

Н.О. Челнокова¹, Н.В. Островский¹, А.А. Голядкина²

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ ВЕНЕЧНЫХ АРТЕРИЙ

N.O. Chelnokova, N.V. Ostrovsky, A.A. Golyadkina

MORPHOLOGICAL BASIS OF FINITE-ELEMENT MODELING OF CORONARY ARTERIES HEMODYNAMICS

¹ ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского
Минздрава РФ», г. Саратов² ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов

В работе отражены результаты конечно-элементного моделирования гемодинамики в левой венечной артерии с учетом напряженно-деформированного состояния ее стенки.

Цель исследования – экспериментально на основе компьютерных 3D пространственно-ориентированных моделей бассейна левой венечной артерии определить параметры гемодинамики в ней.

Материал и методы. Объектом исследования послужили 228 нефиксированных сердец, изъятых при аутопсии 228 трупов мужчин в возрасте от 31 до 70 лет. Использовали следующие методы исследования: органо- и ангиометрию, оригинальный метод полихромной заливки артерий холодными массами и метод заливки желатином сердца человека *in vitro*. Разработаны методы построения компьютерных 3D моделей сердца и левой венечной артерии с применением метода поперечных распилов, компьютерного анализа цифровых изображений в прикладных программах Adobe Photoshop и CorelDRAW. Численное моделирование проведено с использованием программного обеспечения SolidWorks (SP2.1.) и ANSYS Multiphysics.

Результаты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что конечно-элементное моделирование позволяет изучать гемодинамические показатели (давление, векторы скоростей кровотока, объемный суммарный кровоток) с учетом напряженно-деформированного состояния стенки (низкие касательные напряжения на стенке, эквивалентные напряжения и модуль вектора перемещения) левой венечной артерии в норме, при наличии атеросклеротического поражения.

Вывод. Математическое моделирование гемодинамики может проводиться с учетом индивидуальных особенностей морфологического строения левовенечного бассейна конкретного пациента.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, атеросклероз, левая венечная артерия, гемодинамика, конечно-элементное моделирование, эксперимент.

The results of finite-element modeling of hemodynamics in the left coronary artery with the stress-strain state of its walls in this article are reflected.

Material and methods. We chose 228 non-fixed hearts extracted in the course of autopsy on 228 men's corpses age 31–40 as objects. We used the following methods of research: organometry and angiometry, original method of polychrome filling of arteries with cold masses and the method of filling human heart *in vitro* with gelatin, methods of constructing 3D computer models of heart and the left coronary artery using the method of cross-cuts, the computer analysis of digital images in Adobe Photoshop and CorelDRAW application programs. Numerical modeling has been conducted with the use of SolidWorks (SP2.1.) and ANSYS Multiphysics software.

Results. The results obtained prove that the finite-element modeling allows studying circulatory dynamics rates (pressure, blood flow velocity vectors, the total volumetric blood flow) taking into account stress-strain state of the left coronary artery wall (low shear stress at the wall, equivalent stress, and displacement vector modulus) in normal, atherosclerotic condition.

Conclusions. Mathematical modeling of hemodynamics may take into account the individual characteristics of the morphological structure of the left coronary artery circulation of the patient.

Key words: coronary heart disease, atherosclerosis, left coronary artery, hemodynamics, finite-element modeling, experiment.

УДК 612.13
doi 10.17223/1814147/56/8

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации, по данным Росстата (2013), в структуре смертности населения 58,1% составляют заболевания сердечно-сосудистой системы, из них первое место (49,1%) принадлежит ишемической болезни сердца (ИБС). А если учесть, что чаще всего страдают люди трудоспособного возраста (35–60 лет), то социально-экономические последствия от сердечно-сосудистых заболеваний являются катастрофическими [1].

Атеросклероз венечных артерий в настоящее время признан одной из самых частых причин развития ишемии миокарда. Лидирующую позицию по частоте и тяжести поражения атеросклерозом венечного бассейна занимает левая венечная артерия (ЛВА): ствол, проксимальные сегменты передней межжелудочковой и огибающей ветвей [3].

Очевидный прогресс хирургического реконструктивного метода лечения вышеуказанной патологии, который в настоящее время не имеет альтернативы, за последние годы позволил значительно увеличить и усовершенствовать объем помощи данной категории пациентов. При этом остаются проблемы, связанные с восстановлением адекватной реваскуляризации миокарда, от решения которых зависит качество хирургического лечения. Многочисленные исследования подтверждают, что при развитии патологии и после проведения реконструктивно-восстановительных операций на артериях изменяются не только их ангиоархитектоника, биомеханические свойства тканей стенок, но и гемодинамика [1, 2, 4, 5].

Развитие современной кардиохирургии сопряжено со знаниями структурно-функционального строения элементов сердечно-сосудистой системы, внедрением новых высокотехнологичных методов их исследования, которое невозможно представить себе в век компьютерных технологий без методов математического моделирования. Сегодня значительная доля научных проблем решается путем предварительного математического моделирования с построением 3D моделей и последующей интерпретацией полученных результатов [5–7].

Исходя из этого, актуальность проблемы эффективного хирургического лечения ИБС, направленного на восстановление адекватной гемодинамики и реваскуляризации, по мнению большинства исследователей, достаточно высока, что является предметом изучения как хирургов, так и морфологов.

Цель исследования: создание возможности прогнозирования изменений гемодинамики в бассейне ЛВА (в норме, при наличии стенози-

рующего коронароатеросклероза) на основе компьютерных 3D пространственно-ориентированных моделей кровотока с учетом морфологических параметров и биомеханических свойств.

Задачи исследования:

1. Разработать трехмерную модель ЛВА (в норме и при наличии атеросклеротического поражения).

2. Провести численный анализ изменения гемодинамики в ЛВА с учетом напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки в норме.

3. Провести численный анализ изменения гемодинамики в ЛВА с учетом НДС стенки при наличии стенозирующего атеросклероза проксимальных сегментов передней межжелудочковой и огибающей ветвей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили 228 нефиксированных сердец, изъятых при аутопсии 228 трупов мужчин в возрасте 31–70 лет в ГУЗ «БСМЭ Саратовской области» с разрешения Комитета по этике.

Для создания трехмерных моделей сердца человека и ЛВА авторы применили оригинальный метод полихромной заливки артерий холодными массами. Морфометрические параметры изучали методами органо-, ангио-, гистоморфометрии. В эксперименте *in vitro* разработали методики исследования биомеханических свойств на разрывных машинах. Создали алгоритм построения компьютерных 3D моделей сердца и венечных артерий с применением метода поперечных распилов и дальнейшего компьютерного анализа полученных цифровых изображений в прикладных программах Adobe Photoshop и CorelDRAW. Численное моделирование проводили с использованием программного обеспечения SolidWorks (SP2.1.) и ANSYS Multiphysics, позволяющего решать связанные задачи теории упругости и гидродинамики. В результате на основе полученных макро- и микроморфологических параметров и данных о биомеханических свойствах ЛВА были построены трехмерные динамические модели кровотока в ЛВА человека.

Для анализа гемодинамики при атеросклеротическом поражении построены модели ЛВА с симметричными стенозами различной степени: 75%-й стеноз начального отдела передней межжелудочковой ветви (ПМЖВ), 60%-й стеноз начального отдела огибающей ветви (ОВ). Моделирование проведено путем добавления дополнительных сечений в ранее построенную модель жидкости для венечных артерий с использованием кривых Безье.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью детализированного изучения ангиоархитектоники и гемодинамики в зонах ЛВА, наиболее часто поражаемых атеросклерозом, левая венечная артерия условно разделена на сегменты:

I – отрезок артерии от устья до места ее деления (ствол ЛВА);

II – проксимальный сегмент ПМЖВ (первые 2 см);

III – средний сегмент ПМЖВ (последующие 2 см);

IV – дистальный сегмент ПМЖВ;

V – проксимальный сегмент ОВ (первые 2 см);

VI – средний сегмент ОВ (последующие 2 см);

VII – дистальный сегмент ОВ.

В программном комплексе ANSYS Multiphysics нами проведен анализ гемодинамики с учетом напряженно-деформированного состояния стенки ЛВА в диастолической фазе сердечного цикла при условии прикрытия устья ЛВА клапанным аппаратом аорты во время систолы.

Результаты конечно-элементного моделирования левой венечной артерии без патологии

Выявлено, что для ЛВА максимальное давление (10162 Па) достигается в зоне бифуркации ее ствола (I сегмент), с большим распространением на проксимальный сегмент ОВ (рис. 1).



Рис. 1. Распределение давления в модели ЛВА, Па

Максимальные значения скорости потока крови (1,7 м/с) в ЛВА достигаются в дистальных сегментах ПМЖВ и ОВ. Наблюдается образование вихря в зоне бифуркации. Максимальные значения модуля вектора перемещения на стенках достигаются в зоне изгиба среднего сегмента ПМЖВ ЛВА. Максимальные значения эквивалентных напряжений (ЭН) (не более 1,0 МПа для ЛВА) отмечаются на стенках ветвей артерий, погруженных в миокард, в зонах изгибов, пере-

гибов русла и местах ответвлений ветвей и начала сегментов ЛВА (0,65 МПа) (рис. 2).

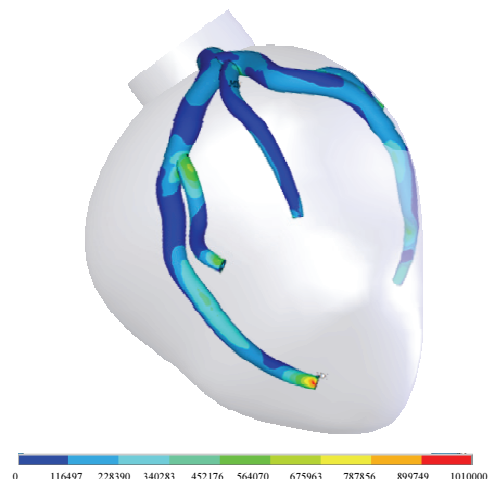


Рис. 2. Распределение значений ЭН на стенках ЛВА в модели ЛВА, Па

Полученные данные позволяют в дальнейшем проводить сравнительную оценку гемодинамики с учетом НДС сосудистой стенки в норме с моделями ЛВА при атеросклеротическом поражении, с учетом зоны локализации и степени стеноза.

Результаты конечно-элементного моделирования левой венечной артерии при атеросклеротическом поражении

При 75%-м стенозе проксимального отдела (II сегмента) ПМЖВ ЛВА поток крови в стволе ЛВА ламинарный и колеблется от 0 до 0,5 м/с, в ОВ – от 0 до 0,4 м/с. Поток крови в пре- и постстенотических зонах ПМЖВ колеблется от 0 до 4,4 м/с, максимальная скорость достигается в зоне стеноза и составляет 5,7 м/с. Наблюдается рециркуляция потока в постстенотической зоне ПМЖВ, что приводит к формированию зоны постстенотического расширения. Максимальное давление, равное 10080 Па, достигается в стволе ЛВА, ОВ и в престенотическом сегменте ПМЖВ. В постстенотическом сегменте ПМЖВ давление падает на 70,5% (рис. 3, 4).

В ПМЖВ наблюдается уменьшение объемного кровотока на 49,9%, в ОВ – его увеличение на 2,6%. Общее уменьшение объемного кровотока в русле ЛВА составило 39,5%. При анализе НДС стенки было обнаружено, что максимальные значения (0,00064 м) модуля вектора перемещения достигаются в среднем сегменте ПМЖВ. Наибольшие значения эквивалентных напряжений (200 000 Па) наблюдаются в апексе бифуркации ствола ЛВА с распространением на ОВ, а касательных напряжений (КН) на стенке – в зоне стеноза (94 Па) и постстенотическом отделе ПМЖВ (31 Па) (рис. 5).

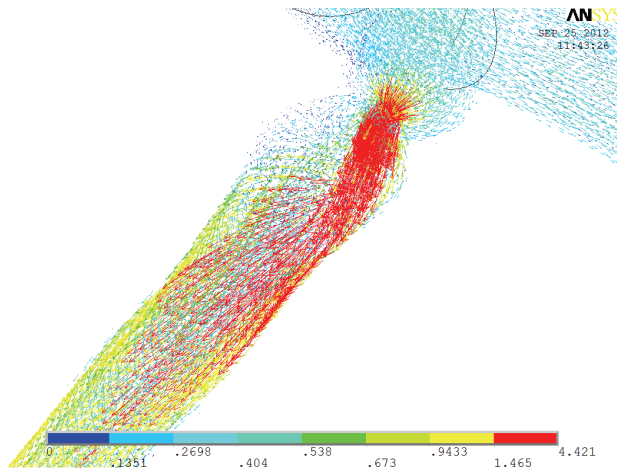


Рис. 3. Векторы скорости в модели ЛВА при 75%-м стенозе проксимального сегмента ПМЖВ, м/с

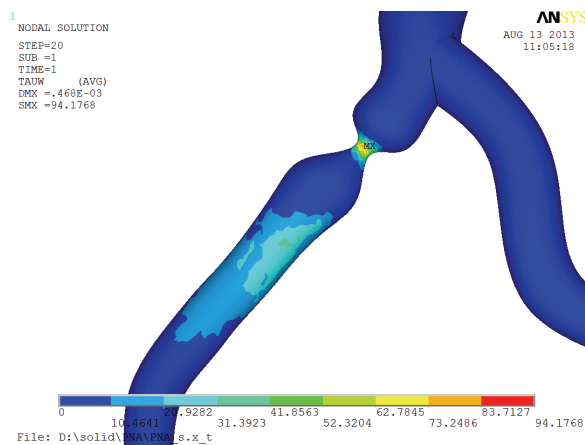


Рис. 4. Распределение давления в модели ЛВА при 75%-м стенозе проксимального сегмента ПМЖВ, Па

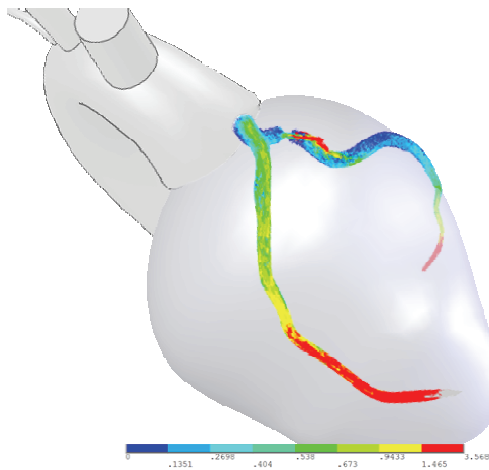


Рис. 5. Распределение значений КНС в модели ЛВА при 75%-м стенозе проксимального сегмента ПМЖВ, Па

При 60%-м стенозе проксимального отдела (V сегмента) ОВ ЛВА поток крови в стволе ЛВА ламинарный и колеблется от 0 до 0,9 м/с, в ПМЖВ – от 0,5 до 1,5 м/с с увеличением скоро-

сти в изгибах сосуда. Поток крови в пре- и постстенотических зонах ОВ колеблется от 0 до 0,4 м/с, увеличение скорости потока от 0,5 до 4,7 м/с наблюдается в зоне стеноза. Отмечена рециркуляция потока в постстенотической зоне ОВ. Максимальное давление, равное 10092 Па, достигается в стволе ЛВА, в зоне, свободной от давления миокарда, проксимального сегмента ПМЖВ и в престенотическом сегменте ОВ (рис. 6).

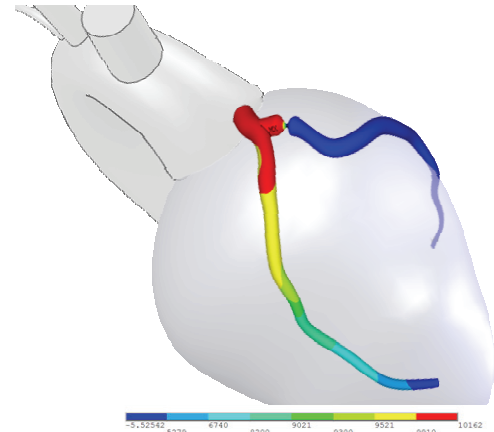


Рис. 6. Распределение давления в ЛВА при 60%-м стенозе проксимального сегмента ОВ, Па

В постстенотическом сегменте ОВ давление падает на 66,7%. Объемный кровоток при данном виде стеноза в ПМЖВ увеличивается на 6,0%, а в ОВ уменьшается на 42,4%. Общее уменьшение объемного кровотока в русле ЛВА составило 3,5%. При анализе НДС стенки было выявлено, что максимальные значения модуля вектора перемещения (0,00072 м) достигаются в среднем сегменте ПМЖВ. Наибольшие значения ЭН (187 700 Па) наблюдаются в апексе бифуркации с распространением на проксимальный сегмент ПМЖВ, а КН на артериальной стенке в зоне стеноза (3,5 Па) (рис. 7).

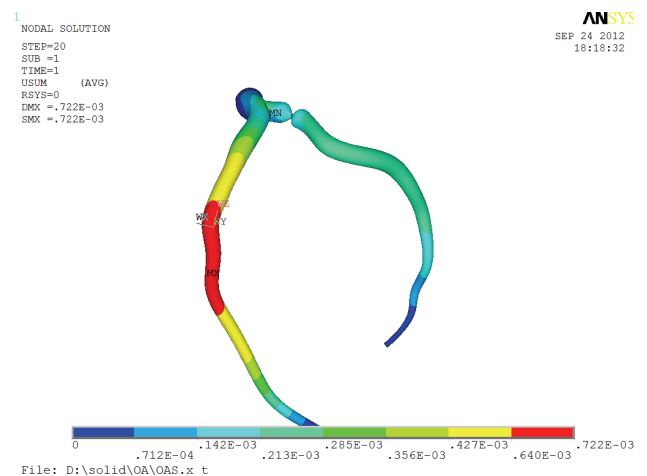


Рис. 7. Распределение значений модуля вектора перемещения в модели ЛВА при 60%-м стенозе проксимального сегмента ОВ, м

ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении конечно-элементного моделирования левой венечной артерии в норме были определены зоны образования закрученного потока жидкости, низких значений КН на внутренних поверхностях стенок и перепадов значений ЭН в самой стенке ЛВА. С точки зрения гемодинамической теории морфогенеза атеросклероза данные факторы инициируют повреждение эндотелия интимы и развитие его дисфункции, что впоследствии приводит к образованию атеросклеротических поражений. При исследовании ангиоархитектоники ЛВА именно в начальных отделах сегментов, местах бифуркаций, ответвлений ветвей и на участках изгибов, перегибов левовенечного сосудистого русла отмечались атеросклеротические поражения стенки ЛВА.

При исследовании конечно-элементного моделирования ЛВА при атеросклеротическом поражении установлены области, характеризующиеся ростом показателей давления кровотока, рециркуляцией потоков и низкими значениями касательных напряжений стенок при различных комбинациях атеросклеротического поражения левой венечной артерии. С позиции гемодинамической теории атерогенеза это служит дополнительным фактором для формирования новых зон атеросклеротического поражения артериальной стенки в сосудистом русле.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика проведения конечно-элементного моделирования позволяет исследовать сосудистое русло ЛВА при различной локализации и степени выраженности коронароатеросклероза с произвольными биомеханическими свойствами артериальной стенки. Математическое моделирование гемодинамики носит не абстрактный характер и может проводиться с учетом индивидуальных особенностей топографического строения и биомеханических свойств венечного русла конкретного пациента, т.е. быть персонифицированным. Таким образом, проводимые исследования создают предпосылки для оптимизации «конструктивно-восстановительных» вмешательств в зонах реконструкции ЛВА. В дальнейшем предполагается включить в исследование моделирование аортокоронарного шунтирования левой венечной артерии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокерия Л.А., Алшибая М.М., Вищипанов С.А. и др. Результаты хирургического лечения ишемической болезни сердца у больных молодого (до 45 лет) возраста // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2014. – № 1. С. 27–32.
2. Голядкина А.А., Кириллова И.В., Щучкина О.А. и др. Конечно-элементное моделирование ишемической болезни сердца исходя из картины морфофункциональных изменений венечных артерий и сердечной мышцы человека // Рос. журн. биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 4 (54). – С. 33–46.
3. Челнокова Н.О., Маслякова Г.Н., Островский Н.В. Патоморфологические изменения стенки венечных артерий человека в аспекте построения адекватной компьютерной модели гемодинамики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 56–64.
4. Челнокова Н.О., Островский Н.В., Голядкина А.А. и др. Компьютерное 3D пространственно-ориентированное моделирование гемодинамики венечных артерий при их атеросклеротическом поражении и реконструктивных вмешательствах // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – 2015. – Т. 18, № 1 (52). – С. 64–74.
5. Arokiaraj M.C., Palacios I. F. Finite Element Modeling of A Novel Self-Expanding Endovascular Stent Method in Treatment of Aortic Aneurysms. // Scientific reports. – 2014. – № 4 (3630). DOI: 10.1038/srep03630. URL: <http://www.nature.com/srep/2014/140110/srep03630/full/srep03630.html>. (accessed: 1 June 2015).
6. Kumar A. Computational Model of Blood Flow in the Presence of Atherosclerosis // 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010). Singapore IFMBE Proceedings, 2010. – V. 31, part 6. – P. 1591–1594.
7. Torii R., Keegan J., Wood N.B. et al. MR Image-Based Geometric and Hemodynamic Investigation of the Right Coronary Artery with Dynamic Vessel Motion // Ann. Biomed. Eng. – 2010. – V. 38, № 8. – P. 2606–2620.

REFERENCES

1. Bockeria L.A., Alshibaya M.M., Vishchpanov S.A., Vishchpanov A.S., Sokol'skaya N.O., Amirbekov M.M., Zhalilov A.K. Rezul'taty hirurgicheskogo lecheniya ishemicheskoy bolezni serdca u bol'nyh molodogo (do 45 let) vozrasta [Results of surgical treatment of coronary artery disease in young patients (under 45 years) age]. *Grudnaya i serdechno-sosudistaya hirurgiya – Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2014, no. 1, pp. 27–32 (in Russian).

2. Golyadkina A.A., Kirillova L.V., Shchuchkina O.A., Maslyakova G.N., Ostrovskiy N.V., Chelnokova N.O. Konechno-elementnoe modelirovanie ishemicheskoy bolezni serdca ishodya iz kartiny morfofunkcional'nyh izmeneniy venechnykh arteriy i serdechnoy myshcy cheloveka [The finite element modelling of ischemic heart disease based on the morphological and functional changes of human coronary arteries and myocardium]. *Ros. zhurn. Biomehaniki – Russian Journal of Biomechanics*, 2011, vol. 15, no. 4 (54), pp. 33–46 (in Russian).
3. Chelnokova N.O., Maslyakova G.N., Ostrovsky N.V. Patomorfologicheskie izmeneniya stenki venechnykh arteriy cheloveka v aspekte postroeniya adekvatnoy komp'yuternoy modeli gemodinamiki [Pathological changes in human coronary arteries in the aspect of building a computer model adequate hemodynamic]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Medicinskie nauki – News of Higher Educational Establishments. Povolzhye region. Medical sciences*, 2012, no. 4 (24), pp. 56–64 (in Russian).
4. Chelnokova N.O., Ostrovsky N.V., Golyadkina A.A., Kirillova L.V., Shchuchkina O.A., Albutov A.S. Komp'yuternoe 3D prostranstvenno-orientirovannoe modelirovanie gemodinamiki venechnykh arteriy pri ih ateroskleroticheskom porazhenii i rekonstruktivnykh vmeshatel'stvakh [Computer 3D spatially-oriented modeling of coronary arteries hemodynamics at their atherosclerotic damage and surgical reconstruction]. *Voprosy rekonstruktivnoy i plasticheskoy hirurgii – Questions of Reconstructive and Plastic Surgery*, 2015, no. 1 (52), pp. 64–74 (in Russian).
5. Arokiaraj M.C., Palacios I. F. Finite Element Modeling of A Novel Self-Expanding Endovascular Stent Method in Treatment of Aortic Aneurysms. *Scientific reports*, 2014, no 4 (3630). DOI: 10.1038/srep03630. URL: <http://www.nature.com/srep/2014/140110/srep03630/full/srep03630.html>. (accessed: 1 June 2015).
6. 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, pp. 1591–1594.
7. Torii R., Keegan J., Wood N.B. et al. MR Image-Based Geometric and Hemodynamic Investigation of the Right Coronary Artery with Dynamic Vessel Motion. *Ann. Biomed. Eng.*, 2010, vol. 38, no. 8, pp. 2606–2620.

Поступила в редакцию 10.10.2015

Утверждена к печати 02.02.2016

Авторы:

Челнокова Наталья Олеговна – канд. мед. наук, доцент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава РФ» (г. Саратов).

Островский Н.В. – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава РФ» (г. Саратов).

Голядкина А.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, руководитель отдела компьютерного моделирования в биомедицине и материаловедении Образовательно-научного института наноструктур и биосистем ФГБОУ ВПО СарГУ им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов).

Контакты:

Челнокова Наталья Олеговна

тел.: 8-908-554-33-38

e-mail: e-mail: nachelnokova@yandex.ru