

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА В НОРМЕ И ПАТОЛОГИИ

Построена математическая модель активного левого желудочка. Выполнен анализ влияния диффузных нарушений биомеханических свойств стенки на его напряженно-деформированное состояние.

Левый желудочек представлен полый толстостенной сферой из полярно-симметричного, трансверсально изотропного, несжимаемого биопругого материала. Активность материала стенки учтена введением в соотношение «напряжения—деформации» тензора биофактора (тензора деформаций активного сокращения):

Задача решена в линейной постановке. Исходом из физического закона

$$\sigma^{ik} = g^{ik}h + A^{iklm}(E_{lm}p_{lm}), \quad (1)$$

связывающего тензоры напряжений σ^{ik} , деформаций E_{lm} , биофактора p_{lm} и гидростатическое напряжение в стенке $h = g_{ik}\sigma^{ik}/3$ (g_{ik} —метрический тензор). Так как материал миокарда принят несжимаемым, сумма линейных деформаций равна нулю $g_{ik}e_{ik} = 0$. С учетом полярной симметрии из уравнений несжимаемости

$$u' + 2u/r = 0, \quad (2)$$

равновесия

$$\sigma' r + 2(\sigma_r - \sigma_\phi)/r = 0 \quad (3)$$

и граничных условий на внутренней ($r=a$) и наружной ($r=b$) поверхностях получены формулы для радиального перемещения

$$u = u(a)(a/r)^2$$

радиального σ_r и окружного напряжений σ_ϕ

$$\sigma_r = -4Er \int_p^\beta x^{-1} n(x) dx, \quad \sigma_\phi = 2Er[n(p) - 2 \int_p^\beta x^{-1} n(x) dx] \quad (4)$$

в изоволюмическую фазу систолы.

Здесь $p=r/a$; $\beta=b/a$; Er —модуль упругости материала стенки левого желудочка в радиальном направлении; $n(p)$ —окружная деформация активного сокращения.

Из анализа формул (4) следует, что в фазу изоволюмического сокращения при прочих равных условиях наибольшее в полости желудочка давление достигается при таком распределении биофактора по толщине стенки, когда он нарастает от эпи- к эндокардиальной поверхности.

При линейном распределении биофактора

$$p(r) = p_0(\beta - r)(\beta - 1)^{-1}$$

и выключении из активного сократительного процесса зоны $a \leq r \leq 1$, $1 < b$ (в этой зоне применяем $p(r) = 0$) давление в желудочке будет ($\lambda = 1/a$)

$$q = 4p_0 E_T [\beta \ln(\beta/\lambda) - (\beta - \lambda)] (\beta - 1)^{-1}$$

Считая давление функцией параметра λ , находим при $\beta = 1,5$, что $q(1 \cdot 1)/q(1 \cdot 0) = 0,6$. Иначе говоря, если в зоне эндокарда, составляющей 20% толщины стенки нет активного сокращения в изоволюмической фазе систолы, то давление к ее концу будет уменьшено на 40%. Таким образом, топография патологических нарушений сократительной функции миокарда заметно влияет на насосную функцию сердца.

Рассматривая фазу изгнания при постоянном давлении, приходим к формуле для уровня биофактора $p_0 = \bar{p}_0 + c \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0} \right)^{1/3} \right]$ (5),

где $\bar{p}_0$ — значение биофактора, достигнутое к концу изоволюмической фазы систолы; $\frac{\Delta V}{V_0}$ — относительный выброс. Из (5) следует, что p_0 должно возрастать с увеличением ΔV . Таким образом, фазы изоволюмического и изобарического сокращений являются энергозависимыми процессами.

Предложенная модель находит качественное согласование со сложившимися в литературе представлениями о биомеханике сердца и может быть использована как в математическом моделировании левого желудочка, так и для оценки характера его функционирования в норме и при различных патологических состояниях.

Институт проблем машиностроения АН УССР,
Харьковский НИИ терапии МЗ УССР

Поступила 27/IV 1987 г.

Р. ЗУ. ЧУЇСНОР, Ї. І. ЯБЛУЧАНСЬКИЙ

УЧАСІВЦІ ЗУЇЇ ФІЗИОЛОГІЧНОЇ І ПАТОЛОГІЧНОЇ
БІОМЕХАНІКИ ЛІВОГО ЖЕЛУДОЧКА

У. І. Ф. Н. І. Я.

У науковій роботі запропоновано біомеханічну модель скорочення лівого
желудочка серця в нормі та при патології.

B. Y. Kantor, N. I. Yabluchansky

Biomechanical Model of an Active Left Ventricle in Norm and Pathology

S u m m a r y

Left ventricle biomechanical model is proposed to describe its contraction in the isovolumic and isobaric phases of a systole. The significance of changes of the myocardium material active properties is found out in the pathological state of intracardiac hemodynamics.