

С. А. ВЛАДИМИРОВ, В. Н. КОВАЛЕНКО, В. А. КОЗЛОВ, А. И. РУДИНСКАЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА КАК ЦЕЛОГО ОРГАНА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИАСТОЛЫ

В настоящее время разрабатываются способы и методические подходы оценки функционального состояния миокарда по компонентам диастолы [1, 3—6]. В этой связи возникает необходимость разработки ряда теоретических вопросов биомеханики миокарда в эту фазу сердечной деятельности. В частности, представляет интерес изучение упругих свойств желудочков при растяжении путем повышения конечного диастолического давления, что и явилось целью настоящей работы.

Материал и методика исследования. Опыты проведены на сердцах 30 собак. Животные забивались, сердца тотчас извлекались и помещались в сосуд с теплым физиологическим раствором (37°C). Левое атрио-вентрикулярное отверстие герметизировали кисетным швом, проходящим через края створок митрального клапана. В аорту вводилась градуированная стеклянная трубка и на аорту накладывалась лигатура, что исключало обратный ток жидкости между аортой и трубкой. После этого левый желудочек устанавливался в сосуде так, чтобы его основание и нулевая отметка трубки, введенной в аорту, соответствовали уровню жидкости (рис. 1). Полость желудочка заполнялась физиологическим раствором до метки «нуль», что соответствовало объему желудочка (V_0) при конечном диастолическом давлении, равном нулю. Этот объем жидкости регистрировался. Далее доливали физиологический раствор (V_1) до 5 см выше нулевой отметки, что примерно соответствует конечному диастолическому давлению в левом желудочке (3—5 мм рт. ст.). Зная объем влитой воды V_1 и объем столба воды V_2 высотой 5 см, находили $\Delta V = V_1 - V_2$, т. е. изменение объема желудочка при создании в нем давления P . Измеряли размеры левого желудочка (поперечный и продольный) и толщину стенки желудочка. Длительность эксперимента не превышала 5—10 мин. от момента смерти животного, что исключало наступление процессов посмертного окоченения сердца.

Результаты и их обсуждение. Изменение объема желудочка под действием сил внутреннего давления нелинейно. Принципиальный характер зависимости объема желудочка от внутреннего давления показан на рис. 2. Математическое описание этих результатов проведено при моделировании левого желудочка толстой сферой с известным из

эксперимента внутренним объемом (V_0) и толщиной стенки δ (рис. 3). Схему расчета иллюстрируем следующим примером: $P=5$ г/см²; $V_0=10,3$ см³; $\delta=0,9$ см; $\Delta V=10$ см³. По V_1 и δ вычисляли внутренний ($R_v=1,35$ см) и наружный ($R_n=2,25$ см) радиусы. Принимали, что оболочка изнутри нагружена равномерно распределенным давлением P , а снаружи давление равно нулю. Радиальные перемещения изнутри U_1 и извне U_2 находили по экспериментальным данным изменения объема применительно к сферической толстой оболочке. U_1 определяли, исходя из формулы изменения внутреннего объема:

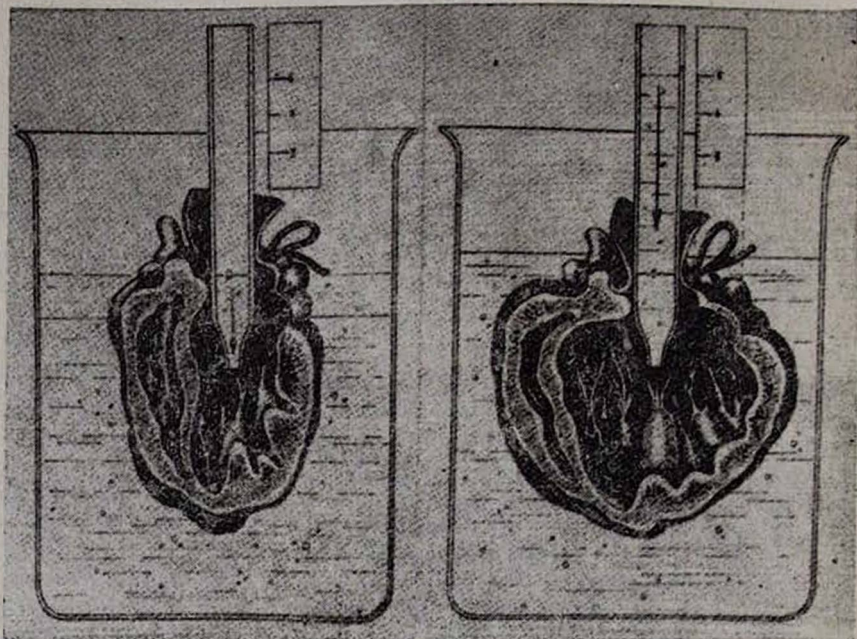


Рис. 1. Иллюстрация к методике исследования упругих свойств левого желудочка при нагружении объемом (пояснение в тексте). а—давление в полости желудочка равно нулю; б—давление в полости желудочка равно 3—5 мм рт. ст.

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi (R_v + U_1)^3 - \frac{4}{3} \pi R_v^3 \quad (1).$$

Из (1) находим, что $U_1=0,35$ см.

U_2 определяли из условия несжимаемости ткани сердечной мышцы, т. е. используя тот факт, что объем тела оболочки до деформации равен объему после деформации:

$$\frac{4}{3} \pi (R_n^3 - R_v^3) = \frac{4}{3} \pi [(R_n + U_2)^3 - (R_v + U_1)^3] \quad (2).$$

Из (2) $U_2=0,15$ см.

По данным (R_v , R_n , P , U_1 , U_2) можно определить модуль упругости материала оболочки E [7]—задача Ламе.

Схема вычислений следующая:

$$\text{а) } \left. \begin{aligned} U_1 &= C_1 \cdot R_v + \frac{C_2}{R_n^2} \\ U_2 &= C_1 \cdot R_n + \frac{C_2}{R_v^2} \end{aligned} \right\} \quad (3).$$

Используя (3) по известным U_1 , U_2 , R_v , R_n , находим числа C_1 и C_2 .
б) C_1 и C_2 связаны с коэффициентами Ламе λ и μ следующими формулами:

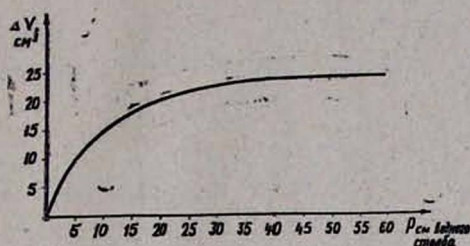


Рис. 2. Изменение объема левого желудочка в зависимости от внутреннего давления. P —давление в см вод. ст., ΔV —изменение объема желудочка в см^3 .

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{3\lambda + 2\mu} \cdot P \cdot \frac{R_n^3}{R_n^3 - R_v^3} \\ C_2 &= \frac{1}{4\mu} \cdot P \cdot \frac{R_v^3 \cdot R_n^3}{R_n^3 - R_v^3} \end{aligned} \right\} \quad (4).$$

в) По найденным из (4) λ и μ модуль упругости E определяется по формуле:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (5).$$

В нашем примере

$$C_1 = 0,019$$

$$C_2 = 0,59 \text{ см}^3$$

$$\lambda = 18,5 \text{ г/см}^2; \quad \mu = 6,5 \text{ г/см}^2;$$

$$E = 17,8 \text{ г/см}^2$$

Средний модуль упругости левого желудочка как целого органа равняется 20 г/см^2 , доверительный интервал (18 г/см^2 , 22 г/см^2) при уровне надежности 0,95. Эти результаты близко совпадают с данными, полученными нами при изучении упругих свойств на изолированных образцах сердечной стенки при сжатии [2].

Проведенные эксперименты и вычисления позволили количественно представить упругие свойства стенки левого желудочка при диастолическом расширении под действием сил внутреннего давления. Согласно полученным данным, физиологическая величина конечного диастолического давления приводит к увеличению диастолического объема левого желудочка на 50—90%. Последующее увеличение давления не приводит к столь значительным изменениям объема желудочка, т. е. по мере роста диастолического объема сверх средних физиологических величин, определяемых конечным диастолическим давлением, диастолическая жесткость миокарда увеличивается.

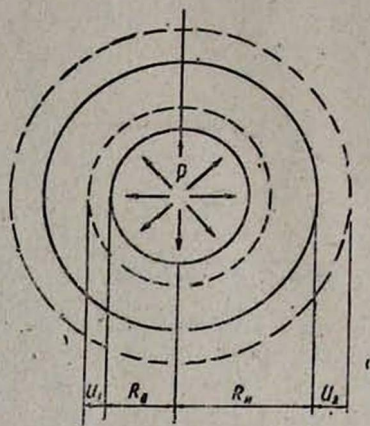


Рис. 3. Схема, поясняющая математическое моделирование левого желудочка толстой сферой с переменным объемом (пояснение в тексте).

Таким образом, упругие свойства стенки левого желудочка, как целого органа, сходны с результатами, полученными нами ранее на изолированных образцах сердечной стенки при сжатии. Можно полагать, что полученные нами данные об увеличении диастолической жесткости миокарда при расширении влияют определенным образом на функционирование механизма Франка-Старлинга в условиях как физиологического, так и патологического расширения сердца.

Выводы

1. Упругие свойства стенки левого желудочка, как целого органа, хорошо согласуются с данными, полученными на изолированных образцах сердечной стенки. Это позволяет изучать в условиях экспериментальных исследований упругость желудочков на отдельных образцах их стенки.

2. Согласно полученным экспериментальным данным, среднефизиологическое конечное диастолическое давление (5—6 мм рт. ст.) приводит к значительному увеличению конечного диастолического объема желудочка. Упругость стенки желудочка увеличивается по мере увеличения конечного диастолического объема.

Ս. Ա. ՎԼԱԴԻՄԻՐՈՎ, Վ. Ն. ԿՈՎԱԼԵՆԿՈ, Վ. Ա. ԿՈԶԼՈՎ, Ա. Ի. ՌՈՒԴԻՆՍԿԱՅԱ
 ԶԱՆԿ ՓՈՐՈՔԻ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ
 ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ, ՈՐՊԵՍ ԱՄԲՈՂՋԱԿԱՆ ՕՐԳԱՆԻ
 ԴԻԱՍՏՈԼԱՅԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հաստատված է, որ վերջային դիաստոլիկ ճնշման միջին ֆիզիոլոգիական մեծությունը բերում է վերջային դիաստոլիկ ծավալի աճի 50—90%-ով: Միջին մեծություններից ավելի դիաստոլիկ ծավալի աճի հետ մեկտեղ, որը որոշվում է նորմալ վերջային դիաստոլիկ ճնշումով, սրտամկանի կարծրությունը աճում է:

S. A. Vladimirov, V. N. Kovalenko, V. A. Kozlov, A. I. Rudinskaya

Experimental Study of the Elastic Properties of the Left Ventricle, as of the Whole Organ in Diastole Stimulation

S u m m a r y

It is established that the average physiologic quantity of the final diastolic pressure increase final diastolic volume on 50—90%. With the increase of the diastolic volume above the average quantities, determined by the normal final diastolic pressure, the toughness of the myocardium increases.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Атьков О. Ю., Беленков Ю. Н., Затушевский И. Ф., Нютянь-де Г. Б. Терапевтический архив, 1979, 5, 27—34.
2. Коваленко В. Н., Рудинская А. И. Кровообращение, 1980, 3, 12—16.
3. Комаров Ф. И., Ольбинская Л. И. Начальная стадия сердечной недостаточности. М., 1978.
4. Мурашко В. В., Мелентьев А. С., Таричко Ю. В., Алексеева Л. А. Кардиология, 1978, 8, 141—144.
5. Мухарлямов Н. М. Ранние стадии недостаточности кровообращения и механизмы ее компенсации. М., 1978.
6. Нютянь-де Г. Б., Затушевский И. Ф., Атьков О. Ю. Терапевтический архив, 1979, 8, 78—91.
7. Рекач С. П. Руководство к решению задач по теории упругости. М., 1978.