

УДК 531/534:[57+61]

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА ИСХОДЯ ИЗ КАРТИНЫ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕНЕЧНЫХ АРТЕРИЙ И СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ ЧЕЛОВЕКА

**А.А. Голядкина¹, И.В. Кириллова¹, О.А. Щучкина¹, Г.Н. Маслякова²,
Н.В. Островский², Н.О. Челнокова²**

¹ Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, e-mail: nipo-bio@sgu.ru

² Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздравсоцразвития России, Россия, 410012, Саратов, ул. Б. Казачья, 112

Аннотация. Данные о современном состоянии здоровья населения Российской Федерации ставят перед исследователями ряд новых задач. Одной из наиболее актуальных является задача поиска новых способов лечения и профилактики заболеваний сердечно-сосудистой системы, поскольку нарушения кровообращения занимают лидирующее положение среди причин инвалидизации и смертности. Комплексное решение данной задачи включает необходимость разработки современных компьютеризированных методов диагностики и лечения, позволяющих количественно оценить состояние пациента на стадии предоперационного обследования и найти оптимальный вариант индивидуализированного хирургического вмешательства по реваскуляризации миокарда, восстановлению геометрии левого желудочка и сердца человека в целом, а также для оптимизации кровотока в системе венечных артерий. Целью данной работы являлось моделирование поведения индивидуальных анатомически реальных венечных артерий с учетом сокращений миокарда. Определение ангиоархитектоники, морфологических параметров, геометрии и механических свойств тканей сердца выполнено на этапе, предшествовавшем процессу моделирования.

Ключевые слова: механические свойства, конечно-элементное моделирование, прогнозирование, венечные артерии, сердце, морфологическое исследование, гистологическое исследование.

© Голядкина А.А., Кириллова И.В., Щучкина О.А., Маслякова Г.Н., Островский Н.В., Челнокова Н.О., 2011

Голядкина Анастасия Александровна, ассистент кафедры математической теории упругости и биомеханики, начальник отдела биомеханики образовательно-научного института наноструктур и биосистем, Саратов

Кириллова Ирина Васильевна, к.ф.-м.н., доц. кафедры математической теории упругости и биомеханики, директор образовательно-научного института наноструктур и биосистем, Саратов

Щучкина Ольга Александровна, аспирант кафедры математической теории упругости и биомеханики, инженер отдела биомеханики образовательно-научного института наноструктур и биосистем, Саратов

Маслякова Галина Никифоровна, д.м.н., профессор, завкафедрой патологической анатомии, Саратов

Островский Николай Владимирович, д.м.н., профессор кафедры оперативной хирургии, начальник отдела клеточной инженерии образовательно-научного института наноструктур и биосистем, главный врач городской больницы №7 Саратовского центра термических поражений, Саратов

Челнокова Наталья Олеговна, ассистент кафедры оперативной хирургии, Саратов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы прогнозирования изменений гемодинамики при атеросклеротическом поражении сосудов бассейна венечных артерий обусловлена активным внедрением в клиническую практику комплексного подхода в лечении ишемической болезни сердца, направленного на оптимизацию кровотока в системе венечных артерий.

Несмотря на достигнутые за последнее десятилетие впечатляющие успехи в совершенствовании методов лечения ишемической болезни сердца и увеличение объема помощи, оказываемой данной категории больных, ишемическая болезнь сердца по-прежнему занимает ведущие позиции в структуре заболеваемости и смертности населения Российской Федерации и развитых стран, уносит значительное число жизней и увеличивает инвалидизацию населения. По данным Всемирной организации здравоохранения, в 2008 г. в 52% случаев смерть наступила вследствие патологии сердечно-сосудистой системы, из них 80% занимает ишемическая болезнь сердца. Темпы роста смертности от ишемической болезни сердца оказываются наиболее высокими у лиц в возрасте 30–60 лет, т.е. трудоспособной части общества. Причиной ишемии миокарда является снижение перфузии, вызванной окклюзией венечных артерий. В основе окклюзионных поражений венечных артерий чаще всего лежит атеросклероз. Большое количество работ, посвященных изучению этиологии, патогенеза, лечения и профилактики нарушений венечного (коронарного) кровотока, свидетельствует об актуальности проблемы. Очевидно и то, что не существует однозначного ее решения.

На сегодняшний день многие авторы [1, 2, 4, 8, 12, 16] указывают на преимущество методов хирургической реваскуляризации миокарда при лечении окклюзионных поражений венечных артерий над терапевтическим. При этом отмечено, что для успешного оперативного вмешательства необходимы тщательное дооперационное обследование, оценка риска операции в сравнении с естественным течением атеросклеротического процесса. В настоящее время применяются различные виды оперативных вмешательств, направленные на восстановление венечного кровотока. Наиболее часто выполняют наложение маммарно-коронарного анастомоза, аортокоронарное аутовенозное шунтирование и стентирование. Рестеноз венечных артерий, который развивается в течение первых 3–8 месяцев даже после успешного вмешательства, представляет собой большую социальную и научную проблему [7, 10, 18]. Критерии отбора пациентов для того или иного метода лечения в различных клиниках отличаются друг от друга, а критериев прогнозирования результатов восстановления кровотока в венечных артериях при реконструктивно-восстановительных оперативных вмешательствах по поводу ишемической болезни сердца в настоящее время не существует. Для определения показаний к выполнению коронарной ангиопластики и шунтированию большее значение имеет анализ исходного состояния кровоснабжения миокарда и коронарного кровотока [3, 4], что возможно сделать, опираясь на результаты моделирования поведения индивидуальных анатомически реальных венечных артерий с учетом сокращений миокарда, а также изучая гидродинамику и напряженно-деформированное состояние желудочков сердца в норме и при патологии.

В последнее время в зарубежной и отечественной литературе появляется все больше публикаций, акцентирующих внимание на гемодинамической теории атерогенеза. Изучению подвергнуты как различные механизмы влияния потока крови на сосудистую стенку, так и влияние пораженной сосудистой стенки на распределение и свойства потоков крови [13, 14, 17].

В свете теории атерогенеза значительный интерес представляют изменения гемодинамики, обусловленные неминуемым нарушением в ходе операции архитектоники и упруго-деформативных свойств сосудистой стенки [11, 19], а также работы по изучению венечных артерий, пораженных атеросклерозом [15].

Интенсивное развитие в хирургии современных методов исследования, активное внедрение компьютерного моделирования в хирургию различных областей [5, 6], применение высоких технологий при проведении оперативных вмешательств и диагностики ишемической болезни сердца вызвало необходимость комплексного изучения сосудистых разветвлений венечных артерий. Становится возможным учет все большего количества факторов, определяющих тот или иной процесс. С помощью индивидуальной компьютерной модели можно достаточно точно выявить и оценить индивидуальные особенности анатомического строения сердца и коронарных артерий, грамотно провести предоперационную подготовку пациента, дать рекомендации оперирующему хирургу, избежать возможных ошибок во время операции, а также провести оценку гемодинамики в венечных артериях до операции и после нее.

Несмотря на огромное количество работ, посвященных моделированию и различным методам исследования сердечно-сосудистой системы, на сегодняшний день нет данных, описывающих гемодинамику и упруго-деформативные свойства нативных венечных артерий с учетом их взаимодействия с миокардом, а также оценки степени эффективности хирургических вмешательств по реваскуляризации миокарда, восстановлению геометрии левого желудочка и сердца человека в целом.

Для изучения гемодинамики и напряженно-деформированного состояния левого желудочка и коронарных артерий сердца человека необходимо построение индивидуальной компьютерной модели с заданными реальными параметрами материала. В связи с этим определение ангиоархитектоники, морфологических параметров, геометрии и механических свойств тканей является необходимым подготовительным этапом процесса моделирования. В данной работе представлены результаты морфологического исследования строения венечных артерий и стенок сердца, гистологического исследования, исследования механических свойств венечных артерий и результаты численного моделирования поведения венечной артерии, закрепленной на пульсирующем миокарде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили 140 нефиксированных сердец, 280 венечных артерий, изъятых у 140 трупов людей мужского пола в возрасте от 30 до 70 лет, не позднее первых суток после смерти, поступивших в Саратовское городское бюро судебно-медицинской экспертизы (забор материала проводился с соблюдением рекомендаций этической комиссии). Во всех случаях причина смерти была не связана с поражением венечных артерий и заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Все материалы были распределены по 4 возрастным группам: I группа – 61–70 лет, II группа – 51–60 лет, III группа – 41–50 лет, IV группа – 31–40 лет.

В соответствии с поставленными задачами в работе использовали следующие методы исследования: оригинальный метод полихромной заливки венечных артерий холодными массами, препарирование, органомерфологию, гистоморфологию, фотографирование, протоколирование, растяжение и сжатие нефиксированных образцов тканей сердца на одноосной разрывной машине *Instron* с использованием *BioBath* для изучения их упруго-деформативных свойств, статистическую обработку, построение компьютерной 3D-модели, численное моделирование.

Использовались гистологические препараты, биологические микроскопы, установка *LEICA LMD 7000* с оптической камерой *HITACHI HV-D20*, органомерметрические и гистоморфометрические инструменты и приспособления, аналитические и торсионные весы, сушильный шкаф, муфельная печь, цифровой фотоаппарат «*NikonCoolpics J3*», программное обеспечение.

Распределение материала в зависимости от метода исследования

Метод исследования	Количество сердец	Количество образцов артерий	
		Правая венечная артерия	Левая венечная артерия
Органометрия	60	60	60
Гистологическое исследование с морфометрией	40	40	40
Исследование механических свойств	40	40	40
Всего	140	140	140

Исследования проводили не позднее первых суток после смерти, пока не произошли значимые морфологические изменения тканей, и полученные данные могли быть экстраполированы на живого человека.

Распределение материала в зависимости от метода исследования представлено в таблице.

При помощи цифровых штангенциркуля и микрометра проводилось контрольное измерение наружного и внутреннего диаметра сосудов и их слепков, для измерения углов отхождения и разветвления субэпикардального русла коронарных артерий и их ветвей осуществлялась обработка цифровых фотографий с использованием компьютерной программы *CorelDRAW*.

Морфологическое исследование строения венечных артерий и стенок сердца с учетом их архитектоники

Морфометрические особенности венечных артерий и стенок сердца изучались на нативных и коррозионных препаратах по классификации, представленной на рис. 1.

При измерении правой венечной артерии получены следующие результаты: длина от 89 до 226 мм; наружный диаметр от 2,2 до 4,3 мм; внутренний диаметр от 1,2 до 4,2 мм; толщина стенки варьировалась от 0,4 до 4,3 мм.

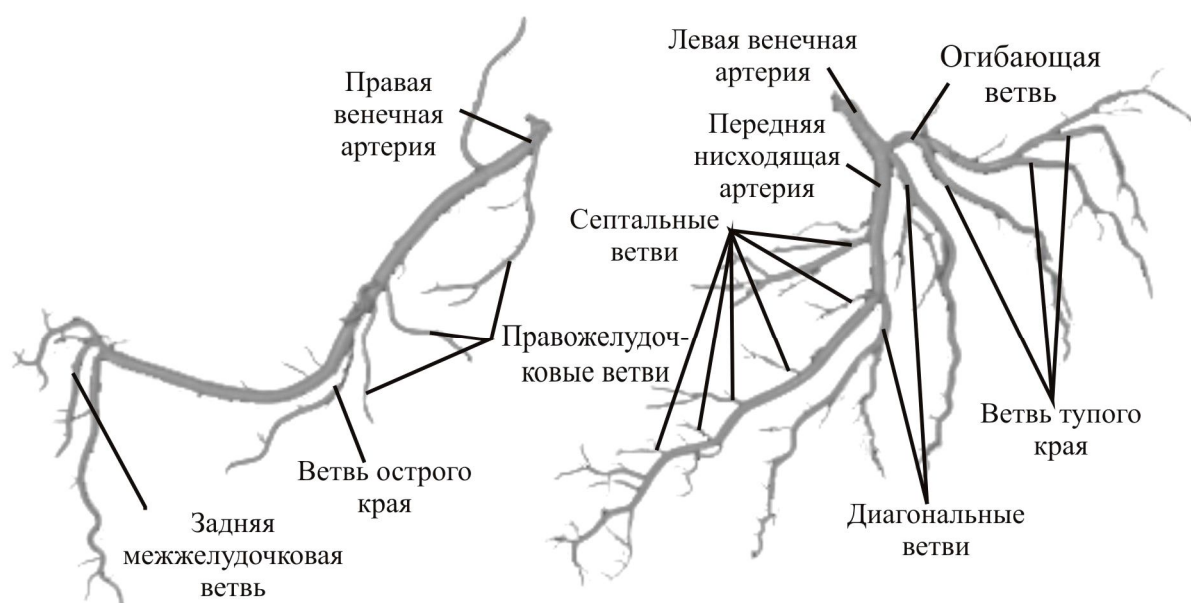


Рис. 1. Правая и левая венечные артерии (коронарные) и их ветви

При изучении левой венечной артерии наблюдалось ее бифуркационное деление в 81% случаев, а трифуркационное – в 19%. В ходе изучения выявлены показатели левой венечной артерии: длина от 1,0 до 14 мм; наружный диаметр от 2,6 до 5,0 мм; внутренний диаметр от 2,0 до 4,7 мм; толщина стенки варьировалась от 0,3 до 3,6 мм.

При бифуркационном делении ствола левой венечной артерии угол между передней межжелудочковой ветвью и огибающей ветвью варьируется от 50 до 150°, в среднем равен 96°. При трифуркационном делении угол между передней межжелудочковой ветвью и диагональной ветвью варьирует от 35 до 120°, в среднем он равен 55°, а угол между огибающей ветвью и диагональной ветвью равен 45–90°, в среднем – 68°. В 50% изученных препаратов передние межжелудочковые ветви и огибающие ветви были равны по диаметру, в 47% преобладала передняя межжелудочковая ветвь и в 3% диаметр огибающей ветви оказался больше, чем передней межжелудочковой ветви.

Передняя межжелудочковая ветвь в 87% случаев является одноствольной, в 12% делится бифуркационно и в 1% трифуркационно. Получены следующие показатели передней межжелудочковой ветви: длина от 93,0 до 192,0 мм; наружный диаметр от 2,1 до 4,8 мм; внутренний диаметр от 1,7 до 4,5 мм, в среднем 3,0 мм; толщина стенки варьировалась от 0,2 до 3,6 мм.

Огибающая ветвь в 53% является одноствольной, в 43% делится бифуркационно и в 4% – трифуркационно. Полученные показатели огибающей ветви: длина от 54,0 до 203,0 мм; наружный диаметр от 1,4 до 4,3 мм; внутренний диаметр от 1,0 до 4,0 мм; толщина стенки варьировалась от 0,2 до 3,2 мм.

Диагональная ветвь (артерия интермедия), отходящая от зоны деления ствола левой венечной артерии на ветви, обнаружена в 19% случаев, следует между передней межжелудочковой ветвью и огибающей ветвью левой венечной артерии влево и вниз. В 70% она одноствольная и в 30% – бифуркационная. Установленные показатели диагональной ветви: длина от 56,0 до 138,0 мм; наружный диаметр от 1,7 до 3,2 мм; внутренний диаметр от 0,8 до 3,0 мм; толщина стенки варьировалась от 0,2 до 2,4 мм.

В результате проведенного анализа полученных данных можно сделать выводы о том, что длина, наружный диаметр и толщина стенок правой венечной артерии, левой венечной артерии, передней межжелудочковой ветви, огибающей ветви имеют тенденцию увеличиваться с возрастом, а внутренний диаметр с возрастом уменьшается. Длина, наружный диаметр и толщина стенки диагональной ветви (артерии интермедия) имеют тенденцию увеличиваться с возрастом, а внутренний диаметр артерии интермедия с возрастом уменьшается незначительно.

Показатели толщины стенки левого желудочка варьируются в пределах от 8 до 24 мм, правого желудочка – от 3 до 6 мм, межжелудочковой перегородки – от 6 до 20 мм на трех уровнях. Наибольшая толщина стенки левого и правого желудочков, а также межжелудочковой перегородки наблюдаются в средней трети. Показатели толщины стенки правого и левого предсердий – от 1 до 3 мм; межпредсердной перегородки – от 1,5 до 2,5 мм. В ходе исследования установлено: толщина стенки левого желудочка, межжелудочковой перегородки с возрастом значительно увеличивается, тогда как другие стенки сердца с возрастом не изменяются.

Результаты измерений наружного и внутреннего диаметров, длины, толщины стенки венечных артерий человека, детализированное изучение их ангиоархитектоники, а также толщины миокарда левого, правого желудочков, левого и правого предсердий позволили авторам создать базу данных, которая легла в основу построения математической модели кровотока в правой и левой венечных артериях.

Гистологическое исследование строения сердца и венечных артерий на различных уровнях

Для приготовления гистологических препаратов изымали участки правой и левой венечных артерий (с пяти уровней) и миокарда межжелудочковой перегородки, верхушки сердца, задней стенки левого желудочка длиной 2,0 см и шириной 1,5 см.

Все исследуемые препараты приготавливали по стандартной методике. Применяли обзорный метод окрашивания гематоксилином и эозином на коллагеновые волокна по Ван-Гизону, для выявления признаков дезорганизации соединительной ткани (плазматического пропитывания, фибриноидного набухания) – метод ОКГ (оранжевый, красный, голубой) в модификации Д.Д. Зербино и Л.Л. Лукасевича (1988).

Проведено гистоморфометрическое исследование 80 венечных артерий 40 сердец мужчин в возрасте от 30 до 70 лет. Изучено 400 срезов на различных уровнях правой и левой венечных артерий.

В ходе исследования устьев венечных артерий установлено: наибольшие значения толщины как сосудистой стенки в целом, так и отдельных ее слоев наблюдаются в местах образования атеросклеротических бляшек, которые встречались на изученном материале в 92,5% случаев во всех возрастных группах. В устье правой венечной артерии они не были изолированными и продолжались на основной ствол правой венечной артерии. Атеросклеротические бляшки устья левой венечной артерии встречались как изолированные (78%), так и распространяющиеся на основной ствол левой венечной артерии (21,6%).

На первых уровнях, соответствующих начальным отделам стволов правой и левой венечных артерий, выявлено, что с возрастом за счет атеросклеротических изменений толщина стенки увеличивается у правой венечной артерии от 837,3 мкм в I возрастной группе до 1157,6 мкм в IV возрастной группе, т.е. на 38,2%. Толщина стенки левой венечной артерии также увеличивается от 940,2 до 1239,3 мкм, т.е. на 31,8%. Наличие атеросклеротических поражений на I уровне наблюдалось в правой венечной артерии в 60%, левой венечной артерии в 70% от всех случаев, чаще в III–IV возрастных группах.

На втором уровне правой венечной артерии, который соответствует участку артерии, располагающемуся на середине расстояния от устья до острого края сердца по венечной борозде, установлено, что с возрастом толщина стенки увеличивается у правой венечной артерии от 724,7 мкм в I возрастной группе до 1304,1 мкм в IV, т.е. возрастает почти на 80% за счет увеличения толщины интимы. Толщина средней оболочки правой венечной артерии имеет тенденцию с возрастом уменьшаться от 278,7 до 206,4 мкм. Следует отметить, что располагались атеросклеротические бляшки на задней стенке правой венечной артерии, причем преобладали бляшки в стадии атероматоза и фиброза с кальцинозом.

На втором уровне левой венечной артерии – начало передней межжелудочковой ветви, выявлено, что в I–III возрастных группах толщина стенки не имеет статистически достоверных различий и колеблется в пределах 726,8–901,2 мкм, а в IV возрастной группе она возрастает почти на 65%. На этом уровне встречалось поражение стенки атеросклерозом в 62% случаев во всех возрастных группах, осложненные бляшки в большинстве случаев наблюдались в IV возрастной группе. Бляшки чаще располагались эксцентрично по правой передненааружной поверхности передней межжелудочковой ветви, в 15% наблюдались циркулярно расположенные бляшки.

На третьем уровне правой венечной артерии, соответствующем участку артерии, расположенному в венечной борозде на уровне острого края сердца, получены следующие результаты: общая толщина стенки с возрастом постепенно увеличивается от 488,7 до 1135,5 мкм за счет утолщения интимы. Частота встречаемости атеросклероза на этом уровне составляла 55%, бляшки в различных стадиях атерогенеза располагались по наружной поверхности стенки правой венечной артерии и у места отхождения от неё ветви острого края.

В ходе исследования срезов третьего уровня левой венечной артерии, который соответствует расположению передней межжелудочковой ветви в средней трети передней межжелудочковой борозды, выявлено, что общая толщина стенки от 398,9 до 830,0 мкм, т.е. возрастает почти в 2 раза. Увеличение толщины стенок венечных артерий происходит за счет увеличения толщины интимы, исключение составляет I возрастная группа, где средние значения толщины внутренней и средней оболочек почти одинаковы. На данном уровне в 42,5% наблюдений обнаружено поражение стенки левой венечной артерии атеросклерозом. Атеросклеротические (атероматозные и фиброзные с кальцинозом) бляшки располагались чаще эксцентрично по боковым и задней поверхностям стенки артерий.

На срезах четвертого уровня правой венечной артерии – середина расстояния от венечной борозды до вершины передней поверхности правого желудочка по острому краю сердца – получены следующие результаты: от I ко II возрастной группе толщина стенки увеличивается незначительно от 201,5 до 277,2 мкм. В III возрастной группе общая толщина стенки увеличивается на 39% в основном за счет утолщения интимы от 81,8 мкм во II группе до 201,5 мкм в III группе. В IV группе толщина стенки увеличивается в 2,2 раза. На этом уровне поражение стенки атеросклерозом выявлено в 17,5% случаев. Поражались субэпикардальные участки артерии, выявлено наличие как эксцентрично, так и циркулярно расположенных бляшек в стадии атероматоза и фиброза с кальцинозом.

Исследуя срезы левой венечной артерии на четвертом уровне – на 3 см выше вершины сердца по передней межжелудочковой борозде, выявили, что общая толщина стенки в I возрастной группе составляет 240,6 мкм, во II группе она увеличивается на 34,3%, в III возрастной группе составляет 522,2 мкм, в IV – 631,7 мкм, различия статистически значимы между II и III возрастными группами. В 25% случаев обнаружено наличие атеросклеротических бляшек, расположенных чаще на задней поверхности стенки передней межжелудочковой ветви, в стадии атероматоза с включением солей кальция.

На срезах правой венечной артерии на пятом уровне, который соответствует середине задней межжелудочковой борозды, установлено равномерное увеличение общей толщины стенки артерии от 218,3 до 389,3 мкм, в первых двух группах за счет равномерного утолщения интимы и меди, в III группе значения толщины данных слоев становятся практически одинаковыми, в IV группе происходит значительное увеличение толщины интимы почти в 2 раза и уменьшение толщины меди на 24,1% по сравнению с III группой. На данном уровне в 15% от всех случаев было выявлено наличие атеросклеротических бляшек в стадии атероматоза в субэпикардиально расположенных участках задней межжелудочковой ветви.

Измерения толщины стенки левой венечной артерии на пятом уровне, соответствующем положению огибающей ветви в венечной борозде под левым ушком сердца, показали, что общая толщина стенки артерии увеличивается от 454,4 мкм в I возрастной группе до 680,5 мкм в IV группе за счет утолщения интимы, тогда как толщина меди увеличивается незначительно. На пятом уровне левой венечной артерии обнаружено наличие атеросклеротических поражений стенки огибающей ветви в 37,5% случаев на всех стадиях атерогенеза, бляшки располагались на передне-боковой и задней поверхностях артерий.

При исследовании миокарда желудочков и межжелудочковой перегородки были отмечены следующие изменения: островки жировой ткани среди групп мышечных волокон и вокруг сосудов, очаговый периваскулярный и сетчатый стромальный склероз, сетчато-очаговый склероз, диффузно-мелкоочаговый, крупноочаговый постинфарктный кардиосклероз. Описанные изменения, характерные для возрастных групп 51–60 и 61–70 лет, значительно выражены в стенках левого желудочка и межжелудочковой перегородке.

Механические испытания

В данной работе представлены результаты изучения механических свойств венечных артерий и тканей сердца в зависимости от возраста человека.

Испытание на растяжение проводится в пределах максимального усилия нагрузочной рамы. В нашем исследовании используется динамометрический датчик с допустимой нагрузкой 500 Н. Определение механических свойств материала проходит следующим образом:

- противоположные концы образца помещаются между зажимами испытательной машины;
- определяется геометрия образца и снимаются размеры (длина; ширина, толщина или радиус);
- задается скорость перемещения траверсы.

После запуска испытания траверса с верхним зажимом перемещается с заданной скоростью, растягивая образец. При деформации в нем возникает сопротивление (усилие). Испытание заканчивается при разрушении материала. Во время растяжения информация об удлинении образца, скорости перемещения траверсы и испытанного образцом сопротивления контролируется и записывается.

Изучение образцов венечных артерий по возрастам позволило выявить зависимость между принадлежностью к возрастной группе и эластичностью артерии (рис. 2). На рис. 3 представлены данные механических свойств тканей сердца человека при испытаниях на сжатие.

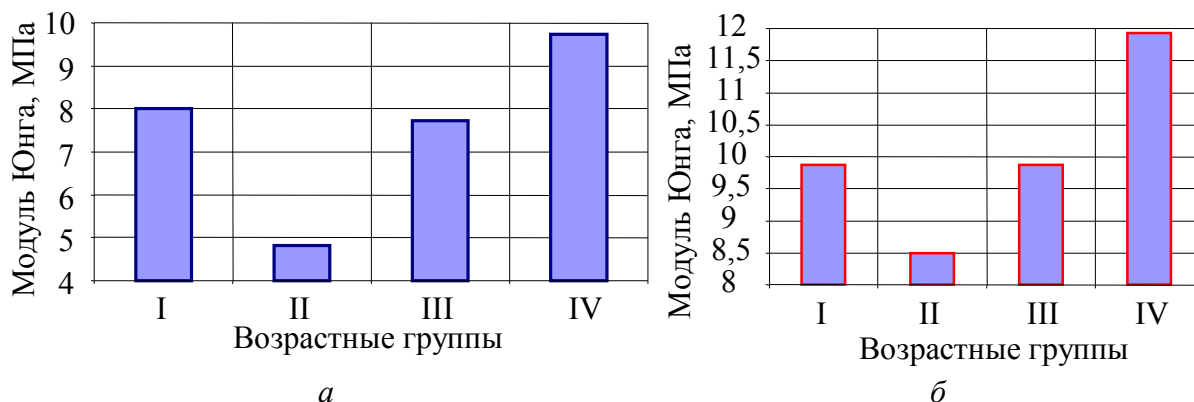


Рис. 2. Средние значения модуля Юнга (МПа) в зависимости от возрастной группы: а – левая венечная артерия; б – правая венечная артерия

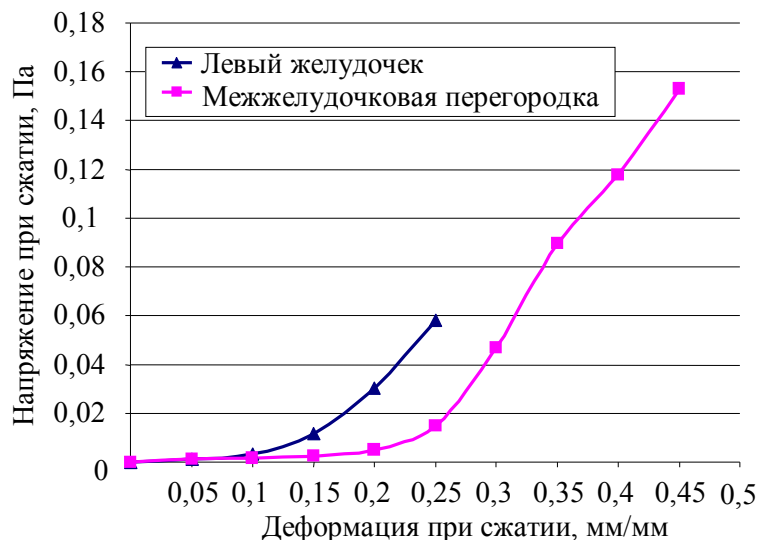


Рис. 3. Результаты испытаний образцов тканей сердца на сжатие

Построение 3D-моделей сердца человека

Для реконструкции сердца человека применялся метод заливки желатином *in vitro*, в результате которого были получены срезы, позволяющие изучить внутренний рельеф органа (рис. 4).

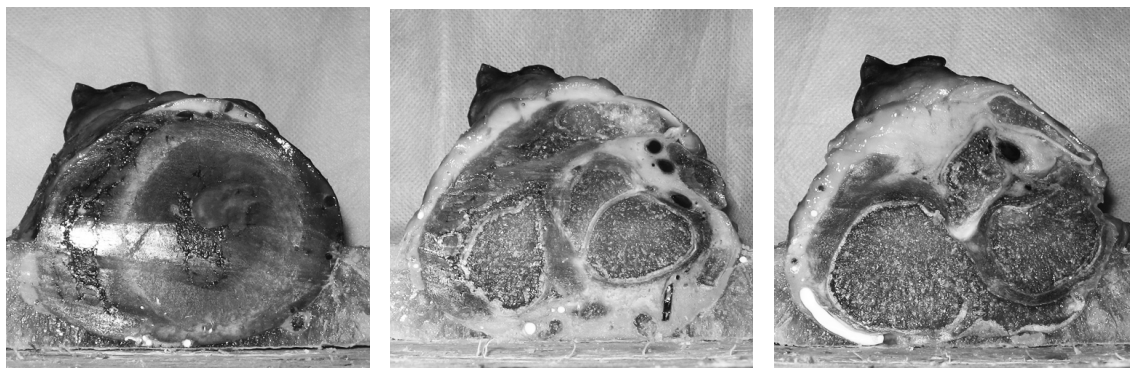


Рис. 4. Подготовка срезов для создания 3D-геометрической модели сердца человека



Рис. 5. Построение 3D-модели сердца

Полученные срезы были оцифрованы и обработаны посредством графических редакторов для дальнейшего моделирования с использованием специализированного программного пакета *SolidWorks 2008 (SolidWorks Corporation)* (рис. 5).

Построение 3D-моделей венечных артерий

Для реконструкции реальной геометрии венечных артерий, учитывающей внутренний рельеф сосуда, на поверхности модели сердца сплайном была воссоздана вспомогательная геометрия (рис. 6).

Опираясь на данные морфометрии венечных артерий по точкам вспомогательного сплайна в плоскостях, перпендикулярных срединной линии артерий (сплайн), окружностями различного диаметра, измеренного при изучении силиконовых слепков венечных артерий, которые были получены оригинальным методом заливки сосудистого русла *in vitro* (рис. 7, 8), были построены элементы по сечениям, соответствующие внутреннему рельефу сосудов.

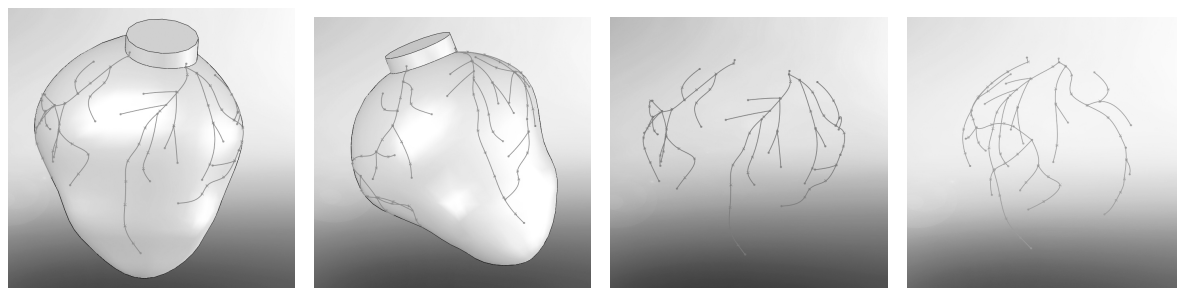


Рис. 6. Вспомогательная геометрия для реконструкции венечных артерий

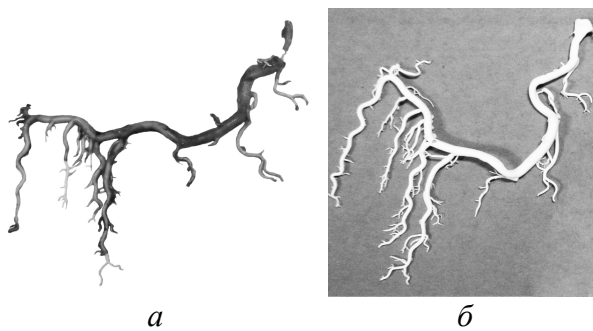


Рис. 7. Правая венечная артерия (а) и силиконовый слепок (б)

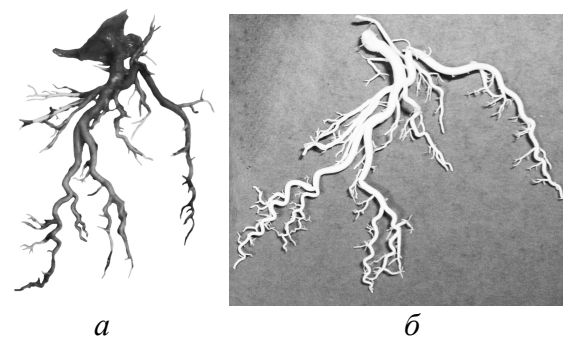


Рис. 8. Левая венечная артерия (а) и силиконовый слепок (б)

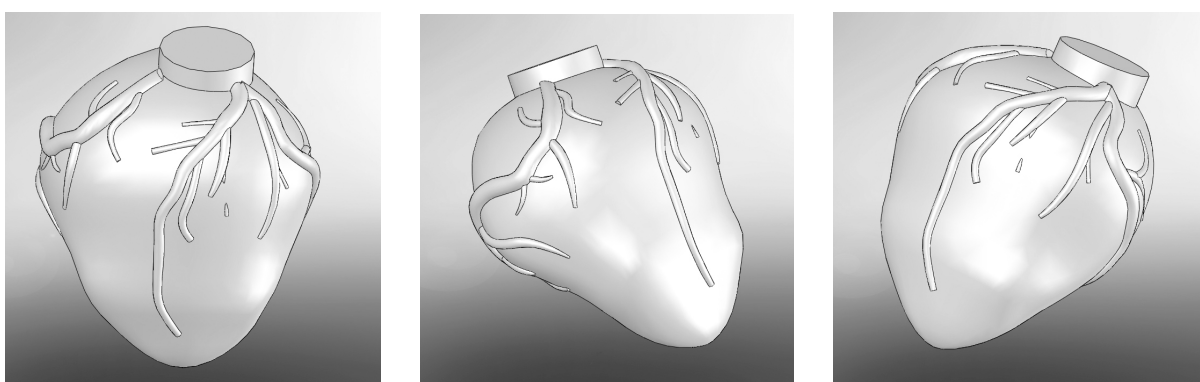


Рис. 9. Реконструкция венечных артерий сердца человека

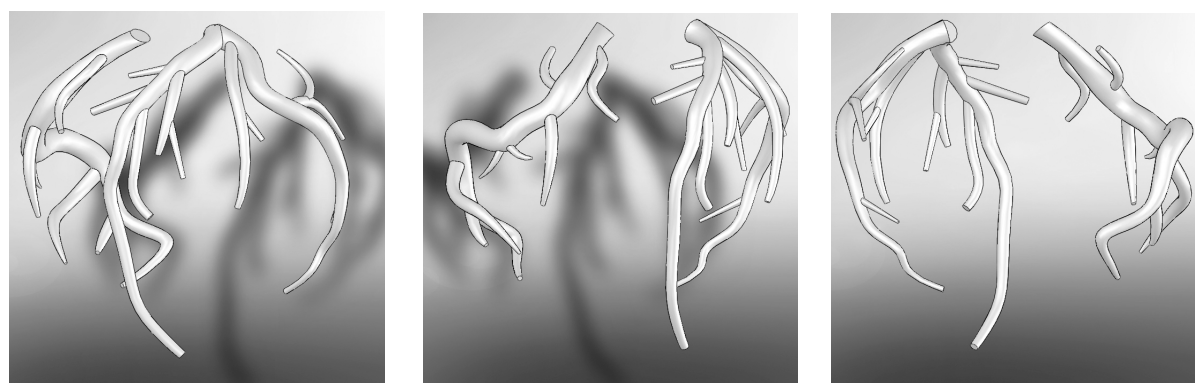


Рис. 10. Правая и левая венечные артерии без вспомогательной геометрии

В соответствии с данными, полученными при гистологическом исследовании средней толщины стенки венечных артерий, была построена стенка венечных артерий. В результате были созданы два тела, соответствующие жидкости и стенке (рис. 9, 10).

Импорттирование данных в конечно-элементный пакет

Изучение напряженно-деформированного состояния и гемодинамики венечных артерий и сердца человека проводилось с помощью конечно-элементного пакета *ANSYS Multiphysics*. Для расчетов на данные объемы была наложена нерегулярная тетраэдрическая сетка с размером элементов 0,005 для стенки венечных артерий и желудочков сердца и 0,002 для жидкости, в результате чего модель правой венечной артерии была разбита на 897 641 элемент (рис. 11).

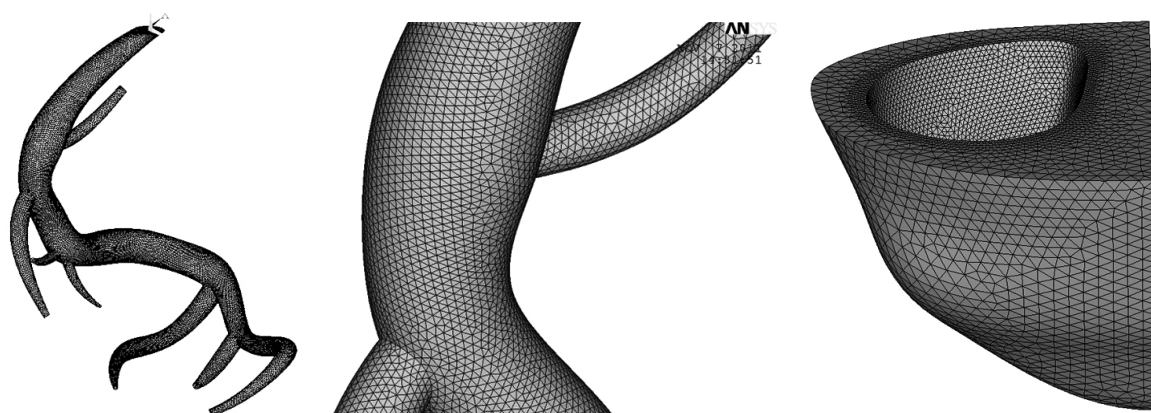


Рис. 11. Наложение расчетной сетки на модель венечной артерии и сердца человека

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При моделировании динамики кровотока и напряженно-деформированного состояния стенок венечных артерий кровь предполагалась однородной, несжимаемой и ньютоновской жидкостью. Материал стенок предполагался однородным, изотропным, идеально-упругим. Движение стенки в нестационарном случае описывалось вторым законом Ньютона. Торцы сосуда жестко закреплены.

На стенке артерии ставилось условие равенства скоростей частиц жидкости, прилегающих к стенке, и соответствующих частиц стенки. На узлах элементов, принадлежащих внешней стенке артерии, соприкасающейся с миокардом, задавалось давление, соответствующее внешнему давлению сердечной мышцы на венечные артерии.

На входе в артерию задавалась скорость течения крови, изменяющаяся по физиологическому закону. На выходе задавалось давление, соответствующее внесосудистому сжатию сегментов, погруженных в миокард.

Механические характеристики крови, стенки артерии, тканей сердца: $\rho_1 = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0,0037 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\rho_2 = 1378 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,4$, $E_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (модуль Юнга для венечных артерий), $E_2 = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ (модуль Юнга миокарда).

В ходе эксперимента были получены следующие результаты в заданном сечении:

- в районе изгиба артерии локальное давление крови минимально на внутренней стенке изгиба, а по мере приближения к наружной стенке увеличивается и достигает максимума на самой стенке (рис. 12);
- максимальные значения скорости потока крови достигаются у внутреннего радиуса в районе изгиба артерии (рис. 13). В первом сегменте артерии наблюдаются сравнительно низкие значения скоростей с образованием вихря (рис. 14);
- как в зоне бифуркации, так и в зонах перегиба, за счет разницы давления (у наружного и внутреннего радиуса) возникают потоки поперечной циркуляции, имеющие характер завихрения; в районе перегибов наблюдаются низкие касательные напряжения (рис. 15);
- максимальные значения вектора перемещений узлов элементов достигаются на внешнем радиусе в районе перегиба артерии (рис. 16).

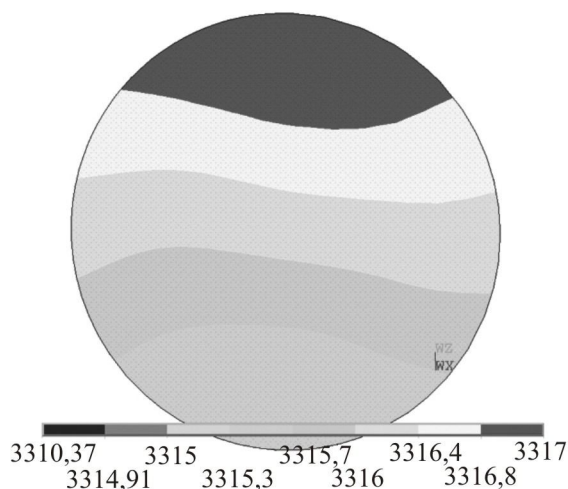


Рис. 12. Распределение давления в заданном сечении правой венечной артерии

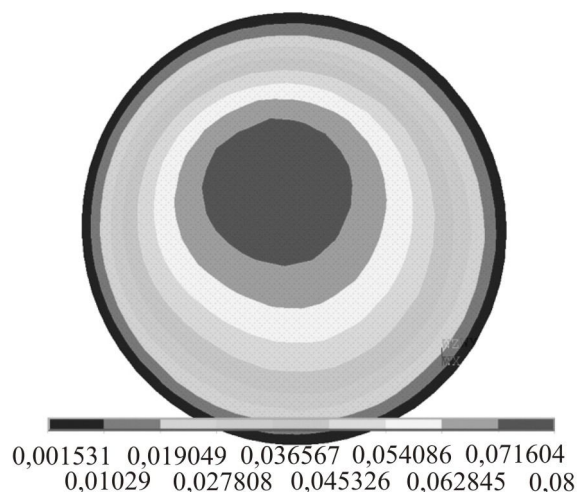


Рис. 13. Распределение значений скоростей в районе изгиба правой венечной артерии

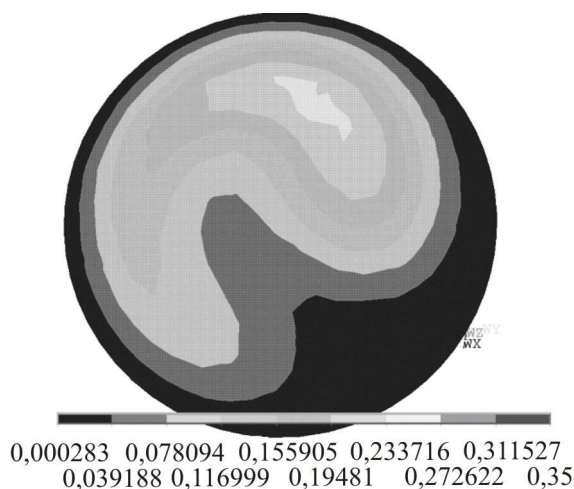


Рис. 14. Распределение значений скоростей в первом сегменте правой венечной артерии

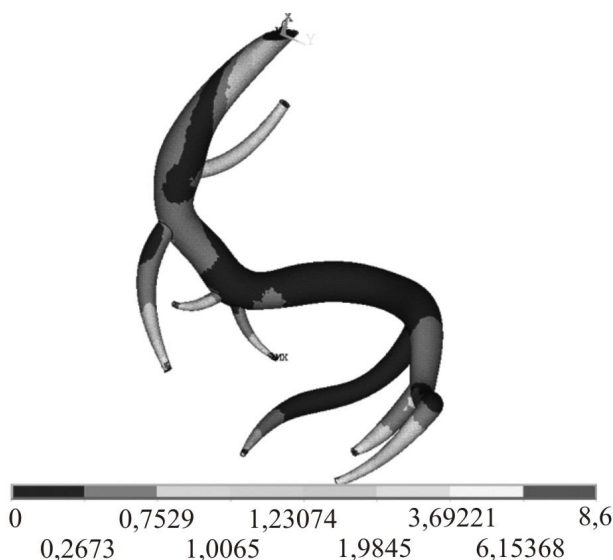


Рис. 15. Распределение значений касательных напряжений на стенках правой венечной артерии

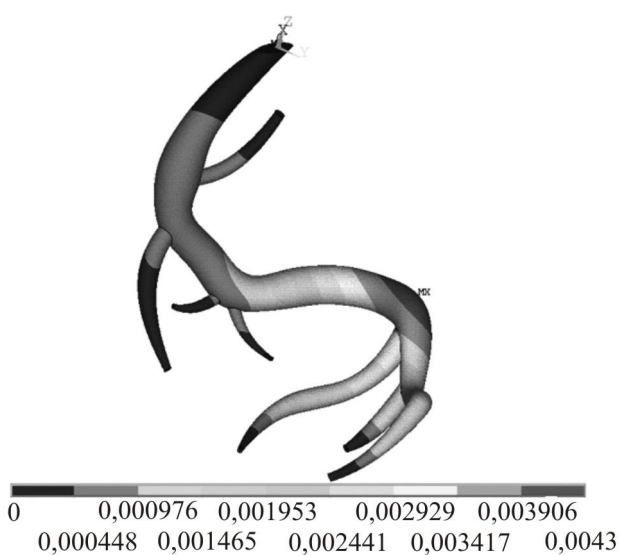


Рис. 16. Распределение перемещений узлов элементов правой венечной артерии

Исследование ангиоархитектоники, морфологических и гистологических параметров, геометрии и механических свойств тканей венечных артерий и сердца человека, моделирование поведения индивидуальных анатомически реальных венечных артерий с учетом сокращения миокарда позволило получить необходимые параметры для моделирования нативных венечных артерий, пораженных атеросклерозом, а также артерий после проведения оперативных вмешательств по восстановлению кровотока и хирургической реваскуляризации миокарда при лечении ишемической болезни сердца.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №09-01-00804-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурин Р.С., Бранд Я.Б., Ширяев А.А., Долгов И.М., Васильев А.В., Чумаков М.В., Гончаров П.Н., Мазанов М.Х., Дудина И.В., Исаков Д.В., Чернышев Д.В. Актуальные вопросы хирургического лечения пациентов с острыми расстройствами коронарного кровообращения // Кардиология. – 2005. – № 3. – С. 46–52.
2. Акчурин Р.С., Ширяев А.А. Актуальные проблемы коронарной хирургии. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2004.
3. Бабунашвили А.М., Рабкин И.Х., Иванов В.А. Коронарная ангиопластика. – М., 1996.
4. Бокерия Л.А., Алесян Б.Г. Руководство по рентгеноэндоваскулярной хирургии сердца и сосудов. Т. 3: Рентгеноваскулярная хирургия сердца и сосудов. – М: НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2008. – 404 с.
5. Воробьев А.А., Поройский С.В., Баринов А.С., Егин М.Е. Возможности индивидуального трехмерного компьютерного моделирования в хирургии // Новые технологии в медицине (морфологические, экспериментальные, клинические и социальные аспекты): сб. тр., посвященных 70-летию Сталинградского – Волгоградского института – академии-университета. – Волгоград: Принт, 2005. – С. 50–51.
6. Кулагин А.Л., Юдин А.Л. Трехмерное моделирование заболеваний по результатам компьютерной томографии // Бюллетень ВНИЦ РАМН. – 2007. – № 3. – С. 12–13.
7. Наумов В.Г., Лупанов В.П. Профилактика рестенозов после ангиопластики, стентирования и коронарного шунтирования // Сердце. – 2002. – № 1(5). – С. 138–143.
8. Островский Ю.П. Хирургия сердца. – М.: Мед. лит., 2007. – С. 576.
9. Gotlieb A.I. Atherosclerosis // Cardiovascular pathology. – 3rd ed. / eds. M.D. Silver, A.I. Gotlieb, F.J. Schoen. – N. Y.: Churchill Livingstone, 2001. – P. 68–106.
10. Hanke H., Strohschneider T., Oberhoff M., Betz E., Karsch K.R. Time course of smooth muscle cell proliferation in the intima and media of arteries following experimental angioplasty // Circulation Research. – 1990. – Vol. 67, No. 3. – P. 651–659.
11. Huang J., Lyczkowski R.W., Gidaspow D. Pulsatile flow in a coronary artery using multiphase kinetic theory // J. Biomech. – 2009. – Vol. 42, Is. 6. – P. 743–754.
12. Hueb W.A., Bellotti G., de Oliveira S.A., Arie S., de Albuquerque C.P., Jatene A.D., Pileggi F. The Medicine, angioplasty, or surgery study (MASS): A prospective, randomized trial of medical therapy, balloon angioplasty, or bypass surgery for single proximal left anterior descending artery stenosis // J. Am. Coll. Cardiol. – 1995. – Vol. 26. – P. 1600.
13. Johnston B.M., Johnston P.R., Corney S., Kilpatrick D. Non-Newtonian blood flow in human right coronary arteries: transient simulations // J. Biomech. – 2006. – Vol. 39, Is. 6. – P. 1116–1128.
14. Jung J., Lyczkowski Robert W., Panchal Chandrakant B., Hassanein A. Multiphase hemodynamic simulation of pulsatile flow in a coronary artery // J. Biomech. – 2006. – Vol. 39, Is. 11. – P. 2064–2073.
15. Kumar A. Computational model of blood flow in the presence of atherosclerosis // 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010). Singapore IFMBE Proceedings. – 2010. – Vol. 31, Part 6. – P. 1591–1594.
16. Mark D.B., Nelson C.L., Califf R.M., Harrell F.E., Jr, Lee K.L., Jones R.H., Fortin D.F., Stack R.S., Glower D.D., Smith L.R. Continuing evolution of therapy for coronary artery disease; initial results from the era of coronary angioplasty // Circulation. – 1994. – Vol. 89. – P. 2015.
17. Opie L.H. Heart physiology: from cell to circulation. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2003.
18. Schwartz R., Holmes D., Topol E. The restenosis paradigm revisited: an alternative proposal for cellular mechanisms // JACC. – 1992. – Vol. 20 (5). – P. 1284–1293.
19. Soulis J.V., Farmakis Th.M., Giannoglou G.D., Louridas G.E. Wall shear stress in normal left coronary artery tree // J. Biomech. – 2006. – Vol. 39, Is. 4. – P. 742–749.

THE FINITE ELEMENT MODELLING OF ISCHEMIC HEART DISEASE BASED ON THE MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL CHANGES OF HUMAN CORONARY ARTERIES AND MYOCARDIUM

**A.A. Golyadkina, I.V. Kirillova, O.A. Shchuchkina, G.N. Maslyakova, N.V. Ostrovskiy,
N.O. Chelnokova (Saratov, Russia)**

Current health status of people in the Russian Federation raises new important healthcare problems for the scientists. One of the most challenging issues is the development of new methods for treatment and prevention of cardiovascular diseases, because blood circulation failure is a leading cause of mortality and disability. Complex solution of this problem includes development of novel computer methods for diagnosis and treatment that would provide quantitative evaluation of patient pre-treatment condition, optimal variant of individual surgical myocardium revascularisation, reconstruction of left ventricle geometry and heart as a whole, optimization of blood flow in coronary artery system. This study is focused on modelling of individual anatomically real coronary arteries with myocardium contraction taken into account. Prior to the simulation, the angioarchitectures, morphological parameters, geometry, and mechanical properties of heart tissues were evaluated and measured.

Key words: mechanical characteristics, finite element modelling, prognostication, coronary arteries, heart, morphological study, histological study.

Получено 08 октября 2011