

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научно-исследовательской работе  
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
д.ф.-м.н., профессор  
А.А. Соколовский



« 9 »

2017 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

по диссертации Франуса Дмитрия Валерьевича «Конечно-элементные модели механики деформируемого тела в задачах офтальмологии» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.08 – Биомеханика, выполненной на кафедре математической теории упругости и биомеханики.

Тема диссертационной работы утверждена на заседании Ученого совета механико-математического факультета от 18.05.2017 г., протокол № 10.

Соискатель Франус Дмитрий Валерьевич окончил в 2006 г. федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по направлению магистратуры «Механика, прикладная математика» с присвоением степени магистра математики и механики.

Диссертация «Конечно-элементные модели механики деформируемого тела в задачах офтальмологии» выполнена на кафедре математической теории упругости и биомеханики.

В период подготовки диссертации Франус Дмитрий Валерьевич являлся соискателем кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Справка об обучении выдана 08.11.16 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель Бауэр Светлана Михайловна, доктор физико-

математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Санкт-Петербургского государственного университета, представила положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании кафедры математической теории упругости и биомеханики с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других образовательных учреждений высшего образования и научных учреждений. На заседании присутствовали:

Коссович Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой математической теории упругости и биомеханики;

Белосточный Григорий Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Вильде Мария Владимировна, д.ф.-м.н., профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Скрипаль Александр Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела;

Скрипаль Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики;

Кириллова Ирина Васильевна, к.ф.-м.н., доцент, директор образовательно-научного института наноструктур и биосистем ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;

Иванов Дмитрий Валериевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Доль Александр Викторович, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Сафонов Роман Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Колесникова Анна Сергеевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Голядкина Анастасия Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Анофрикова Наталия Сергеевна, к.ф.-м.н., доцент, директор института электронного и дистанционного обучения ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Сорокина Ольга Валентиновна, ст. преподаватель кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Сергеева Надежда Викторовна, аспирант кафедры математической теории упругости и биомеханики;

Донник Анна Михайловна, аспирант кафедры математической теории упругости и биомеханики;



Сулова Мария Юрьевна, аспирант кафедры математической теории упругости и биомеханики.

Рецензенты диссертации:

Скрипаль Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, представил положительный отзыв;

Голядкина Анастасия Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, представила положительный отзыв.

После доклада соискателя в процессе обсуждения работы соискателю были заданы следующие вопросы:

1. С чем связан выбор граничных условий (жёсткая фиксация внешней поверхности сечения склеры в экваториальной зоне глазного яблока в направлении оси  $Y$ , жёсткая фиксация внешней поверхности сечения плоскости  $XY$  по оси  $Z$ , плоскости  $YZ$  – по оси  $X$ )? Вопрос задал к.ф.-м.н. Иванов Д.В.
2. Как осуществлялось изменение внутреннего гидростатического давления в модели при введении инъекций? Вопрос задал к.ф.-м.н. Сафонов Р.А.
3. Почему в модели используется трансверсально-изотропная оболочка? Вопрос задал д.ф.-м.н., профессор Коссович Л.Ю.

На заданные вопросы соискатель дал следующие ответы:

1. Такие граничные условия позволяют исключить перемещения модели, не ограничивая при этом возможность расширения в любых направлениях.
2. При моделировании решалась обратная задача: задавались различные значения внутреннего давления и производился расчёт изменения объёма внутреннего ядра.
3. Выбор трансверсально-изотропной модели объясняется тем, что, согласно предыдущим исследованиям, модуль упругости в направлении толщины роговицы и склеры на порядок или два меньше, чем тангенциальные модули упругости.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

**Актуальность работы:**

Последние годы уделяется всё большее внимание созданию математических конечно-элементных моделей различных процессов в биологических системах. Такое моделирование позволяет лучше понять причины и механизмы развития различных явлений в биологических структурах человека, помогает в развитии новых методик лечения различных заболеваний и аномалий. Глаз человека представляет собой сложную биомеханическую структуру. Внешняя оболочка глаза - фиброзная или корнеосклеральная оболочка - состоит из роговицы и склеры. Склера

занимает более 90% всей фиброзной оболочки глаза человека, поэтому в некоторых задачах роговица не включается в модель, а оболочка глаза рассматривается как сферическая. Однако в ряде случаев, когда важно понять, например, как изменяется напряженно-деформированное состояние внешней оболочки глаза при измерении внутриглазного давления (ВГД) или после рефракционных операций, меняющих толщину или кривизну роговицы, необходимо учесть и свойства роговицы.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 149 страниц с 62 рисунками и 26 таблицами. Список литературы содержит 125 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, ставятся задачи, формулируется цель, новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору различных аспектов строения глаза, рефракционных операций и интравитреальных инъекций, используемых в последующем при построении конечно-элементной математической модели.

Во второй главе приведено описание проблемы измерения показателей внутриглазного давления тонометром Маклакова, представлено численное решение контактной задачи нагружения многослойной роговичной оболочки штампом с плоским основанием, получены формулы, которые можно использовать на практике при расчете значения внутриглазного давления.

Третья глава посвящена исследованию влияния интравитреальных инъекций на изменение внутриглазного давления. Рассмотрено несколько простейших математических моделей, одна из которых учитывает нелинейность.

В четвертой главе исследуются задачи, связанные с рефракционными операциями. Проводится оценка изменения показателей внутриглазного давления после рефракционной коррекции дальности зрения. Рассмотрен случай, когда удаляется кольцо с поверхности роговицы. Проведено исследование влияния изменения внутриглазного давления после введения интравитреальной инъекции.

В заключении приведены основные результаты работы, выносимые на защиту.

#### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является исследование влияния различных параметров корнеосклеральной оболочки глаза на её напряженно-деформированное состояние при измерении внутриглазного давления, после рефракционной операции, а также после введения интравитреальной



инъекции.

В работе решены следующие задачи:

1. Анализ влияния параметров роговицы на показания внутриглазного давления при его измерении с помощью нагружения штампом с плоским основанием.
2. Оценка влияния формы корнеосклеральной оболочки на изменение внутриглазного давления при введении интравитреальных инъекций.
3. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойной роговичной оболочки до и после рефракционных операций.
4. Анализ влияния расположения удаляемого материала стромы при рефракционной операции по коррекции дальнозоркости на упругие свойства роговичной оболочки глаза.

#### **Степень достоверности и новизна результатов проведенных исследований:**

Все перечисленные выше результаты являются новыми, получены соискателем лично.

Достоверность результатов обеспечена: применением строгих подходов теории оболочек; использованием современных методов конечно-элементного моделирования; сравнением результатов расчетов с клиническими данными и аналитическими моделями.

#### **Научная новизна работы:**

1. Построена новая компьютерная модель нагружения роговичной оболочки штампом с плоским основанием для различных значений толщины и радиусов кривизны роговичной оболочки в её центре (без учёта кератоконуса).
2. Получены соотношения тангенциальных и радиального модулей упругости склеры, при которых могло бы выполняться строгое условие несжимаемости ткани склеры.
3. Получены значения поправочных коэффициентов для определения внутриглазного давления в зависимости от толщины роговичной оболочки в её центре.
4. Создана биомеханическая модель эллипсоидальной корнеосклеральной оболочки переменной толщины для разных значений длины передне-задней оси глаза, заполненной жидкостью.
5. Проведён расчёт изменения истинного внутриглазного давления в зависимости от объёма дополнительно вводимой жидкости для

эллипсоидальной формы корнеосклеральной оболочки.

6. Разработана биомеханическая модель многослойной роговичной оболочки глаза, описывающая изменение напряжённо-деформированного состояния, после коррекции зрения при дальнозоркости.
7. Выполнен численный анализ различных вариантов расположения удаляемого слоя, при операции типа LASIK и IntraLASIK при дальнозоркости. Определены области предпочтительные для проведения операции по коррекции зрения (наибольшее сокращение внешнего радиуса кривизны, сохранение внутреннего радиуса кривизны, и равномерность деформаций после нагружения).

#### **Практическая значимость:**

Разработанная параметрическая конечно-элементная модель эллипсоидальной корнеосклеральной оболочки (позволяющая изменять геометрические и механические характеристики) может быть использована для дальнейших научных исследований в области офтальмологии. В том числе, как инструмент врача офтальмолога для определения наиболее эффективной области удаления кольцевого слоя и проведения операции по коррекции зрения с учётом особенностей конкретного пациента.

Аналитические соотношения и функциональные зависимости, полученные при решении задачи о влиянии введения дополнительного объёма жидкости на изменение внутриглазного давления в зависимости от параметров глаза, позволяют определить допустимый объём вводимой интравитреальной инъекции для конкретных случаев.

Полученные значения поправочных коэффициентов позволят точнее определять значение внутриглазного давления в зависимости от толщины роговичной оболочки в её центре.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:**

Все новые результаты, полученные соискателем, опубликованы в статьях и материалах конференций.

#### **Список публикаций в журналах из перечня ВАК:**

1. Бауэр С.М., Венатовская Л.А., Франус Д.В., Федотова Л.А. Оценка изменения напряженно-деформированного состояния глаза и показателей ВГД после рефракционной коррекции гиперметропии //



- Российский журнал биомеханики. - 2015. - Т.19 №2. - С. 136-143. (ВАК)*
2. Франус Д.В. Влияние толщины многослойной роговой оболочки на показатели внутриглазного давления // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. - 2017. - Т.17, № 2. - С. 209-218. - DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-2-209-218. (ВАК)*

**Список публикаций в других изданиях и тезисах конференций:**

1. *Franus D. V. Change in the stress-strain state of the cornea after refractive surgery // International Conference on Mechanics - Seventh Polyakhov's Reading. - 2015. - P. 73-76. (Web of Science)*
2. *Franus D.V. Changes in the stress-strain state of the corneoscleral shell of a human eye after the injection // 2015 International Conference on "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov, SCP 2015 - Proceedings, 2015. - P. 522-525. (Web of Science)*
3. *Franus D. V. Finite-element model of intraocular pressure measurement by Maklakov applanation tonometer // Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016). - 2016. - Vol.4. - P. 6631-6636. (Scopus)*
4. Франус Д.В. Изменение напряжённно-деформированного состояния корнеосклеральной оболочки глаза после введения интрасклеральных инъекций // *Практическая биомеханика: Материалы докладов Всероссийской конференции молодых учёных с международным участием. Под ред. проф. Л. Ю. Коссовича - Саратов. - 2016. - С. 64-66. (РИНЦ)*
5. Франус Д. В. О математических моделях тонографии // *Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды». - СПб.: СПбГУ, 2013. - С. 42-52.*
6. Франус Д.В. Особенности напряженно-деформированного состояния роговицы глаза после лазерной коррекции гиперметропии // *Процессы управления и устойчивость. - 2015. - Т.2 №1. - С. 322-327. (РИНЦ)*

Диссертационное исследование выполнено соискателем лично и самостоятельно.

**Соответствие специальности:**

Диссертационная работа соответствует специальности 01.02.08 «Биомеханика» (Пункты 1, 2 областей исследования).

Диссертация «Конечно-элементные модели механики деформируемого тела в задачах офтальмологии» Франуса Дмитрия Валерьевича

рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.08 «Биомеханика», как удовлетворяющая критериям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842.

Присутствовало на заседании 5 докторов наук и 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 12 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 12 от «23» мая 2017 г.

Заведующий кафедрой  
математической теории  
упругости и биомеханики  
д.ф.-м.н., профессор

Коссович Л.Ю.

Подпись <i>Л.Ю. Коссович</i>	достоверяю
Ученый секретарь	И.А. Русенко
доцент	
"9"	

