

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Дмитрия Валерьевича Франуса «Конечно-элементные модели механики деформируемого твердого тела в задачах офтальмологии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.08–биомеханика

На основании изучения диссертации и автореферата диссертации Д.В. Франуса можно установить следующее:

1. Актуальность темы диссертационной работы обуславливается следующим. В настоящее время в России принята стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, которая определяет приоритеты развития страны на ближайшие 15–20 лет. Среди них на первом месте находится качество жизни людей, т.е. качество здоровья и питание. Одним из главных направлений развития науки в этом направлении является развитие биомедицины, куда важной составной частью входит биомеханика, развитие которой необходимо для удовлетворения запроса общества–обеспечить долгую и активную жизнь каждого члена общества. Переход компьютерных моделей и технологий математического моделирования от фундаментальных исследований к клиническому использованию является одной из важнейших задач на ближайшие годы.
2. Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Полный объем диссертации составляет 150 страниц с 62 рисунками и 26 таблицами. Список литературы содержит 128 наименований, среди которого 8 печатных работ автора диссертации, в которых изложены основные результаты по теме диссертации (две работы изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ: Известия Саратовского университета, Новая серия. Серия математика, механика, информатика, 2017; Российский журнал биомеханики, 2015).
3. Краткое изложение содержания диссертации: Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, проводится исторический обзор работ ученых в области офтальмологии (Ломоносов, Юнг, Гельмгольц, Грефе (основоположник теоретической офтальмологии), Маклаков (изобретатель первого аппланационного тонометра, который до сих пор используется в клинической практике). Во введении ставятся задачи, формулируются цели работы, основные положения, выносимые на защиту, и практические рекомендации по результатам работы.  
Первая глава посвящена описанию строения различных структур глаза, рефракционных операций и интравитреальных инъекций. Указывается, что глаз представляет собой практически шарообразное тело, закрепленное в глазнице при помощи трех пар мышц. Дается достаточно подробное описание анатомии слоев роговой оболочки (эпителий, боуменова мембрана, строма (основная часть роговой оболочки), десцеметова оболочка, эндотелий), а также наружной непрозрачной оболочки–склеры. Далее описываются патологии рефракции (т.е.

процесса преломления световых лучей), а именно близорукость (миопия), дальнозоркость (гиперметропия). Также дается описание внутриглазного давления, а также тонометров Маклакова и Гольдмана для измерения давления. В целом эта глава носит описательный характер и подготавливает к дальнейшему математическому описанию процессов в глазу с помощью метода конечных элементов.

Во второй главе дается описание проблемы измерения внутриглазного давления с помощью тонометра Маклакова. В этом случае о внутриглазном давлении судят на основе полученного в эксперименте диаметра зоны контакта тонометра с роговицей.

В данной главе представлено новое трехмерное конечно-элементное моделирование контактной задачи теории упругости при нагружении роговой оболочки штампом с плоским основанием в программном математическом пакете ANSYS. Исследуется изменение напряженно-деформированного состояния роговой оболочки при нагружении штампами различного веса. Также изучается вопрос о влиянии толщины роговой оболочки и ее слоев при приложении плоского штампа на показатели внутриглазного давления. Разработанная биомеханическая модель корнеосклеральной оболочки включает в себя следующие элементы: четырехслойную роговую оболочку, склеральную оболочку и плоский штамп. Обсуждаются граничные условия, соответствующие осесимметричному нагружению оболочки без перемещений как жесткого целого.

Приведены результаты расчетов при приложении плоских штампов различной массы: 5, 7.5, 10, 15 граммов, имитирующих процесс измерения внутриглазного давления аппланационным тонометром Маклакова с использованием стандартных грузов. А также приводится расчет величины прикладываемой нагрузки, соответствующей заданному диаметру зоны контакта поверхности штампа и роговой оболочки ( $d=3,06$  мм), что соответствует тонометру Гольдмана. Также изучено влияние толщины многослойной роговой оболочки на показатели внутриглазного давления.

В третьей главе диссертации исследовано влияние интравитреальных инъекций на внутриглазное давление. Рассмотрено несколько простейших математических моделей, одна из которых учитывает нелинейность. Интересно также рассмотрение изменения внутриглазного давления при интравитреальном введении лекарственного раствора для различных по форме оболочек глаза. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с клиническими данными о влиянии величины переднезадней оси.

Наконец, в четвертой главе рассматриваются задачи, связанные с рефракционными операциями. В известных работах практически всегда рассматриваются проблемы коррекции миопии. В этом случае меняется толщина в центре роговицы. При коррекции дальнозоркости удаляется кольцевой слой роговицы. Расчет позволяет найти изменения напряженно-деформированного состояния, а также внутриглазное давление при измерении давления тонометрами Гольдмана и Маклакова.

4. Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что в данной работе получены следующие новые научные и практические результаты:
- 1) Разработана компьютерная математическая трехмерная конечно-элементная модель корнеосклеральной оболочки, включающая в себя склеру и роговую оболочку, состоящую из четырех слоев: эпителия, боуменовой мембраны, стромы и десцементной оболочки. Компьютерная модель позволяет изменять различные геометрические характеристики, в том числе общие и локальные толщины различных слоев оболочки и варьировать упругие характеристики каждого слоя, используемого в модели.
  - 2) Построенная математическая модель позволяет решить ряд важных клинических задач офтальмологии:
    - а) произведен анализ влияния параметров роговицы на показатели внутриглазного давления при измерении с помощью нагружения штампом с плоским основанием,
    - б) оценено влияние формы корнеосклеральной оболочки на измерение внутриглазного давления при интравитреальных инъекциях.
    - в) дан анализ напряженно-деформированного состояния многослойной роговой оболочки до и после рефракционных операций,
    - г) проведен анализ влияния расположения удаляемого материала стромы при кераторефракционной операции по коррекции дальновзоркости на упругие свойства роговой оболочки глаза.
5. Обоснование и достоверность полученных результатов подтверждаются физической обоснованностью результатов и сравнением с клиническими данными.
- 6 В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующее:
- 1) Обычно при решении различных задач с помощью методов математического моделирования сначала дается концептуальная постановка задачи (без применения математического аппарата), а затем приводится математическая постановка с учетом соответствующих уравнений, краевых и начальных условий. При этом особое внимание уделяется обоснованию определяющих соотношений. В данной работе такая математическая постановка отсутствует.
  - 2) Желательно было бы ставить каждую задачу как задачу оптимального управления с соответствующей целевой функцией.
- Приведенные замечания (скорее это пожелания) не влияют на общую положительную оценку работы.
- Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

**ОБЩЕЕ РЕЗЮМЕ.** На основании вышесказанного можно утверждать, что представленное исследование является решением важной научной проблемы биомеханики в офтальмологии. Работа выполнена на высоком теоретическом уровне и имеет важные практические применения.

Считаю, что диссертационная работа Д.В. Франуса «Конечно-элементные модели механики деформируемого твердого тела в задачах офтальмологии» удовлетворяет требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.08–биомеханика, а ее автор Дмитрий Валерьевич Франус заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.08–  
биомеханика.

Официальный оппонент, заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
главный редактор «Российского журнала биомеханики, научный руководитель  
кафедры теоретической механики и биомеханики Пермского национального  
исследовательского политехнического университета, доктор технических наук,  
профессор

Няшин Юрий Иванович

15 августа 2017 года

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: [nyashin@inbox.ru](mailto:nyashin@inbox.ru)

Подпись Ю.И. Няшина заверяю,  
Ученый секретарь университета,  
Кандидат исторических наук, доцент



В.И. Макаревич