального функционирования глаза. Внутри него находится жидкость, которая оказывает необходимое давление на стенки глазного яблока. Это помогает сохранять форму глаза, защищать его от деформации. Также этот критерий обеспечивает оптимальное кровообращение в тканях глазного яблока.

В настоящее время накоплено множество данных, относящихся к анатомии и физиологии органа зрения человека. Разрабатываются биомеханические модели, позволяющие смоделировать воздействие на глаз различных внешних факторов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

На сегодняшний день существует несколько способов измерения внутриглазного давления (ВГД): тонометрия по Маклакову и тонометрия по Гольдману [7, 8, 9]. Последние часто используются при измерении ВГД за счет своей простоты и точности. Точность методов тонометрии по Маклакову и Гольдману в основном зависит от центральной толщины роговицы и радиус кривизны роговицы.

Данные методы являются контактными, а значит во время процедуры возрастает напряжение и происходит деформация роговой оболочки глаза. В работе [10] изучается зависимость от приложенной нагрузки (веса штампа тонометра) напряженно-деформированного состояния слоев роговой оболочки. Однако предложенная модель не способна оценить влияние нагрузки на внутренние ткани глазного яблока, такие как радужная оболочка, ресничное тело, хрусталик, сосудистая оболочка, сетчатка и стекловидное тело. К тому же не было изучено влияние горизонтально направленного давления на глаз. Деформации и напряжения, возникающие на внутренних тканях глазного яблока могут влиять на их свойства и функционирование. Поскольку

тонометры Маклакова и Гольдмана используются наиболее часто за их точность и простоту, важно изучить их влияние на все составляющие глаза в том числе и внутренние, для того чтобы понимать в каких случаях следует использовать тот или иной метод.

Для моделирования и изучения влияния нагружения тканей глаза на их напряженно-деформированное состояние в данной работе предложена модель глазного яблока, имеющая практически все элементы, присутствующие в настоящем глазу, имеющие механическое подобие в соответствии с их физико-механическими свойствами.

Цель работы: создание биомеханической модели глаза человека для исследования влияния контакта штампа и тканей глаза при измерении внутриглазного давления.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Изучение анатомии строения глаз.
2. Анализ существующих конечно-элементных моделей глазного яблока.
3. Изучение методов измерения внутриглазного давления.
4. Построение 3D – модели глаза человека с учетом его анатомического строения.
5. Биомеханическое моделирование глаза человека для оценки влияния контакта штампа и тканей глаза при измерении внутриглазного давления.
6. Анализ результатов биомеханического моделирования.

Научная новизна:

Разработана новая биомеханическая модель глазного яблока человека, учитывающая анатомическое строение и физико-механические характеристики глазного яблока.

Разработанная модель впервые применена для анализа влияния контакта штампа тонометра и тканей глаза при измерении внутриглазного давления.

Впервые выполнен численный анализ различных методов тонометрии, определены области числовых значений напряженно-деформированного

состояния тканей глаза до и после тонометрического измерения внутриглазного давления.

С помощью разработанной модели получен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния тканей глазного яблока человека после применения методов измерения внутриглазного давления с помощью тонометра Маклакова и тонометра Гольдмана.

Научная значимость:

Разработанная биомеханическая модель глазного яблока может быть использована для изучения влияния различных нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) тканей глаза человека. Биомеханическая модель тканей глазного яблока позволяет оценить роль напряженно-деформированного состояния отдельных структур глаза в ее механизме и создает основу для разработки новых адекватных методов измерения внутриглазного давления.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы выпускной квалификационной работы, формулируются цели и задачи работы, описываются существующие методы измерения внутриглазного давления, существующие конечно-элементные модели глаза человека, перечисляются основные результаты, выносимые на защиту, указывается научная новизна и практическая значимость.

Первая глава «Постановка задачи» посвящена описанию строения человеческого глаза и классификации различных его структур. Приводится аналитический обзор литературы, посвященной существующим биомеханическим моделям различных структур глаза, а так же существующим методам измерения и корректирования внутриглазного давления.

Вторая глава «Биомеханическая модель глазного яблока» посвящена поэтапному построению биомеханической модели, приведены программные средства, используемые в программе SolidWorks, размеры и объемы элементов глазного яблока. Так же приведены программные средства, используемые в

программном комплексе ANSYS. Изложены граничные условия, описано моделирование нагрузок и контактного взаимодействия.

Для максимального приближения модели к реальной физиологии глаза при ее построении выполнялись геометрическое (формы и размеры) и механическое (физико-механические свойства) подобие.

Разработанная биомеханическая модель человеческого глаза (рисунок 1) включает в себя следующие элементы: роговая оболочка, склера, радужная оболочка, ресничное тело, хрусталик, сосудистая оболочка, сетчатка, часть зрительного нерва, стекловидное тело.

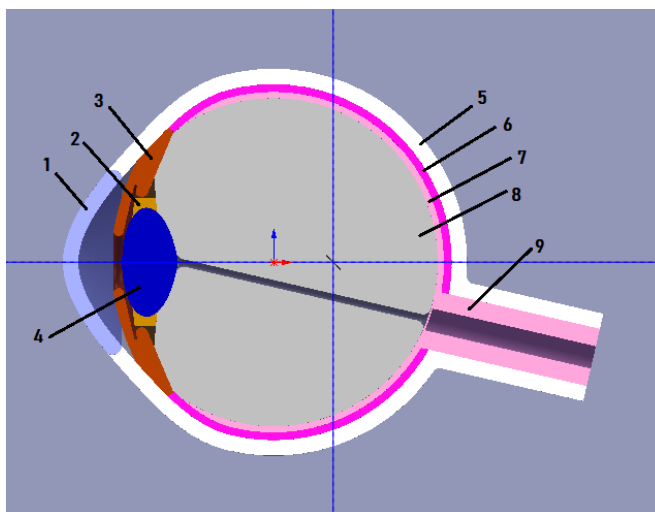


Рисунок 1 - Внутреннее строение глазного яблока человека. 1- роговица, 2-ресничное тело, 3-радужка, 4-хрусталик, 5- склера, 6-сосудистая оболочка, 7-сетчатка, 8-стекловидное тело, 9- зрительный нерв

В качестве граничных условий предполагалось, что узлы принадлежащие поверхности склеральной оболочки жестко закреплены (рисунок 2). Используется жёсткая фиксация в сечении внешней поверхности склеры в экваториальной зоне глазного яблока в перпендикулярном направлении. Такой выбор граничных условий связан с предположением, что корнеосклеральная оболочка является осесимметричным телом вращения, и при её нагружении плоскости проходящие через ось вращения (симметрии) не могут смещаться в перпендикулярном направлении.

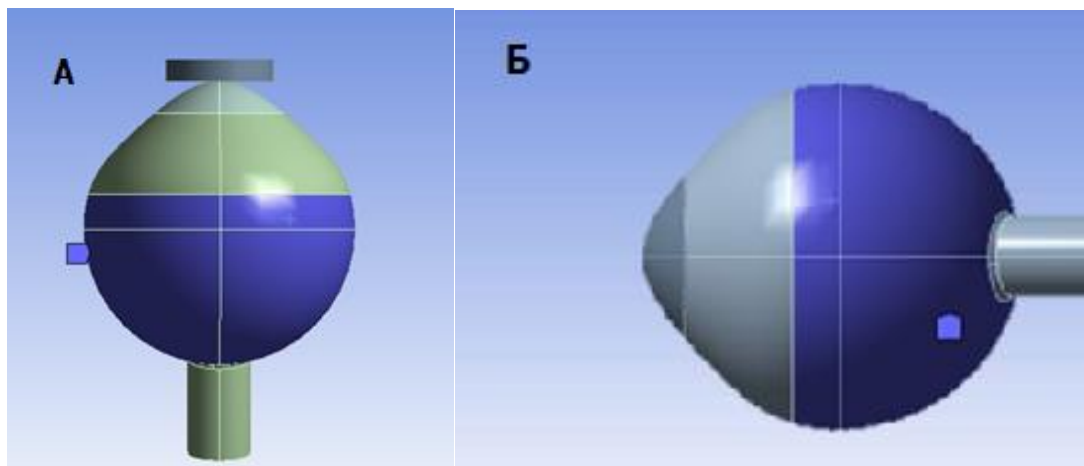


Рисунок 2 -Жесткое закрепление зоны склеральной оболочки: А-случай тонометрии по Маклакову, Б-случай тонометрии по Гольдману

На модель глазного яблока была наложена нерегулярная тетраэдрическая расчетная сетка с размером ребра ячейки 0,5 мм тип элементов SOLID 187, а на модель штампа гексаэдрическая с размером ребра ячейки 0,3 мм тип элементов SOLID 186. На рисунках 3 и 4 представлены вычислительные сетки для моделей глазного яблока в случаях тонометрии по Маклакову и по Гольдману соответственно.

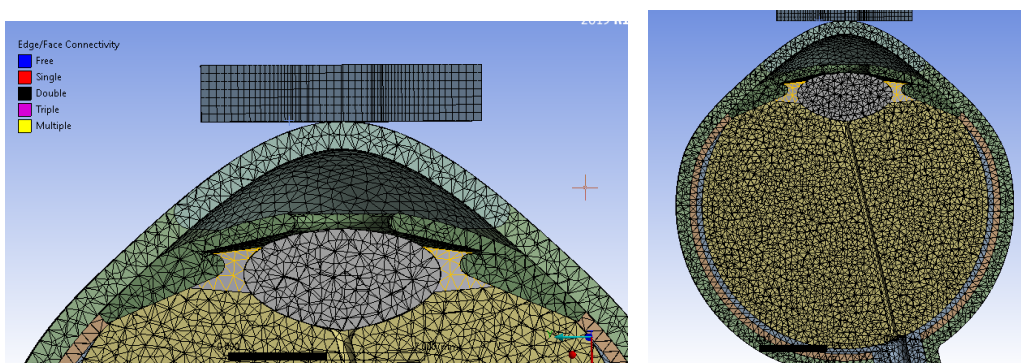


Рисунок 3 - Вычислительная нерегулярная тетраэдрическая сетка на модели глазного яблока в случае тонометрии по Маклакову

При моделировании решалась статическая задача теории упругости о действии компрессионной (осевой) нагрузки на объект исследования. В рассматриваемой задаче выполняются уравнения:

$\sigma_{ij,j} = 0$, – уравнения равновесия;

$\sigma_{ij} = \lambda \Theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$, – уравнения закона Гука;

$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$, – соотношения Коши,

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, u_i – компоненты вектора перемещений, λ, μ – упругие константы Ламе, $\Theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ – объёмное расширение, δ_{ij} – символ Кронекера.

В каждой точке смежных границ (хрусталик – ресничное тело, хрусталик – стекловидное тело, ресничное тело – радужная оболочка, ресничное тело – стекловидное тело, радужная оболочка – сосудистая оболочка, радужная оболочка – склера, радужная оболочка – стекловидное тело, сосудистая оболочка – сетчатка, сетчатка – стекловидное тело, зрительный нерв – склера, склера – роговая оболочка, роговая оболочка – штамп) принимались условия полного контакта для функций перемещения, которые обеспечивают жесткое соединение между всеми элементами тканей, и непрерывность поля деформаций при приложении нагрузки к рассматриваемым моделям.

В поставленной задаче граничные условия имеют смешанный вид. Граница в модели глазного яблока может быть разбита на 2 части, так что $S = S_\sigma \cup S_u$.

На части границы S_σ действуют поверхностные силы

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3)n_j|_{S_\sigma} = P_i(x_1, x_2, x_3),$$

где P_i – компоненты вектора заданных на S_σ поверхностных сил, n_j – компоненты вектора внешней нормали к поверхности S_σ .

На части границы S_u заданы перемещения

$$u_i(x_1, x_2, x_3)|_{S_u} = u_i^*(x_1, x_2, x_3),$$

где u_i^* – компоненты вектора заданных на S_u перемещений.

В случае моделирования тонометрии по Маклакову на поверхность штампа было приложено давление в размере 9,8 Па (рисунок 4). Во втором случае, при использовании метода тонометрии по Гольдману, задавалось перемещение штампа по направлению к главному яблоку в размере 3,76 мм (рисунок 5).

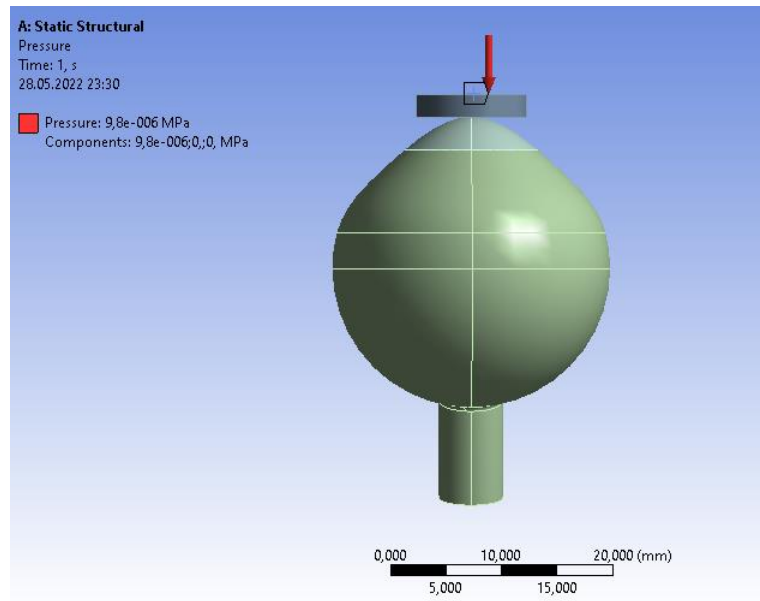


Рисунок 4 - Приложение давления на поверхность штампа

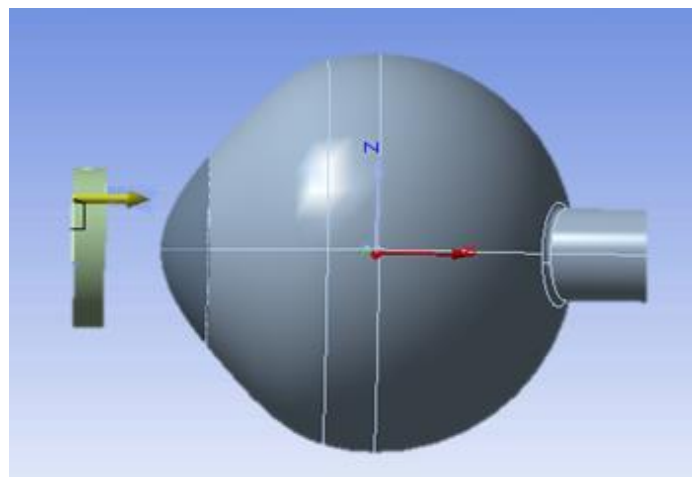


Рисунок 5 - Задание перемещения штампа по направлению к главному яблоку

Третья глава «Анализ результатов биомеханического моделирования» посвящена анализу результатов биомеханического моделирования. Были получены значения, указанные в таблице 1, и рисунки полей перемещений для случаев нагрузки тканей глазного яблока при перемещении штампа и воздействии собственным весом штампом (рисунок 6, 7).

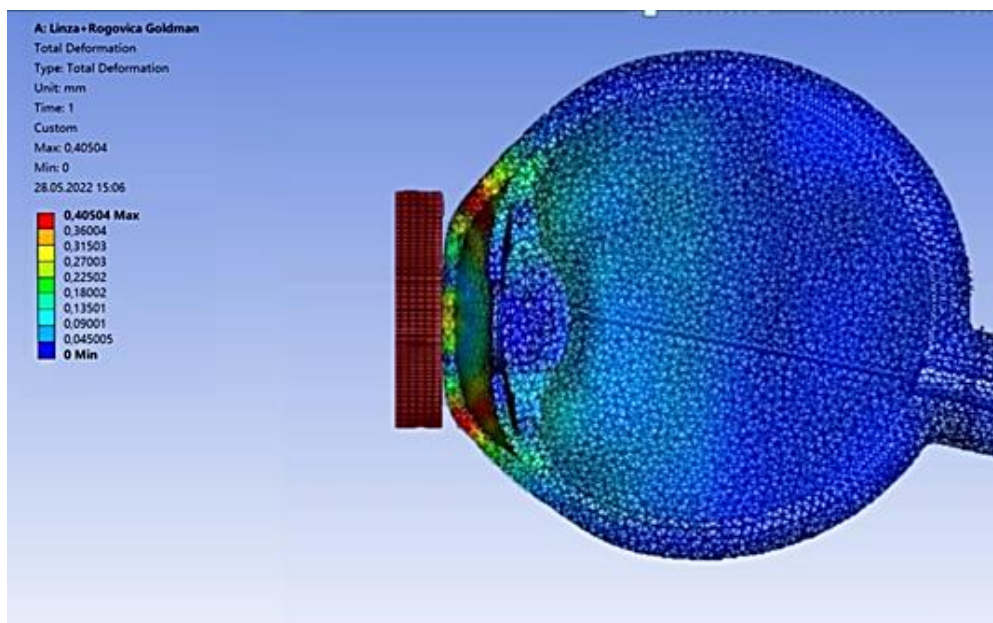


Рисунок 6 - Поле перемещений в тканях при передвижении штампа по направлению к главному яблоку

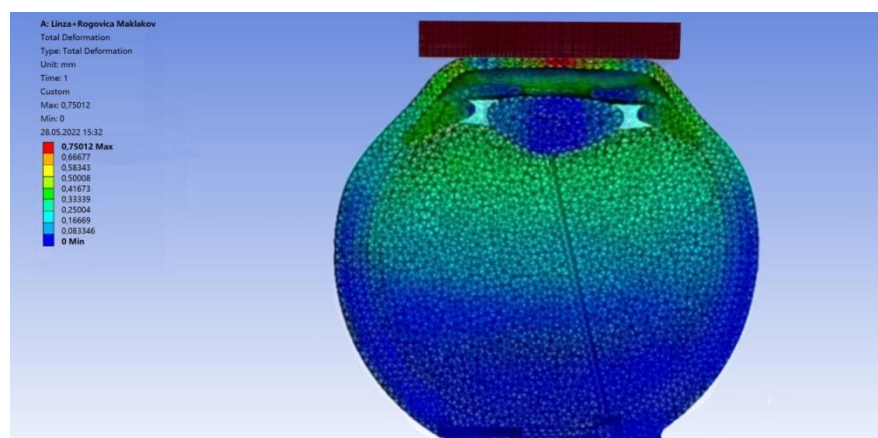


Рисунок 7 - Поле перемещений в тканях при нагружении плоским штампом весом 10г

Таблица 1 - Сравнение значений поля перемещений , мм

Ткани глаза	Тонометрия по Маклакову	Тонометрия по Гольдману
Роговая оболочка	0,7501	0,405
Склера	0,5006	0,2699

Радужная оболочка	0,4998	0,2621
Ресничное тело	0,3339	0,1802
Хрусталик	0,0002	0,0001
Сосудистая оболочка	0,2266	0,1025
Сетчатка	0,1255	0,0845
Зрительный нерв	0	0
Стекловидное тело	0,0003	0,0001

Так же получены значения, указанные таблице 2, и рисунки полей эквивалентных напряжений для случаев нагрузки тканей глазного яблока при перемещении штампа и воздействии собственным весом штампом (рисунок 8, 9).

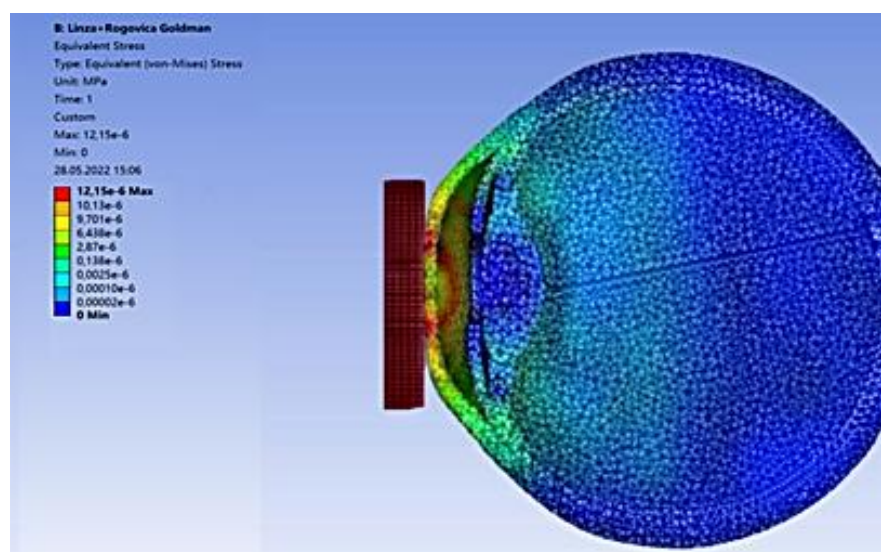


Рисунок 8 - Поле перемещений в тканях при передвижении штампа по направлению к главному яблоку

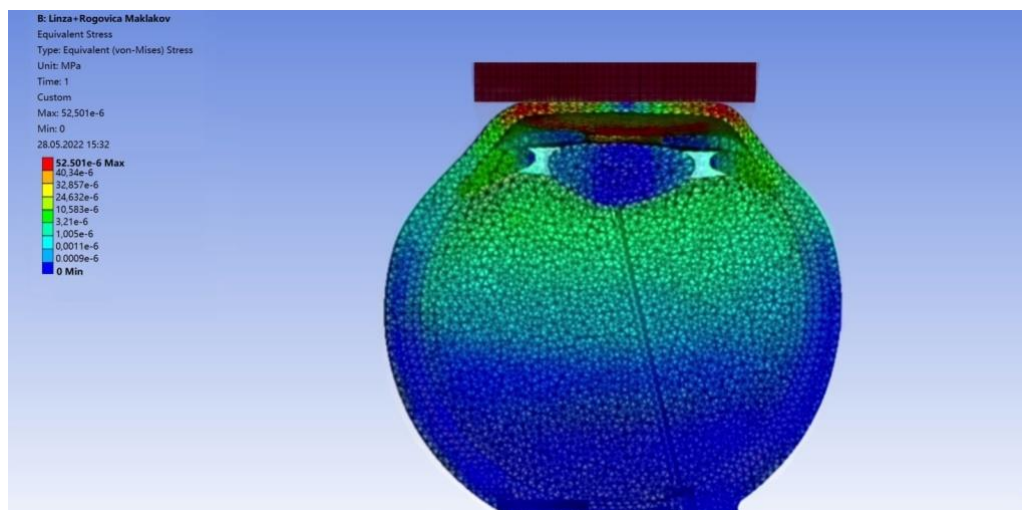


Рисунок 9 - Поле перемещений в тканях при нагружении плоским штампом весом 10г

Таблица 2 - Сравнение значений поля эквивалентных напряжений, МПа

Ткани глаза	Тонометрия по Маклакову	Тонометрия по Гольдману
Роговая оболочка	$52,501 \cdot 10^{-6}$	$12,15 \cdot 10^{-6}$
Склера	$10,013 \cdot 10^{-6}$	$5,375 \cdot 10^{-6}$
Радужная оболочка	$8,2487 \cdot 10^{-6}$	$2,2281 \cdot 10^{-6}$
Ресничное тело	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$0,0102 \cdot 10^{-6}$
Хрусталик	$0,0004 \cdot 10^{-6}$	$0,0002 \cdot 10^{-6}$
Сосудистая оболочка	$4,28 \cdot 10^{-6}$	$0,0004 \cdot 10^{-6}$
Сетчатка	$2,5096 \cdot 10^{-6}$	$0,0002 \cdot 10^{-6}$
Зрительный нерв	0	0
Стекловидное тело	$0,0008 \cdot 10^{-6}$	$0,0003 \cdot 10^{-6}$

В выводе третьей главы произведен анализ полученных данных. Выяснилось, что измерение внутриглазного давления методом нагружения тканей глазного яблока штампом массой 10 граммов сильнее влияет на механические характеристики глазного яблока, чем измерение внутриглазного

давления методом перемещения штампа по направлению к глазу до зоны контакта диаметром 3,06 мм. Из чего можно сделать заключение, что второй способ измерения внутриглазного давления менее травматичный для всех тканей глазного яблока человека. При его использовании напряженно-деформированное состояние глазного яблока изменяется меньше, чем при методе Маклакова, а значит меньше вероятность растяжения тканей глаза, которое может привести к изменению формы и объема глазного яблока.

В заключении представлено обобщение и краткий анализ полученных результатов, сформулирована новизна и научно-практическая значимость работы.

Заключение

1. Разработана биомеханическая модель глаза человека, выполненная в пакете математических программ «ANSYS», имеющая достаточно точное геометрическое подобие эллипсоидальных форм глаза человека. 3D компьютерная модель включает численное моделирование с помощью расчётной методики основанной на применении метода конечных элементов.

2. Разработанная модель трёхмерных эллипсоидальных оболочек, применена для анализа влияния контакта штампа и тканей глаза при измерении внутриглазного давления.

3. Конечно-элементное моделирование воздействия собственным весом штампа на глазное яблоко и при перемещении штампа по направлению глаза, проведённое в Главе 2, показало, что в первом случае в тканях глазного яблока возникает значительно большее напряжение и деформация, чем во втором.

4. Выполнен анализ конечно-элементного моделирования различных методов измерения внутриглазного давления. По результатам анализа можно сделать вывод о том, что тонометрическое обследование с использованием тонометра Гольдмана менее травматично для тканей глазного яблока, чем с использованием тонометра Маклакова.