

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТенок ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ

© 2011 г.

А.А. Голядкина, И.В. Кириллова

Саратовский госуниверситет им. Н.Г. Чернышевского

gramakovaaa@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведен анализ численного моделирования желудочков сердца в норме и при патологии (аневризма). Проведен анализ деформаций, контуров поля скоростей, а также распределение давления. Материал стенки желудочков при моделировании задавался как линейный изотропный материал. Кровь предполагалась ньютоновской жидкостью.

Ключевые слова: численное моделирование, сердце, аневризма, напряженно-деформированное состояние.

Заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС) на протяжении многих лет занимают одно из лидирующих положений в структуре заболеваемости и смертности. В современной России ежегодно признаются инвалидами более 1.1 млн. человек, при этом основной причиной первичной инвалидности лиц трудоспособного возраста являются болезни сердечно-сосудистой системы (48%). Среди причин смертности на первом месте стоит ишемическая болезнь сердца (ИБС). ИБС характеризуется нарушением кровоснабжения миокарда вследствие поражения коронарных артерий сердца. В бассейне пораженной артерии часто определяются изменения миокарда. У больных, перенесших инфаркт миокарда, могут быть обнаружены изменения геометрии левого желудочка (ЛЖ), его объемов и массы миокарда, аневризма сердца, перфорация межжелудочковой перегородки, отрыв сосочковых мышц и хорд, внутрисердечные тромбы. Аневризма – это мешковидной формы тонкостенное выпячивание стенки сердца. Образуется в результате того, что участок, пораженный инфарктом, растягивается и выпячивается под воздействием давления крови [1]. Все вышеперечисленные патологии подлежат только хирургическому лечению. Несмотря на значительное число работ, посвященных хирургическому лечению ИБС, ряд вопросов остается до сих пор недостаточно изученным. Существует необходимость активного внедрения компьютерного моделирования в кардиохирургию. С помощью индивидуальной компьютерной модели можно достаточно точно выявить и оценить индивидуальные особенности

анатомического строения сердца, изменения ЛЖ и другие патологические изменения. Индивидуальная компьютерная модель позволит грамотно провести предоперационную подготовку пациента, оценить степень эффективности соответствующих хирургических вмешательств по реваскуляризации миокарда и восстановлению геометрии левого желудочка и сердца человека в целом, дать рекомендации оперирующему хирургу.

В зарубежной печати представлено несколько работ [2–4], посвященных проблеме восстановления 2D, 2D+T, 3D, и даже 3D+T реалистичной геометрии отдельно левого желудочка и обоих желудочков вместе на основе использования данных эхокардиограмм (ЭКГ), ультразвукового исследования (УЗИ) и данных томографического исследования (КТ и МРТ).

Представленные результаты являются первыми на пути комплексного исследования, выполняемого в рамках проекта РФФИ №09-01-00804-а «Разработка математических методов оптимизации хирургического лечения ишемической болезни сердца». Для реконструкции сердца человека, учитывающей внутренний рельеф, использовался метод заливки желатином *in vitro*, а также данные УЗИ и метод фотографирования. Методика заливки заключалась в следующем: производили забор сердца вместе с перикардом, рассекали переднюю поверхность восходящей аорты, далее наполняли полости сердца желатином, после застывания желатина при помощи острого ножа-гильотины производились срезы, которые наглядно отражают внутреннюю и внешнюю поверхности сердца.

Рисунок 1 иллюстрирует подготовку срезов для создания 3D модели сердца человека.

Полученные срезы обрабатывались посредством графических редакторов: Adobe Photoshop (производился импорт фотографии и извлекалась

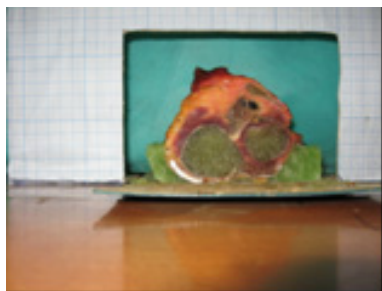


Рис. 1

внешняя и/или внутренняя поверхность сердца для дальнейшего получения зоны моделирования, а также изменение контрастности) и CorelDRAW (перевод растрового рисунка в векторные кривые) для дальнейшего моделирования с использованием специализированного программного пакета SolidWorks 2008 (SolidWorks corporation) (рис. 2).

Полученные модели ЛЖ и ЛЖ+ПЖ импортировались в ANSYS Multiphysics. Для последующих расчетов на данные объемы была наложена нерегулярная тетраэдрическая сетка с размером элементов 0.005 мм для стенки ЛЖ и 0.002 мм для жидкости (рис. 3–5).

Были рассмотрены следующие модели: левый желудочек в норме и при патологии (аневризма), камеры желудочков. Механические характеристики крови и стенки: $\rho_1 = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.0037 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\rho_2 = 1378 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0.4$ (коэффициент Пуассона), $E = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ (модуль Юнга).

При численном исследовании ЛЖ в норме за счет разницы давления возникают потоки поперечной циркуляции, имеющие характер завихрения в предсердно-желудочковой зоне. На рис. 6 показано образование вихря в систолу.

При рассмотрении ЛЖ с аневризмой наблюдается другая картина:

1) за счет уменьшения воздействия стенки на поток смещается поле давления;

2) максимум давления в начале и в конце систолы достигается в ампуле аневризмы (рис. 7 – начало систолы, рис. 8 – окончание систолы);

3) за счет разницы давления на внутренней и внешней стенках ЛЖ наблюдаются потоки поперечной циркуляции, имеющие характер завихрения в основании ЛЖ. На рис. 9 показано образование вихря в систолу.

При анализе НДС камер желудочков сердца с жестким закреплением межжелудочковой перегородки было зафиксировано, что большей активностью при равной сократительной функциональности стенки обладает левый желудочек, что подтверждено клинически.

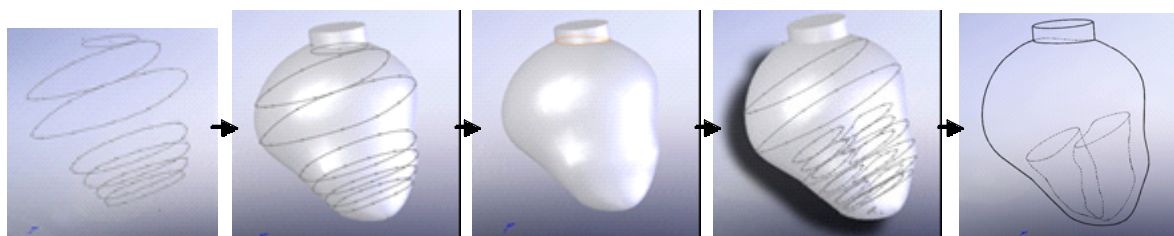


Рис. 2

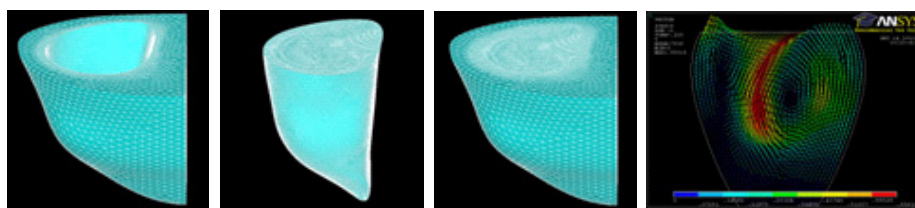


Рис. 3



Рис. 4

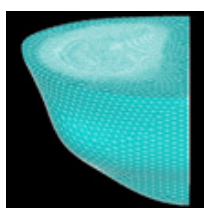


Рис. 5

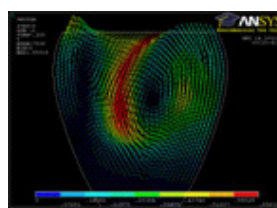


Рис. 6

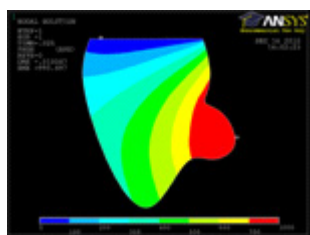


Рис. 7

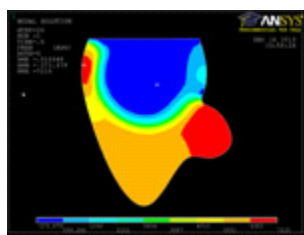


Рис. 8

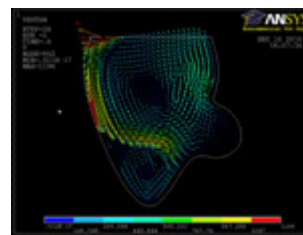


Рис. 9

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №09-01-00804-а).

Список литературы

1. Фадеев П.А. Инфаркт миокарда. М.: ООО «Издательство Оникс», 2007. 128 с.
2. Goktepe S., Abilez O. J., Kuhl E. A generic approach towards finite growth with examples of athlete's heart, cardiac

dilation, and cardiac wall thickening // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2010. V. 58. P. 1661–1680.

3. Noble J.A., Boukerroui D. Ultrasound image segmentation: a survey // IEEE. Trans. Med. Imag. 2006. V. 25. P. 987–1010.

4. Tangible Modelling of Ventricular Aneurysm / Eds. Shiraishi Y. et al. // WCB. 2010. IFMBE Proceedings 31. P. 469–472.

**NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE
OF NORMAL AND PATHOLOGICAL HUMAN VENTRICLE WALLS**

A.A. Golyadkina, I.V. Kirillova

Numerical analysis of strain-stress distribution for ventricles in normal and pathological state (aneurism) is provided. Deformations, velocity field contours and pressure distribution are analysed. The material of the ventricle wall is assumed to be linear isotropic; blood is assumed to be a Newtonian liquid.

Keywords: numerical modeling, heart, aneurism, stress-strain state.