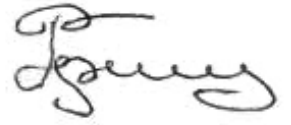


На правах рукописи



Гришина Ольга Александровна

**БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВИДА РЕКОНСТРУКТИВНОГО
ВМЕШАТЕЛЬСТВА НА КРОНАРНЫХ АРТЕРИЯХ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА**

Специальность 01.02.08 – биомеханика

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена на кафедре математической теории упругости и биомеханики
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Саратовский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент
Кириллова Ирина Васильевна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Устинов Юрий
Анатольевич**, ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет»

кандидат физико-математических наук **Добдин Сергей Юрьевич**, ФГБОУ
ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Ведущая организация: ФГБУН Институт иммунологии и физиологии
Уральского отделения Российской Академии наук

Защита состоится 6 декабря 2013 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета
Д 212.243.10 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
корп. IX, ауд. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского
государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Автореферат разослан «01» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат физ.-мат. наук, доцент



Шевцова

Ю.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основными причинами смертности населения промышленно-развитых стран являются заболевания сердечно-сосудистой системы, в частности, ежегодно ишемическая болезнь сердца (ИБС) является причиной смертности приблизительно 7,3 миллионов человек (Мировой отчет по неинфекционным заболеваниям, 2010 г. Женева, ВОЗ; Global atlas on cardiovascular disease prevention and control. Geneva: World Health Organization; 2011). Уровень летальности, масштабы инвалидизации и временной нетрудоспособности при ИБС в целом и заболеваниях коронарных артерий в частности, которые характеризуются нарушением миокардиального кровоснабжения, представляют не только важную медицинскую, но и серьезную социально-экономическую проблему, так как в первую очередь речь идет о наиболее молодой, высококвалифицированной и творчески активной части населения.

Для разработки рекомендаций по выбору рационального метода проведения коронарного шунтирования, наиболее успешного метода хирургического лечения коронарных артерий, необходимым является построение максимально точной биомеханической модели и изучение механики сосуда с точки зрения гемодинамической теории атерогенеза (Serdar Göktepe, Oscar John Abilez, Ellen Kuhl, 2010). Биомеханическая модель коронарных артерий позволит провести оценку гемодинамики артерий на стадии предоперационного обследования пациента, спрогнозировать естественное течение заболевания, а также разработать рекомендации для выбора рациональной методики хирургического вмешательства на коронарных артериях.

К настоящему моменту времени накоплен большой опыт в исследовании гемодинамики и напряженно-деформированного состояния коронарных артерий (D.N. Ku, 1997, D. Lee, 1999, E.S. Weydahl, 2001, J.S. Cole, 1999, M.R. Kaazempur-Mofrad, 2001, A. Leuprecht, 2002, N.K. Schiller, 2010, Abigail Swillens, Marloes De Witte, 2012, Foad Kabinejadian, 2010, Sethuraman Sankaran, 2012, et.al.). Однако, в публикациях нет данных, описывающих механическое поведение анатомически

реальных коронарных артерий с учетом их взаимодействия с миокардом, а также оценки степени эффективности хирургических вмешательств по восстановлению рационального кровотока в коронарных артериях сердца человека.

В связи с этим вопрос о создании биомеханической модели коронарных артерий, учитывающей физиологические особенности, является актуальным.

Цель диссертационной работы. Создание биомеханической модели, описывающей поведение коронарных артерий сердца человека в норме, при различных патологиях и после реконструктивной операции, а также разработка рекомендаций для выбора рациональной методики проведения коронарного шунтирования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

- исследовать механические свойства коронарных артерий с учетом возрастных изменений и половой принадлежности;
- исследовать механические свойства аутоартериальных и аутовенозных трансплантатов, применяемых при коронарном шунтировании;
- воссоздать максимально точную трехмерную геометрию здоровых и пораженных коронарных артерий, а также системы, восстанавливающей кровотоки в коронарном русле;
- определить изменение объемного кровотока в здоровом русле, при различных патологиях и после хирургического вмешательства;
- определить изменения эквивалентных напряжений и поля перемещений стенок коронарных артерий в норме, при различных патологиях и после хирургического вмешательства;
- определить изменения давления и характера поведения потока в здоровом русле, при различных патологиях и после хирургического вмешательства;
- провести верификацию разработанной биомеханической модели коронарного русла на основе клинических данных;

- использовать полученную биомеханическую модель для разработки рекомендаций по выбору рациональной методики коронарного шунтирования.

Научная новизна. В работе впервые проведено исследование деформационно-прочностных характеристик коронарных артерий сердца человека в зависимости от возрастной и половой изменчивости (в воздушной среде и физиологическом растворе). Впервые проведено комплексное исследование гемодинамики с учетом напряженно-деформированного состояния анатомически реальных моделей коронарных артерий сердца человека при воздействии интрамиокардиального давления в здоровом состоянии, при различных степенях атеросклеротического поражения, спазмах и многососудистом поражении коронарного русла, а также после проведения аортокоронарного шунтирования основных ветвей коронарного русла различными аутоартериальными и аутовенозными трансплантатами.

Практическая значимость. Разработанная биомеханическая модель коронарных артерий сердца человека может быть использована для изучения нормальной и патологической физиологии коронарного русла, что позволяет более обоснованно оценить риск ишемической болезни сердца, а также разработать биомеханическое обоснование выбора рационального хирургического вмешательства по восстановлению миокардиального кровоснабжения. При приближении к реальным условиям может быть адаптирована к виртуальной операции.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением универсальной испытательной аппаратуры (настолярная одноколонная испытательная машина Instron 5944, зарегистрирована в Государственном Реестре Российской Федерации под номером 43602-10), высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также соответствием результатов, полученных в ходе определения механических параметров стенок коронарных артерий и кондуитов, применяемых

при коронарном шунтировании, результатам, опубликованным в отечественной и зарубежной печати (в области совпадения испытаний).

Достоверность результатов численного моделирования, приведенных в работе, обеспечивается применением апробированных моделей, строгостью используемых математических методов при построении решения поставленных задач и их анализе, проверкой сходимости численного решения, согласованием полученных результатов с клиническими данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на

- Всероссийской научной школе-семинаре «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине», Саратов, 2009 – 2012.
- Всероссийской конференции «III сессия Научного совета РАН по механике деформируемого твердого тела», Саратов, 2009.
- X Всероссийской конференции «Биомеханика 2010», Саратов, 2010.
- XIV Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», Ростов-на-Дону, 2010.
- Международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях», Харьков (Украина), апрель 2011.
- X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Н.Новгород, 2011.
- XXIV Международной научно-практической конференции «Теория и практика в физико-математических и технических науках» (London, International Academy of Science and Higher Education), май 2012. (заочно-интерактивная).
- Всероссийской школе-семинаре «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете», Ростов-на-Дону, 2012 – 2013.
- Международной конференции «Актуальные проблемы механики сплошной среды», посвященной 100-летию академика НАН Армении Н.Х.Арутюняна, Цахкадзор (Армения), 8–12 октября 2012 г.

- Научных семинарах кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», 2009 – 2013.
- Международной научной конференции «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур», Минск (Беларусь), 16-20 сентября, 2013.

Гранты. Работа, представленная в диссертации, выполнена при финансовой поддержке следующих проектов: «Разработка математических методов оптимизации хирургического лечения ишемической болезни сердца» (РФФИ 09-01-00804-а), «Разработка методических пособий по рекомендации выбора оптимального хирургического лечения ишемической болезни сердца человека на основе методов математического моделирования» (программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере).

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Исследованы деформационно-прочностные свойства коронарных артерий сердца человека. Выявлено влияние возрастного и полового факторов.
2. Упруго-деформационные свойства и диаметр желудочно-сальниковой артерии являются наиболее близкими к соответствующим параметрам ветвей правой коронарной артерии. Механические характеристики внутренней грудной артерии наиболее схожи с параметрами дистальных сегментов коронарных артерий и огибающей ветви коронарных артерий.
3. Методика построения высокоточной модели коронарных артерий на основе *in-vitro* данных.
4. Биомеханическая модель коронарных артерий сердца человека при воздействии интрамиокардиального давления в здоровом состоянии.
5. Биомеханическая модель коронарных артерий сердца человека при воздействии интрамиокардиального давления при различных степенях атеросклеротического поражения, спазмах и многососудистом поражении русла.

6. Биомеханическая модель коронарных артерий сердца человека при воздействии интрамиокардиального давления после проведения аортокоронарного шунтирования основных ветвей сосудистого русла различными аутоартериальными и аутовенозными трансплантатами.

7. Анализ результатов численных расчетов, проведенных с использованием биомеханической модели коронарных артерий сердца человека, показал влияние стеноза на гемодинамику коронарного русла – возникновение зон турбулентности, уменьшение объемного кровотока через пораженную ветвь, формирование гемодинамических условий для развития атеросклероза.

8. Расчеты, проведенные на основе созданной биомеханической модели коронарных артерий, позволяют обосновать выбор рациональной методики проведения коронарного шунтирования.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 16 печатных работах, из них четыре статьи в журналах, указанных в списке ВАК РФ [7–10].

Личный вклад автора. Все основные экспериментальные результаты диссертации, связанные с получением механических свойств материалов, а также результаты численного моделирования, изложенные в диссертационной работе, получены автором лично и самостоятельно. Соавторы публикаций принимали участие в выработке целей исследования, в подготовке и проведении натурных экспериментов, в обсуждении результатов. Забор, препарирование материалов и заливка коронарного русла проводилась ассистентом кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского» Минздрав России Челноковой Н.О. с соблюдением рекомендаций комитета по этике.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы. Материал работы изложен на 170 страницах, содержит 173 рисунка, 8 таблиц. Список цитированной литературы содержит 147 наименований.

Во введении раскрывается актуальность темы диссертационного исследования, приводятся основные сведения о методах исследования и решении аналогичных задач, определяются цель и задачи исследования, дается краткая аннотация диссертационного исследования, формулируется научная и практическая значимость разрабатываемой биомеханической модели коронарных артерий сердца человека.

Первая глава посвящена основным сведениям об анатомо-физиологических особенностях коронарных артерий (КА) сердца человека (см. рис. 1, 2), основных типах миокардиального кровоснабжения, рассмотрен механизм и стадии развития коронарного атеросклероза, приведена классификация атеросклеротических поражений коронарных артерий, описываются методы лечения ишемической болезни сердца, а также представлены известные математические модели артериальной стенки.

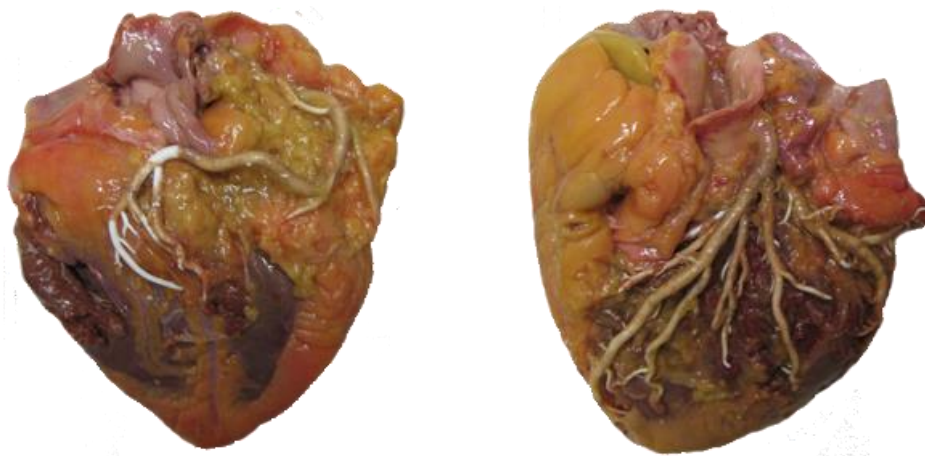


Рис. 1. Сосудистое русло коронарных артерий сердца человека



Рис. 2. Сегментация коронарных артерий

Основным заболеванием коронарных артерий является атеросклероз, в результате которого возникает нарушение миокардиального кровоснабжения. Наиболее распространенная патология коронарного русла – гемодинамически значимые атеросклеротические поражения нескольких сосудистых бассейнов (многососудистое поражение). При этом до сих пор не существует строгих критериев последовательности выполнения оперативных вмешательств при хирургическом лечении патологий КА, в том числе при многососудистых поражениях.

Наиболее успешным методом лечения ишемии миокарда является коронарное шунтирование, которое улучшает исходы у пациентов с выраженным поражением ствола, многососудистым поражением и при снижении функции левого желудочка. Оклюзия шунтов встречается примерно у 10 - 15% пациентов в первый месяц, 20% – в первый год, 30% – за 5 лет, 40% – за 10 лет. Процент рестеноза при стентировании сохраняется на уровне 12 – 40% в первый год и 65 – 75% в течение 5 лет.

Во второй главе представлены результаты исследования физико-механических свойств образцов коронарных артерий сердца человека при одноосном растяжении.

Разработана методика постановки натурального эксперимента по одноосному растяжению биологических тканей. Проведен численный эксперимент по подбору формы образца сосуда и условий его крепления. Выявлено, что для проведения механических испытаний биологических образцов, рациональной является прямоугольная форма без площадки для захватов. Надежную фиксацию образца без повреждений в районе пневматических захватов обеспечивает величина давления, равная 2 Бара.

В соответствии с разработанной методикой проведен эксперимент на образцах сегментов коронарных артерий сердца человека (60 – в воздушной среде, 30 – в жидкой среде), внутренних грудных артерий, лучевых артерий, локтевых артерий, нижних надчревных артерий, желудочно-сальниковых артерий и больших подкожных вен, изъятых у трупов людей обоего пола в возрасте от 30

до 70 лет не позднее суток после наступления смерти. Исследования проводились в день забора материала, не позднее двух часов после аутопсии. До начала экспериментов образцы сохранялись в физиологическом растворе при температуре 20 ± 1 °С.

В результате эксперимента получены графики, отражающие зависимость «относительное удлинение – напряжение», для правой и левой коронарных артерий с учетом возрастных изменений, половой принадлежности, отдаленности сегмента от основного ствола.

График поведения тканей коронарных артерий при растяжении в физиологическом растворе имеет ярко выраженный линейный характер. На примере конкретного пациента (см. рис. 3, 4) показана зависимость относительных удлинений от напряжений для коронарных артерий в различных средах.

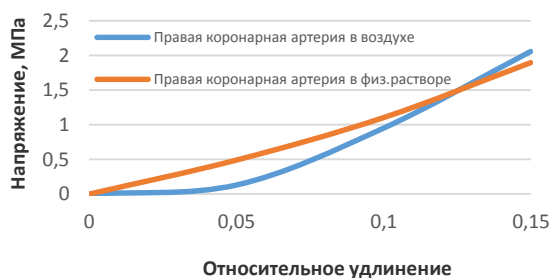


Рис. 3. Зависимость относительных удлинений от напряжений для правой коронарной артерии в различных средах

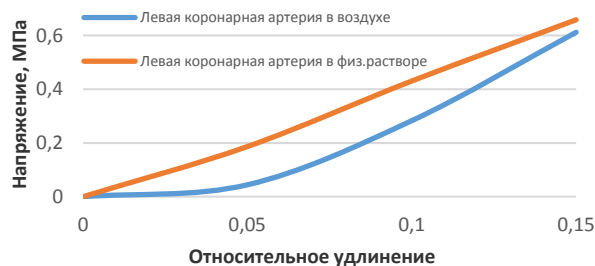


Рис. 4. Зависимость относительных удлинений от напряжений для левой коронарной артерии в различных средах

Создана база данных биомеханических параметров стенок коронарных артерий и материалов, используемых при реконструктивно-восстановительных операциях на коронарном русле.

Анализ полученных результатов выявил рост жесткости ткани сосудов и потерю эластичности при отдаленности сегмента от устья артерии, а также при возрастных изменениях, в особенности для людей мужского пола. Упругие свойства передней нисходящей ветви с возрастом не изменяются.

Упруго-деформационные свойства и диаметр желудочно-сальниковой артерии являются наиболее близкими к соответствующим параметрам ветвей

правой коронарной артерии (см. рис. 5). Механические характеристики внутренней грудной артерии наиболее схожи с параметрами дистальных сегментов коронарных артерий и огибающей ветви КА (см. рис. 6).

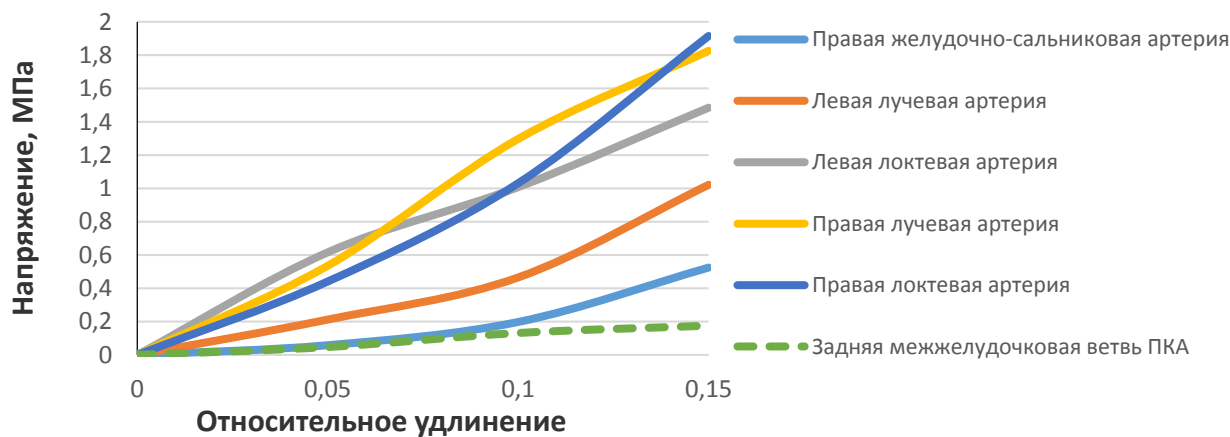


Рис. 5. Графики зависимостей относительных удлинений от напряжений для кондуитов, используемых при шунтировании задней межжелудочковой ветви правой коронарной артерии у пациентов 51 – 60 лет

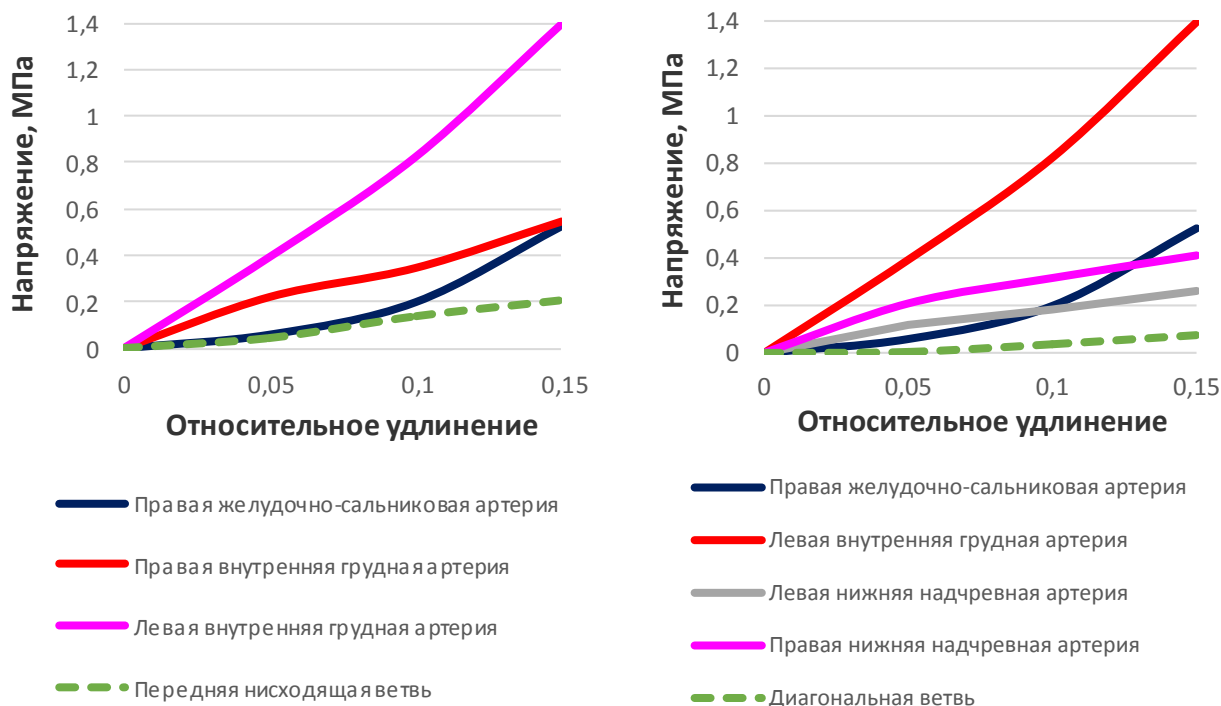


Рис. 6. Графики зависимостей относительных удлинений от напряжений для кондуитов, используемых при шунтировании ветвей левой коронарной артерии у пациентов 51 – 60 лет

В третьей главе дана инструкция для воссоздания максимально точной трехмерной геометрии здоровой и пораженной коронарной артерии, а также сосудистой системы, восстанавливающей кровотоки в коронарном русле.

Для создания трехмерной модели коронарных артерий сердца человека с учетом пространственной ориентированности ветвей проведено построение внешней поверхности сердца.

Для получения картины внутреннего рельефа коронарных артерий проведена заливка русла 120 коронарных артерий 60 сердец людей в возрасте от 30 до 70 лет кислотным силиконовым герметиком.

Для всех полученных препаратов изучена архитектоника, морфологические параметры, внутренний рельеф, а также проведен анализ углов отхождения и разветвлений субэпикардального русла коронарных артерий. Определены форма, степень и локализация патологического сужения русла коронарной артерии.

Пространственная ориентированность ветвей коронарных артерий воссоздавалась по снимкам срезов сердца с учетом морфометрии посредством программного комплекса SolidWorks. На воссозданной поверхности сердца был построен сплайн, соответствующий срединной линии коронарного русла. По точкам сплайна окружностями различного диаметра создавался твердотельный объем, соответствующий внутреннему рельефу сосуда. Стенка артерий воссоздавалась по окружностям большего диаметра с учетом средней толщины стенки и выполнена логическая операция над полученными объемами. В результате получены четыре твердотельных объема, соответствующие внутренней полости и стенке для правой и левой коронарных артерий (см. рис. 7).

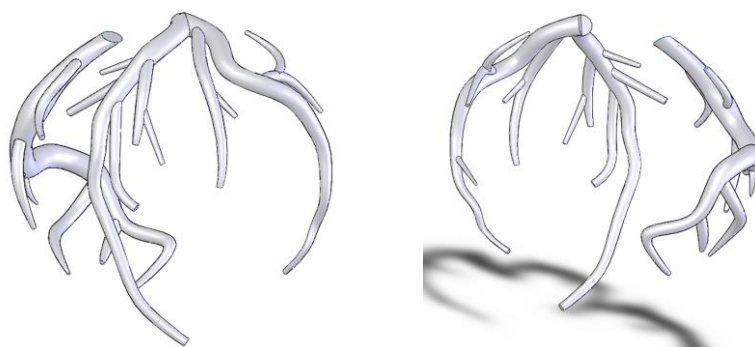


Рис. 7. Трехмерная модель коронарных артерий

Построены модели левой и правой коронарных артерий с симметричным и асимметричным сужениями различной степени (45%, 60%, 75%) (см. рис. 8).

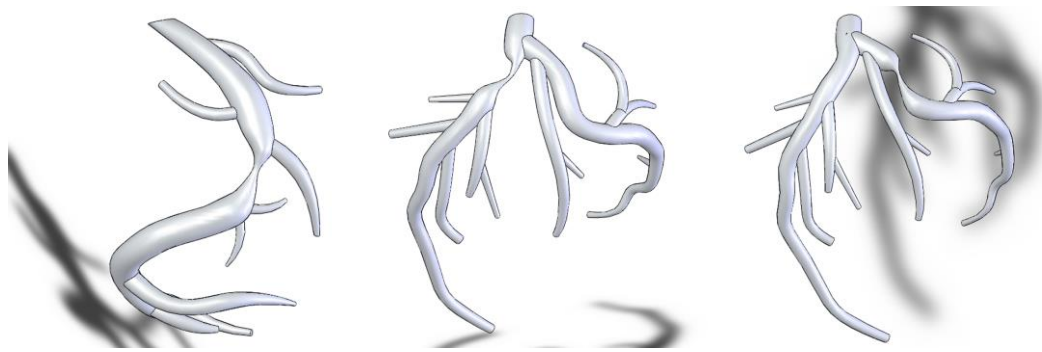


Рис. 8. Модель коронарных артерий с патологическим сужением

Для правой коронарной артерии проведено моделирование сужения средней части ствола, а также правой краевой ветви.

Для левой коронарной артерии проведено моделирование сужения ствола, проксимальной части передней нисходящей и огибающей артерий, а также построена модель левой коронарной артерии с многососудистым поражением.

Четвертая глава посвящена математической постановке связанной упруго-гидродинамической задачи, а также анализу гемодинамики коронарных артерий с учетом их напряженно-деформированного состояния в здоровом состоянии и при различных патологических сужениях (симметричные и асимметричные 45%, 60% и 75% стенозы).

Кровь предполагалась однородной, несжимаемой и ньютоновской жидкостью. Задавалась плотность и динамическая вязкость в явном виде ($\rho_1 = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.0037 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Движение крови описывалось нестационарными уравнениями Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho_1} \nabla p + \vec{f}, \\ \nabla \cdot \vec{v} = 0, \end{cases}$$

где t – время, $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ – коэффициент кинематической вязкости, ρ_1 – плотность

крови, p – давление, $\vec{v} = (u, v, w)$ – вектор скорости частиц жидкости, \vec{f} – векторное поле массовых сил.

Материал стенок предполагался однородным, изотропным, несжимаемым и идеально-упругим. Линейная модель выбрана на основе данных, полученных в результате испытаний образцов коронарных артерий сердца человека в физиологическом растворе (см. рис. 2, 3). Движение стенки в нестационарном случае описывалось вторым законом Ньютона:

$$\rho_2 \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{u}}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{c} \nabla \bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{F}},$$

где $\bar{\mathbf{F}}$ – вектор внешних сил, $\bar{\mathbf{u}} = (\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ – вектор перемещения, \mathbf{c} – тензор жесткости материала стенки, ρ_2 – плотность стенки.

На основе экспериментальных данных (глава 2) выбраны средние значения механических характеристик стенок артерий: $E_1 = 0.55$ МПа – модуль Юнга для левой коронарной артерии, $E_2 = 0.8$ МПа – модуль Юнга для правой коронарной артерии, $E_3 = 1$ МПа – модуль Юнга коронарной артерии с атеросклеротическим поражением, $\rho_2 = 1378$ кг/м³ – плотность стенок артерий.

Граничные условия на стенке задавались в виде: $\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{F}}_0$,

$$\bar{\mathbf{F}}_0 = \bar{\mathbf{n}} \cdot \left(-p\mathbf{I} + \eta \left(\nabla \bar{\mathbf{v}} + (\nabla \bar{\mathbf{v}})^T \right) \right),$$

где $\bar{\mathbf{F}}$ – сила, представляющая собой силы вязкости и давление, $\bar{\mathbf{n}}$ – вектор внешней нормали к границе, \mathbf{I} – единичная матрица, η – динамическая вязкость крови, $\bar{\mathbf{v}} = (\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ – вектор скорости частиц жидкости, p – давление. Сила представляет собой суммарное воздействие давления и сил вязкости на стенку. Торцы сосуда жестко закреплены.

На стенке артерии ставилось условие равенства скоростей частиц жидкости, прилегающих к стенке, и соответствующих частиц стенки:

$$\mathbf{u} = \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t}, \quad \mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t}, \quad \mathbf{w} = \frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial t}.$$

На входе в артерию задавался профиль скорости течения крови, изменяющийся по физиологическому закону.

На выходе задавалась функция давления, соответствующая внесосудистому сжатию сегментов, погруженных в миокард.

С целью выяснения влияния типа граничных условий в зоне контакта артерий с миокардом на характер течения крови в русле было выбрано три типа граничных условий: отсутствие внешних сил, жесткое закрепление зоны контакта и в случае модели, учитывающей сокращение миокарда – внешнее давление сердечной мышцы на поверхность контакта со стенками коронарных артерий. Проведен анализ распределения эквивалентных напряжений, поля перемещений и касательных напряжений. Сравнение с клиническими данными показало, что третий тип граничных условий более корректно описывает физиологический процесс.

Проведена оценка сеточной сходимости модели по трем параметрам – скорость потока, давление, эквивалентные напряжения. Выбран оптимальный размер элементов: 0.0005 м – для жидкости, 0.0008 м – для стенки артерии. В среднем модель левой коронарной артерии включает 1.4 млн. элементов, правой коронарной артерии – 1.2 млн. элементов.

Численное моделирование позволило показать взаимосвязь между гемодинамическими изменениями и образованием атеросклеротических бляшек на стенках коронарных артерий с точки зрения гемодинамической теории атерогенеза и с целью прогнозирования многоэтажного характера поражения русла определить зоны, подверженные атеросклерозу.

При атеросклеротическом поражении русла коронарной артерии наблюдается локальное увеличение скорости кровотока в зоне максимального сужения, наблюдается рециркуляция потока в постстенотических зонах. Данное нарушение ламинарного потока крови по сосуду возникает в ответ на изменение диаметра сосуда. Наиболее типичными местами турбулентного кровотока в коронарных артериях являются разветвления, изгибы, перегибы, и область, расположенная дистальнее места образования атеросклеротической бляшки. В постстенотическом сегменте снижается давление. Данный эффект является

клинически важным, поскольку в этом случае увеличивается вероятность наличия бляшки с неоднородной структурой и высокой эмбологенностью.

В пятой главе приведены результаты моделирования коронарного русла после аортокоронарного шунтирования различными трансплантатами. Полученные данные были проанализированы с точки зрения восстановления объемного кровотока в коронарном русле, а также возникновения гемодинамических условий для рестеноза.

Рассмотрены случаи наличия одного или двух стенозов с учетом их анатомической локализации.

Проведен анализ влияния стеноза на характер потока крови. При 60% стенозе основного ствола левой коронарной артерии возрастает давление и напряжение на стенках передней нисходящей ветви в проксимальном отделе. В случае сформировавшегося стеноза передней нисходящей ветви более 45% – наблюдается рециркуляция крови из передней нисходящей ветви в огибающую (см. рис. 9).

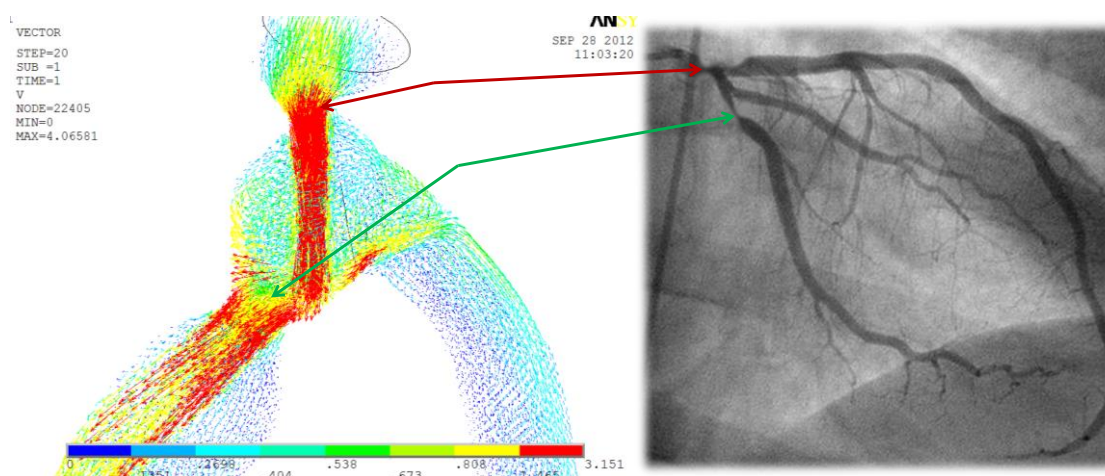


Рис. 9. Вектора скорости в ЛКА с асимметричным 60% стенозом основного ствола и 45% стенозом передней нисходящей ветви

Проведено моделирование левой коронарной артерии с 75% стенозом передней нисходящей ветви. При данной патологии в постстенотическом сегменте давление падает на 70.5%. После наложения аортокоронарного шунта дистальнее пораженного сегмента наблюдается падение давления в постстенотическом сегменте в диастолу на 6%, что компенсируется кровотоком, поступающим по шунту в систолу. Наличие шунта приводит к увеличению

объемного кровотока в сосуде, что свидетельствует о высоком уровне проходимости шунта. Профиль кривой объемного кровотока в большей степени соответствует характерным кривым данного параметра в «нормальном» случае, что отличается от профиля соответствующей кривой в патологическом состоянии.

Построена биомеханическая модель левой коронарной артерии с 60% стенозом огибающей ветви до хирургического вмешательства и после наложения аортокоронарного шунта. В результате наблюдается уменьшение объемного кровотока по сравнению с нормальным состоянием в передней нисходящей ветви в диастолу, что компенсируется увеличением кровотока в систолу. В огибающей ветви кровоток восстанавливается полностью. Наблюдается преимущественно систолическое питание русла и снижение эквивалентных напряжений на стенках артерии на 39%.

При многососудистом поражении русла – 45% стеноз передней нисходящей артерии и 75% стеноз огибающей артерии (см. рис. 10) возможны три метода восстановления миокардиального кровоснабжения: наложения аортокоронарного шунта к огибающей ветви, передней нисходящей ветви и обеим ветвям одновременно (см. рис. 11, 12, 13).

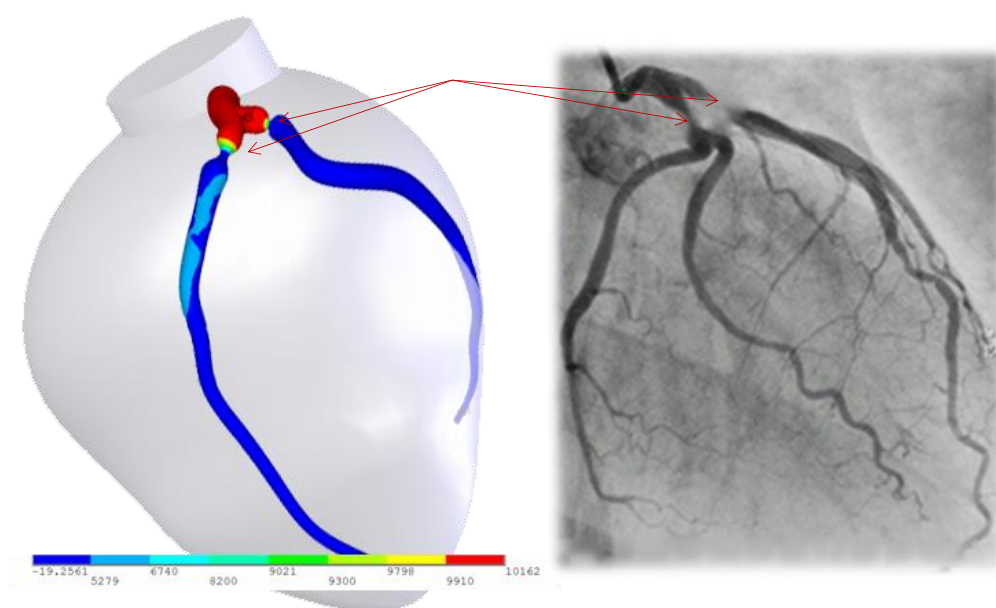


Рис. 10. Распределение давления в левой коронарной артерии с 45% стенозом передней нисходящей ветви и 75% стенозом огибающей ветви



Рис. 11. Шунтирование огибающей ветви



Рис. 12. Шунтирование передней нисходящей ветви



Рис. 13. Шунтирование передней нисходящей и огибающей ветвей

В случае аортокоронарного шунтирования обоих патологических участков наблюдается полное восстановление объемного кровотока во всем русле левой коронарной артерии (см. рис. 14). При этом наблюдается значительное снижение напряжения и деформаций на стенках артерии.

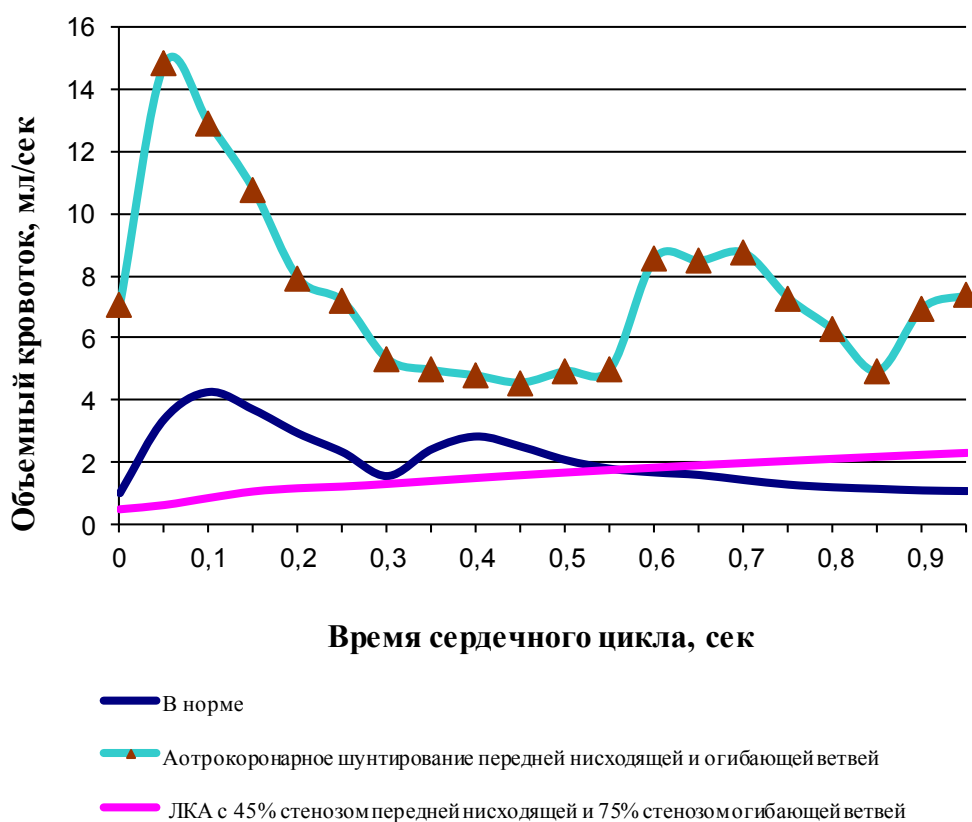


Рис. 14. Изменение объемного кровотока в здоровой левой коронарной артерии и после проведения аортокоронарного шунтирования различными способами

Сравнения результатов моделирования в случае наложения шунтов к различным участкам сосудистого русла позволяет сделать вывод о наличии преимущества третьего типа шунтирования, а именно, одновременного шунтирования нескольких пораженных участков.

Основные результаты и выводы

- Деформационно-прочностные характеристики тканей стенок коронарных артерий сердца человека существенно изменяются под действием возрастного и полового факторов.
- Создана методика построения высокоточной модели коронарных артерий на основе *in-vitro* данных.
- Влияние внешнего давления сердечной мышцы на русло коронарных артерий вызывает увеличение напряжений и деформаций свободной стенки, а также изменение характера течения крови в сосуде.
- Наложение шунта к нескольким стенозированным участкам приводит к полному восстановлению объемного кровотока в русле сосуда и снижению напряжения на стенках артерии.
- Применение трансплантата с диаметром не менее 70% от диаметра русла, к которому проведено коронарное шунтирование, а также соответствие механических характеристик обеспечит адекватный кровоток в области дистального анастомоза.
- Разработано биомеханическое обоснование выбора рациональной методики проведения коронарного шунтирования.

Список публикаций

1. Кириллова, И.В. Механические свойства и построение 3D модели правой коронарной артерии человека / И.В. Кириллова, А.А. Грамакова, **О.А. Щучкина**, Н.О. Челнокова // III сессия Научного совета РАН по механике деформируемого твердого тела: Тез. докл. Всерос. конф. Под ред. проф. Л.Ю. Коссовича. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. – С. 22.
2. Челнокова, Н.О. Прикладные аспекты в построение пространственной 3D геометрической модели правой венечной артерии человека / Н.О. Челнокова, А.А. Грамакова, **О.А. Щучкина**, К.Э. Коряев, Т.А. Тараскин // Молодые ученые – здравоохранению. Материалы 71-й межрегиональной научно-практической конф. студентов и молодых ученых с международным участием, посвященной 65-летию со Дня Победы в Великой Отечественной войне.– Саратов: Изд-во Сарат. мед. ун-та, 2010. – Ч.2 – С. 274 – 275.
3. Кириллова, И.В. Анализ гемодинамики коронарных артерий сердца человека / И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина** // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2010: Материалы ежегодн. Всерос. науч. школы-семинара. Под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. – 2010. – С. 19 – 24.
4. Грамакова, А.А. Анализ механических свойств коронарных (венечных) артерий сердца человека / А.А. Грамакова, И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина**, Н.О. Челнокова // Биомеханика 2010: Тез. докл. X Всерос. конф. Под ред. проф. Л.Ю. Коссовича. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. – С. 61.
5. Кириллова, И.В. Расчет гемодинамики коронарных артерий сердца человека методом конечных элементов / И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина** // Биомеханика 2010: Тез. докл. X Всерос. конф. Под ред. проф. Л.Ю. Коссовича. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. – С. 95.
6. **Щучкина, О.А.** 3-D моделирование и численный анализ гемодинамики коронарных артерий сердца человека / **О.А. Щучкина**, И.В. Кириллова // «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях»: Тез. докл. международной конференции. г.

Харьков, 17–22 апреля 2011г. Под ред. проф. Г.Н. Жолткевича, доц. Н.Н. Кизиловой, доц. П.С. Кабальянца. – Х.: Вировец А.П. «Апостроф», 2011. – С. 119–120.

7. Голядкина, А.А. Анализ напряжённо–деформированного состояния и гемодинамики коронарных артерий и желудочков сердца человека / А.А. Голядкина, И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина** // Вестник Самарского государственного технического университета. – Самара: Изд-во СамГТУ. – 2011. – Серия Физ.-мат. науки №3 (24). – С. 79 – 88.

8. Голядкина, А.А. Клинико-морфологические основы моделирования гемодинамики в системе венечных артерий с учетом их взаимодействия с миокардом / А.А. Голядкина, Н.О. Челнокова, **О.А. Щучкина** // Саратовский научно-медицинский журнал. – Саратов: Изд-во СМУ. – 2011. – №4, Часть 7. – С. 262–268.

9. Голядкина, А.А. Конечно-элементное моделирование ишемической болезни сердца исходя из картины морфо-функциональных изменений венечных артерий и сердечной мышцы человека / А.А. Голядкина, И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина**, Г.Н. Маслякова, Н.В. Островский, Н.О. Челнокова // Российский журнал биомеханики – Пермь: Изд-во Пермского гос.тех. ун-та. – 2011. – Т. 15, № 4. – С.33 – 46.

10. **Щучкина, О.А.** Напряженно-деформированное состояние и гемодинамика коронарных артерий сердца человека / **О.А. Щучкина** // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4, Часть 2. – С. 573 – 575.

11. **Щучкина, О.А.** Численный анализ динамики кровотока и напряженно-деформированного состояния стенок коронарных артерий в норме и при патологии / **О.А. Щучкина**, И.В. Кириллова // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2012: Материалы ежегодной Всероссийской молодежной конф. Под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – С. 31 – 33.

12. Голядкина, А.А. Моделирование гемодинамики коронарных артерий / А.А. Голядкина, И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина**, Л.Ю. Коссович // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Труды международной конф., посвященной 100-летию академика НАН Армении Н.Х.Арутюняна – Тигран Мец., 2012. – Т.1. – С. 167 – 171.
13. **Щучкина, О.А.** Моделирование гемодинамики коронарных артерий с учетом их взаимодействия с миокардом / **О.А. Щучкина**, И.В. Кириллова // «Theory and practice in the physical, mathematical and technical science»: Materials digest of the XXIV International Scientific and Practical Conference and the I stage of Research Analytics Championship in the physical, mathematical and technical science. (London, May 3-May 13, 2012). International Academy of Science and Higher Education; Organizing Committee: T.Morgan (Chairman), B.Zhytnigor, S.Godvint, A.Tim, S.Serdechny, L.Streiker, H.Osad, I.Snellman, K.Odros, M.Stojkovic, P.Kishinevsky, H.Blagoev – London: IASHE, 2012. – P. 11 – 14.
14. Кириллова, И.В. Физико-механические свойства коронарных артерий сердца человека / И.В. Кириллова, **О.А. Щучкина** // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете: Тез. докл. VII Всероссийской школы-семинара, пос. Дивноморское, 28 мая –1 июня 2012 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. – С. 69.
15. **Гришина, О.А.** Выбор оптимального реконструктивного вмешательства на коронарных артериях сердца человека / **О.А. Гришина**, И.В. Кириллова // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете: Тез. докл. VIII Всероссийской школы-семинара, пос. Дивноморское, 27–31 мая 2013 г., Ростов-на-Дону, Изд-во Южного федерального университета. – 2013. – С. 50.
16. **Гришина, О.А.** Конечно-элементное моделирование реконструктивного вмешательства на коронарных артериях сердца человека / **О.А. Гришина**, И.В. Кириллова // Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур: Материалы междунар. науч. конф., 16–20 сент. 2013., г. Минск, Беларусь. Под общ. ред. Г.И.Михасева, Х. Альтенбаха. – Минск: Изд. центр БГУ, 2013. – С. 182 – 183.

Выражаю свою благодарность за помощь и поддержку в выполнении диссертационной работы научному руководителю Кирилловой Ирине Васильевне.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим высылать по адресу:

410012, г. Саратов,
ул. Астраханская, 83.

Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.243.10 Шевцовой Ю.В.

Подписано в печать 25.10.13г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая

Гарнитура Times New Roman Cyr. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии
Саратовского государственного университета

имени Н.Г. Чернышевского

410012, Саратов, Большая Казачья, д. 112-а

Тел. (8452) 27-33-85