

предоперационном прогнозировании результатов декомпрессионных и стабилизирующих хирургических операций на позвоночнике. При различных физиологических нагрузках позволит определить места критических нагрузок при воздействии силы в различных направлениях (падение, прыжок, изгиб).

Построенные компьютерные модели могут быть положены в основу разработки метода предоперационного прогнозирования позвоночника при различных патологических образованиях, коррекции и протезирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карих Р.И., Ревенко Т.А., Жигарев В.Е.* Сравнительная оценка эффективности методов стабилизации позвоночника в биомеханическом аспекте. – Рига: Медицинская биотехника: В 4 т. Т. 2, 1996. – С. 97–108.
2. *Цурова Н.Х.* Биомеханическое моделирование и исследование сегмента поясничного отдела позвоночника // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ). – 2008. – №3. – С. 73-78.
3. *Бегун П.И., Шукейло Ю.А.* Биомеханика: Учебник для вузов. – СПб.: Политехника, 2000. – 463 с.

Зиннатова Надежда Хамбертовна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

E-mail: cnx@nm.ru.

197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, тел.: (904)6173723.

Аспирантка.

Zinnatova Nadezhda Hambertovna

St.-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

E-mail: cnx@nm.ru.

5, Prof. Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia, Phone: (904)6173723.

Post-graduate student.

УДК 004.942:616.01/-099

М.Ю. Оганисян

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР ПАТОЛОГИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННОГО ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА ДО И ПОСЛЕ КОРРЕКЦИИ

Разработан компьютерный метод для исследования левого желудочка сердца, представляющий собой симбиоз биомеханического и клинического исследований, который позволяет проводить предоперационное прогнозирование.

Моделирование; биомеханика; патология; сердце.

M.Ju. Oganisyan

COMPUTER MODELLING AND BIOMECHANICAL RESEARCHES OF STRUCTURES PATHOLOGICALLY CHANGED LEFT VENTRICLE OF HEART BEFORE CORRECTION

The complex computer method for left ventricle of heart monitoring is developed. The method represents the symbiosis of biomechanical and clinical research and allows realize the preoperative prediction of critical state for left ventricle of heart.

Modelling; biomechanics; a pathology; heart.

Сердечно-сосудистые заболевания являются причиной более 55 % всех случаев смерти в России. Не снижающиеся показатели сердечнососудистой заболеваемости определяют социально-экономическую значимость этой проблемы.

Гипертрофическая кардиомиопатия с обструкцией выходного отдела левого желудочка сердца (ЛЖ) возникает у больных с неравномерной (асимметричной) гипертрофией стенок ЛЖ: увеличение толщины миокарда передней стенки (межжелудочковой перегородки) более чем на 16 мм при сохранении нормальной толщины задней стенки – 10 мм. Создается динамическое препятствие выбросу крови в аорту. Градиента давления в выходном отделе ЛЖ увеличивается до более 40 мм рт. ст. (рис. 1,а). Эта величина является критической. Причина возникновения обструкции выходного отдела неясна. Считается, что одним из механизмов является присасывание передней или обеих створок митрального клапана в суженное пространство выходного отдела ЛЖ при ускорении потока крови. Это подтверждается при ЭхоКГ – створки митрального клапана в систолу ЛЖ «замыкают» выходной отдел подклапанного пространства. При внедрении в практику метода лечения спиртовой абляции такое представление о механизме препятствия нельзя считать единственно правильным.

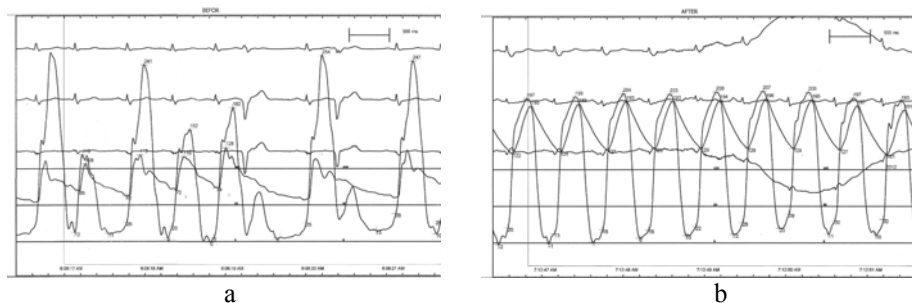


Рис. 1. Барограммы в выходном отделе левого желудочка до (а) и после (б) спиртовой абляции

Сразу, в момент введения спирта в септальные ветви, кровоснабжающие межжелудочковую перегородку в выходном отделе, происходит исчезновение градиента давления (рис. 1,б).

Для построения содержательной модели (рис. 2,а) и проведения компьютерного моделирования (рис. 2,б) и биомеханического анализа причин возникновения патологии необходимо рассмотреть данные внутрисердечного и ЭхоКГ исследований, полученных одновременно на этапах до введения спирта, во время и сразу после исчезновения функционального признака препятствия.

При этом провести: 1) регистрацию давления в зоне тела левого желудочка и в аорте; 2) контрастирование камер сердца во всех фазах сердечного цикла; 3) регистрацию динамики изменения толщины стенок ЛЖ путем ЭхоКГ в М-режиме; 4) регистрацию скорости потоков на уровне митрального и аортального клапанов и выходного отдела ЛЖ по данным ЭхоКГ.

Образование постинфарктной аневризмы ЛЖ (рис. 3,а) связано с выраженным изменением геометрии левого желудочка, увеличением его объемов, массы миокарда, нарушением насосной функции ЛЖ, то есть изменяются все параметры, характеризующие желудочковое ремоделирование. От напряжения в стенке ЛЖ зависят компенсаторные и патологические процессы в желудочке. Напряженно-деформированное состояние определяет особенности внутрисердечного потока

крови. Определение напряженно-деформированного состояния в миокарде с патологическими образованиями имеет как диагностическое, так и тактическое значение при определении объема хирургического вмешательства.

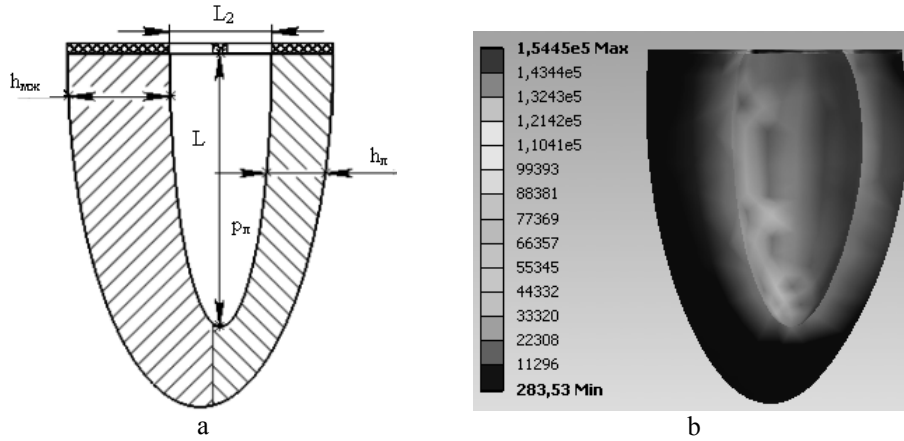


Рис.2. Содержательная модель (а) и эпюра напряжений в ЛЖ при гипертрофической кардиомиопатии с обструкцией выходного отдела (b)

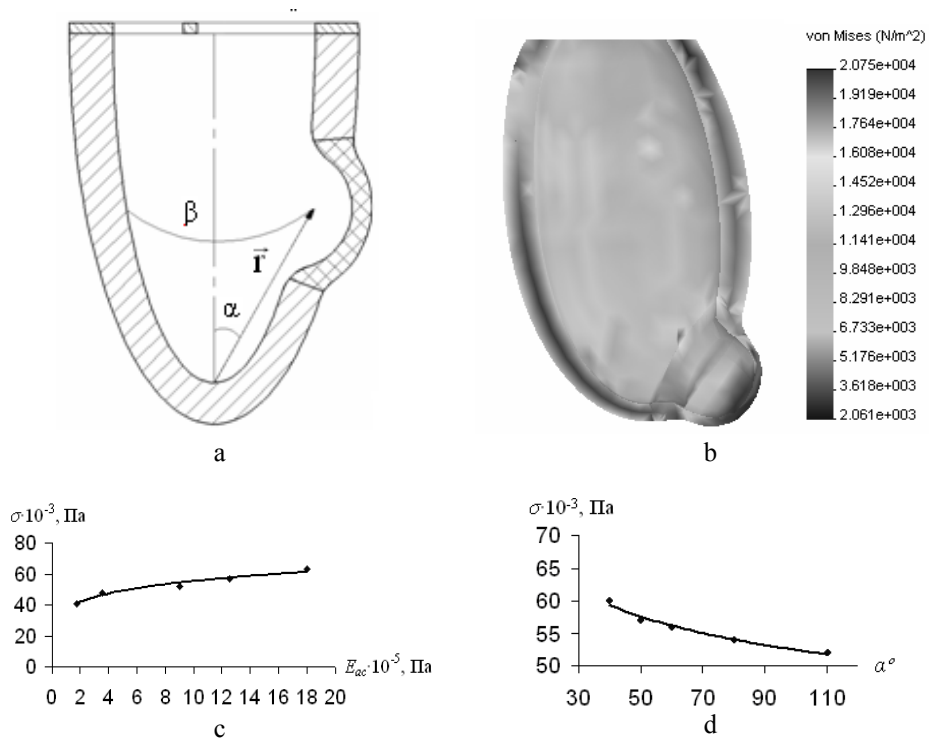


Рис. 3. Геометрическая схема (а), эпюра напряжений (b) и графики зависимости экстремальных значений напряжений в аневризме от модуля нормальной упругости аневризмы (c) и от угла α (d)

Показания к операции до настоящего времени носят качественный характер, так как не разработаны методики предоперационного прогнозирования. Биомеханический анализ напряженно-деформированного состояния левого желудочка при патологии и коррекции является важнейшей составляющей этого прогноза.

Современные клинические методы визуализации сердца позволяют с хорошей разрешающей способностью измерить кривизну полости миокарда и задать геометрические параметры миокарда конкретного пациента.

В развитие [1] для вычисления напряженно-деформированного состояния в аневризматически измененной сердечной мышце приняты следующие допущения: 1) материалы желудочка и аневризмы однородные, изотропные, упругие; 2) модуль нормальной упругости миокарда в диастолу 1,85 кПа, в систолу 180 кПа; 3) толщина стенки аневризмы и ее модуль упругости могут изменяться по произвольному закону и определяются характером изменения ее структуры (фиброзно-мышечная и фиброзная аневризмы).

Механические свойства биологических структур вводятся по данным экспериментальных исследований биологических структур *in vitro*.

На основе компьютерных клинических данных разработан биомеханический метод расчета напряжений в стенке ЛЖ в норме и при различных патологиях.

Место расположения патологии определяют параметры: \vec{r} – радиус-вектор от места пересечения в норме оси ЛЖ с его верхушкой до центра патологического образования: аневризмы; β – угловая координата радиуса-вектора \vec{r} в окружном направлении, отсчитываемая от пересечения переднего края межжелудочковой перегородки со стенкой ЛЖ; α – угловая координата радиуса-вектора \vec{r} в меридианальном направлении, отсчитываемая от оси ЛЖ.

Алгоритм расчета напряжений в стенке ЛЖ построен на основе зависимостей от фазы систолы i .

Изменение давления при сжатии разбито на 5 шагов нагружения. На каждом i -м шаге нагружения при приращении давления Δp_i обеспечение объема полости ЛЖ в соответствии с зависимостями выполняется по следующей схеме.

1. Рассчитываются перемещения и напряжения в стенке ЛЖ при приложении давления Δp_i к его внутренней поверхности.

2. К наружной поверхности ЛЖ пристраивается виртуальная наружная оболочка толщиной $h_{ni}=h_i$ с модулем нормальной упругости $E_{ni}=10 \cdot E_i$.

3. К виртуальной наружной оболочке прикладывается поверхностная нагрузка, обеспечивающая перемещение наружной поверхности ЛЖ адекватное ее физиологическому перемещению при соответствующем приращении давления. Вычисляются напряжения в стенке ЛЖ.

4. К внутренней поверхности ЛЖ пристраивается виртуальная внутренняя оболочка толщиной $h_{vi}=h_i$ и модулем нормальной упругости $E_{vi}=10 \cdot E_i$.

5. К виртуальной внутренней оболочке прикладывается поверхностная нагрузка, обеспечивающая перемещение, при котором толщина стенки ЛЖ адекватна ее физиологической толщине. Вычисляются напряжения в стенке ЛЖ.

6. Результирующие напряжения σ в стенке ЛЖ определяются алгебраической суммой напряжений, вычисленных в пунктах 1, 3, 5.

Исследовано влияние модуля нормальной упругости миокарда и толщины стенки ЛЖ, модуля нормальной упругости, толщины и радиуса аневризмы левого желудочка на экстремальное значение напряжения в стенке ЛЖ.

Геометрические параметры левого желудочка сердца толщина стенки левого желудочка и межжелудочковой перегородки в диастолу $h=15$ мм, длина и ши-

рина левого желудочка в диастолу соответственно $L=95$ мм и $L_1=35$ мм, передне-задний размер в диастолу $L_2=35$ мм, коэффициент Пуассона миокарда и аневризмы $\nu = 0,4$. Давления в полости левого желудочка в диастолу $p_{лд} = 2,7 \cdot 10^3$ Па, в систолу $p_{лс} = 1,9 \cdot 10^4$ Па.

На рис. 3,b-d приведены результаты вычислений напряжений в аневризмах: $R_{ад} = 15$ мм, $\beta = 180^\circ$, $h_{ад} = 2$ мм, $E_{мс} = 1,8 \cdot 10^5$ Па от модуля упругости аневризмы (с) и от места расположения аневризмы – α (d); при следующих параметрах: $\alpha = 110^\circ$ (с), $E_{ас} = 9 \cdot 10^5$ Па (d).

Разработанная интегральная компьютерная технология исследования и анализа состояния левого желудочка сердца, представляющая симбиоз биомеханического и клинического исследований, позволяет проводить предоперационное прогнозирование критического состояния левого желудочка с патологическими образованиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Безун П.И.* Гибкие элементы медицинских систем.– СПб.: Политехника, 2002.– 300 с.

Оганисян Маргарита Юрьевна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

E-mail: smu_r@mail.ru.

19000, г. Санкт-Петербург, п. Мурино, ул. Оборонная, 2-4-259, тел.: (812)7102121.

Аспирантка.

Oganisyan Margarita Jurevna

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

E-mail: smu_r@mail.ru.

2-4-259, st. Defensive, item of Murino, Saint-Petersburg, 19000, Phone: (812)7102121.

Post-graduate student.