

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА

¹Островский Н.В., ¹Челнокова Н.О., ²Голядкина А.А.,
¹Другакова Ю.С., ¹Басенкова Е.В.

¹ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского» Минздрава России, Саратов;

²ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»,
Саратов, e-mail: ostrovsky.colia@yandex.ru

Проведено исследование биомеханических характеристик желудочков сердца человека. Материалом для исследования послужили 80 сердец, изъятых при аутопсии 80 трупов взрослых людей (40 женщин и 40 мужчин) в возрасте 31–70 лет. Методы исследования: кардиометрия, растяжение и сжатие нефиксированных образцов стенок правого, левого желудочка и межжелудочковой перегородки на настольной одноколонной испытательной машине Instron 5944. В ходе эксперимента были разработаны методики исследования биомеханических свойств стенок желудочков сердца человека. Выявлены закономерности возрастной и половой изменчивости упруго-деформативных и прочностных свойств стенок левого и правого желудочка, межжелудочковой перегородки, характеризующиеся плавным увеличением жесткости и сопротивления тканей миокарда при относительной малой деформации, на фоне уменьшения их прочности и эластичности от 31–40 к 61–70 годам. Установлено, что ткани левого желудочка в 61–70 лет обладают наименьшей растяжимостью и прочностью по сравнению с тканями правого желудочка и межжелудочковой перегородки. Полученные данные позволяют расширить понимание морфологической организации желудочков сердца, что весьма актуально для развития персонализированной медицины. Учитывая индивидуальные, возрастные и половые различия биомеханических характеристик тканей желудочков сердца, возможно рационально подобрать тип материала заплат при реконструктивно-восстановительных операциях на сердце.

Ключевые слова: желудочки сердца человека, морфологические показатели, биомеханика, эксперимент

BIOMECHANICAL PARAMETERS OF VENTRICLES OF THE HUMAN HEART

¹Ostrovskiy N.V., ¹Chelnokova N.O., ²Golyadkina A.A., ¹Drugakova Y.S., ¹Basenkona E.V.

¹Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Saratov;

²Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Saratov, e-mail: ostrovsky.colia@yandex.ru

A study of the biomechanical characteristics of the ventricles of the human heart. The material for the study were 80 hearts seized during the autopsy of 80 corpses of adults (40 women and 40 men) aged 31–70 years. Methods: cardiometry, tension and compression specimens floating walls right, the left ventricle and interventricular septum on the table One-column testing machine Instron 5944. In the experiment, we developed a technique of research of biomechanical properties of the walls of the ventricles of the human heart. The regularities of the age and sex variability elastically deformative and strength properties of the walls of the left and right ventricle, the ventricular septum, characterized by a smooth increase stiffness and myocardial tissue resistivity at a relative low strain against reduction in their strength and elasticity from 31–40 to 61–70 years. It is found that the tissue of the left ventricle in 61–70 years have lower stretchability and strength when compared with the tissues of the right ventricle and septum. These data expand the understanding of morphological organization of the ventricles of the heart, which is very important for the development of personalized medicine. Taking into account individual, age and sex differences biomechanical characteristics of tissues of the ventricles of the heart, it is possible to rationally choose the type of material patches during reconstructive operations on the heart.

Keywords: ventricles of the human heart, morphological parameters, biomechanics, experiment

В последние годы наблюдается тенденция роста числа больных с осложненными формами ишемической болезни сердца и, в частности, с постинфарктными аневризмами левого желудочка и кардиомиопатиями. По данным патологоанатомических исследований, частота выявления постинфарктной аневризмы составляет 8,5–34%, причем у мужчин аневризмы формируются в 5–7 раз чаще, чем у женщин. Применяемые в хирургической практике методы коррекции полостей желудочков не всегда имеют стабильные результаты [1, 4]. Знание деформационных и прочностных свойств

тканей желудочков сердца, а также изменчивость этих свойств с возрастом и в зависимости от пола необходимы для прогнозирования развития возможных осложнений при хирургических реконструктивных вмешательствах, проводимых на сердце. Выбор материала основан на сопоставимости по биоморфологическим параметрам органа и тканей данного пациента [3, 6]. В связи с этим становятся актуальными исследования, направленные на изучение биомеханических характеристик органов и тканей человека.

Изучению механических свойств тканей сердца и крупных сосудов посвящено большое

количество работ, однако значительная часть данных исследований проводится на препаратах животных, также не описано, в каком физиологическом интервале были определены характеристики материала [2, 5, 7]. Отсутствуют в доступной литературе данные о возрастных, топографических, половых различиях биомеханических свойств тканей стенок желудочков сердца человека.

Цель исследования: определить деформационные и прочностные свойства тканей желудочков сердца взрослых людей.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования послужили 80 сердец, изъятых при аутопсии 80 трупов взрослых людей (40 женщин и 40 мужчин) в возрасте 31–70 лет, поступившие в ГУЗ «Бюро судебно-медицинской экспертизы» Министерства здравоохранения Саратовской области. Причина смерти преимущественно носила насильственный характер и не была связана с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Для детального анализа возрастной динамики биомеханических параметров желудочков сердца материал исследования распределен по десятилетиям на 4 возрастные группы (табл. 1).

В работе использовали следующие методы исследования: антропометрию, органо- и гистоморфометрию, растяжение и сжатие нефиксированных образцов тканей желудочков сердца на настольной одноколонной испытательной машине Instron 5944 (зарегистрирована в Государственном реестре РФ под номером 43602-10) с нагрузочной ячейкой в 500 Н для изучения их биомеханических свойств, протоколирование. Эксперименты проводились в день забора материала не позднее двух часов после аутопсии и не позднее 12 часов после констатации смерти. До начала эксперимента ткани сохранялись в физиологическом растворе при температуре $20 \pm 1^\circ$.

Обработку полученных количественных данных проводили вариационно-статистическими методами на IBM PC/AT «Pentium-IV» в среде Windows-2000 с использованием пакета прикладных программ «Statistica 10.0» (StatSoft Inc., USA). Для всех параметров определяли минимальное (Min) и максимальное (Max) значения, среднее значение (M), ошибку среднего (m), стандартное отклонение (s), медиану (Me) 25 и 75%-ные процентиля. Для определения достоверности различия средних величин использовали параметрические и непараметрические статистические критерии. Критический уровень статистической значимости значения p для вышеуказанных статисти-

ческих критериев был принят за 95%-ный ($p < 0,05$) и выше порог вероятности.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработка методик исследования биомеханических свойств тканей желудочков сердца. Физиологическая работа сердца делится в сердечный цикл: систолическую и диастолическую фазы. В диастолическую фазу ткани сердца подвергаются нагрузке внутренним давлением, а в систолическую фазу происходит сокращение сердечной мышцы (миокарда), поэтому стенки желудочков сердца испытывают нагрузки, как растяжение, так и сжатие. Ниже представлены методики проведения эксперимента по растяжению тканей и проведения эксперимента на сжатие тканей.

Методика проведения эксперимента по растяжению. Образцы вырезались из передней, задней стенок желудочков сердца и межжелудочковой перегородки в средней трети, Толщину и ширину образца измеряли с помощью цифрового микрометра Mitutoyo с точностью измерений до 0,001 мм. В среднем размеры образца составляли $30 \times 10 \times 10$ мм.

Затем образец закреплялся между двумя прорезиненными пневматическими зажимами разрывной машины и нагружался с определенной скоростью. Статическую зависимость напряжения мышцы от деформации можно получить, если нестимулируемые полоски миокарда подвергать медленным линейным деформациям. Для определения оптимальной скорости нагружения образец растягивали с различными скоростями от 5 до 25 мм/мин. Увеличение скорости растяжения более 15 мм/мин для одних и тех же значений напряжения приводило к большим разрушениям тканей. Скорости нагружения меньше 5 мм/мин не соответствуют физиологическому процессу, поскольку диастолическая фаза сердечного цикла по времени составляет до 0,42 с. Настоящее исследование позволило выбрать оптимальную скорость нагружения – 10 мм/мин.

Таблица 1

Распределение объектов исследования в зависимости от возраста

Возрастные группы	Возраст (лет)	Число наблюдений				Всего
		Мужчины		Женщины		
		абсолютные значения	относительный показатель (%)	абсолютные значения	относительный показатель (%)	
1	31 – 40	10	12,5	10	12,5	20
2	41 – 50	10	12,5	10	12,5	20
3	51 – 60	10	12,5	10	12,5	20
4	61 – 70	10	12,5	10	12,5	20
	Всего	40	50,0	40	50,0	80

До проведения эксперимента по определению механических свойств проводилась стабилизация свойств биологического материала. Это обусловлено интересной особенностью его поведения во время проведения эксперимента – эффектом «смягчения напряжений». При циклической нагрузке-разгрузке, с увеличением числа циклов, наблюдается увеличение значений деформаций, соответствующих одним и тем же напряжениям в точке до предела текучести. По истечении определенного количества нагрузок-разгрузок материал начинает демонстрировать практически одинаковое поведение от одного цикла к другому. Для определения числа циклов образец подвергал деформациям до 20%. На 8–9 цикле нагружения диаграмма стабилизировалась, образец демонстрировал одинаковое поведение. Это позволило определить, что количество циклов нагружения и разгрузки образца при растяжении тканей желудочков сердца должно равняться 10 (рис. 1).

Методика проведения эксперимента на сжатие. При реализации экспе-

римента на сжатие миокарда использовались две плиты диаметром 50 мм между которыми закреплялся образец. В среднем размеры образца составляли 10×10×10 мм. Предварительно была определена оптимальная скорость нагружения – 10 мм/мин и количество циклов стабилизации свойств материала. При сжатии на 3–4 цикле диаграмма стабилизируется. Таким образом, было проведено 5 циклов нагружения и разгрузки образцов миокарда (рис. 2).

В ходе экспериментов фиксировались значения прикладываемой нагрузки и изменения начальной длины образца. Значения напряжения в направлении нагружения вычислялись по формуле

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S},$$

где P_i – величина прикладываемой в направлении i нагрузки; S – площадь поперечного сечения образца.

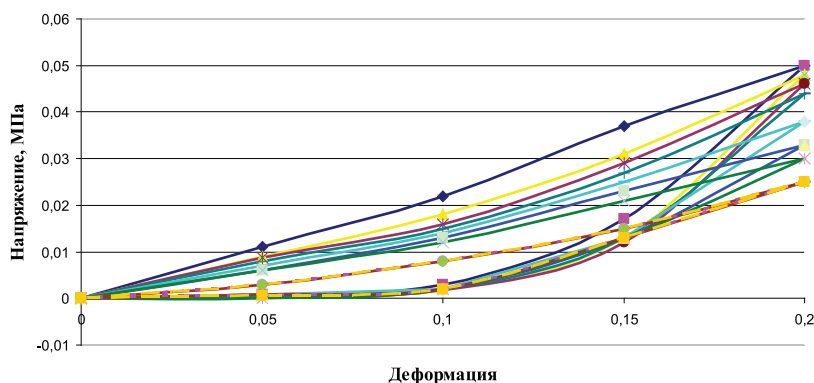


Рис. 1. График стабилизации свойств миокарда при растяжении образцов

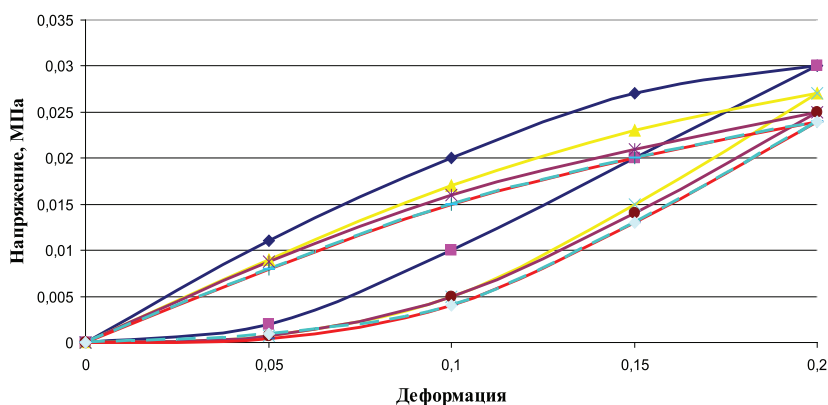


Рис. 2. График стабилизации свойств миокарда при сжатии образцов

Результаты эксперимента по определению биомеханических свойств тканей желудочков сердца при растяжении. Стенка желудочков сердца состоит из 3 слоев: внутренний – эндокард, средний – миокард и наружный – эпикард. Эндокард очень тонок (по соотношению со средним слоем) и трудно отделяем от миокарда. Было проведено растяжение образцов эпикарда и миокарда совместно с эндокардом в двух

направлениях. Образцы при растяжении демонстрировали нелинейный характер поведения. В результате эксперимента были получены графики зависимостей напряжение – деформация (рис. 3), которые позволили сделать вывод о том, что миокард обладает практически изотропными свойствами.

На рис. 4 представлены средние значения модуля Юнга по возрастным группам обоего пола для тканей желудочков сердца.

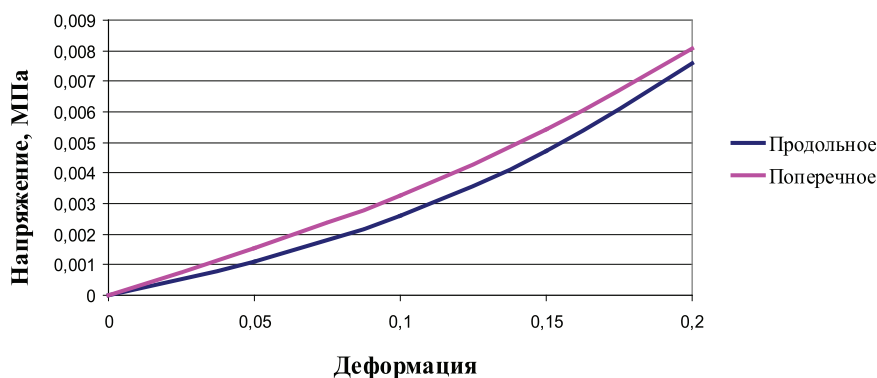


Рис. 3. График зависимостей удлинений от напряжений для образцов миокарда в продольном и поперечном направлениях

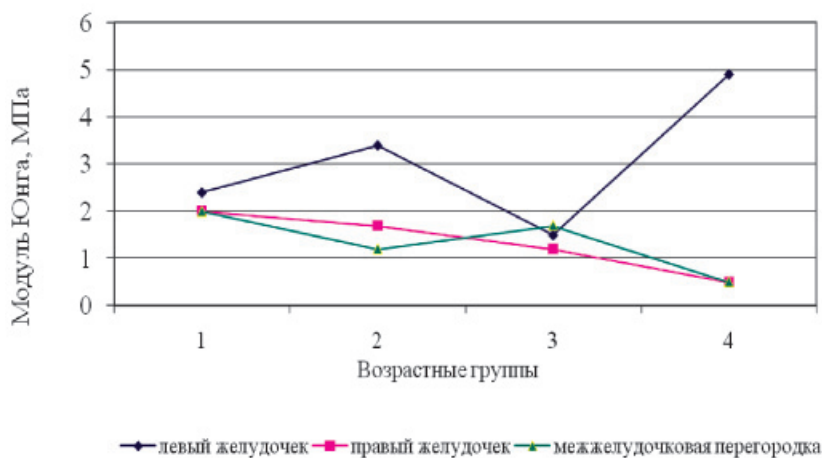


Рис. 4. Значения модуля Юнга в зависимости от возрастной группы

Таблица 2

Значения модуля Юнга миокарда, МПа (Min-Max)

Возрастные группы	Миокард левого желудочка		Миокард правого желудочка		Миокард межжелудочковой перегородки	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины
1	2,1–3,1	1,8–3,6	1,5–2,5	1,7–2,7	1,6–2,4	1,8–2,9
2	1,7–4,8	2,0–5,3	0,6–2,8	1,4–2,9	1,0–2,1	1,2–2,7
3	0,4–2,6	2,5–3,9	0,1–2,3	1,7–2,3	0,6–2,8	0,8–3,2
4	1,0–9,0	5,0–7,2	0,5–1,8	1,0–2,2	0,1–0,9	1,0–1,5

В табл. 2 представлены значения модуля Юнга с учетом половой принадлежности и возрастной группы.

Анализ экспериментальных данных показал, что в возрасте 61–70 лет ткани левого желудочка обладают большим модулем Юнга, нежели ткани правого желудочка и межжелудочковой перегородки, для возрастной группы 31–40 лет наблюдается большая эластичность образцов тканей левого желудочка и жесткая эластичность для тканей межжелудочковой перегородки. Разброс значений модуля Юнга в возрастной группе 61–70 лет, по-видимому, обусловлен поражением миокарда мелкоочаговым кардиосклерозом. Ткани миокарда, пораженные кардиосклерозом, имеют существенно больший модуль Юнга, нежели здоровые (или относительно здоровые).

Выявлена половая изменчивость биомеханических характеристик миокарда. Так, модуль Юнга тканей миокарда у женщин в среднем в 3–4 раза превосходит данный показатель у мужчин.

Предел прочности для тканей желудочков сердца снижается с возрастом, причем контрастный переход наблюдается от 1-й ко 2-й возрастной группе. Это подтверждается статистическими данными о количестве повреждений стенки желудочков сердца у людей возраста старше 40 лет [1, 2].

Наружный слой (эпикард) состоит из соединительной ткани, который уступает миокарду по толщине более чем в 10 раз, а по жесткости превосходит на один порядок и составляет в среднем 20 МПа.

Результаты эксперимента по определению биомеханических свойств миокарда при сжатии. При исследовании определено, что по внешнему виду до предела текучести график сжатия совпадает с графиком растяжения. Однако выраженной площади текучести для биологических материалов не наблюдается. Увеличивающееся в процессе деформации поперечное сечение образца способно выдерживать все большую нагрузку, вследствие чего может принимать бочкообразную форму. Следовательно, предел прочности при сжатии биологических материалов не может быть определен. Но следует отметить, что при сжатии модуль Юнга принимает те же значения, что и при растяжении.

Заключение

Таким образом, в результате проведения экспериментов определены пара-

метры биомеханических свойств тканей желудочков сердца человека для разных возрастных групп у лиц мужского и женского пола. Выявлена индивидуальная, топографическая, возрастная и половая изменчивость деформационных и прочностных свойств тканей желудочков сердца взрослых людей. Для тканей желудочков сердца разрушающее удлинение в 4-й возрастной группе составляет 30% по сравнению с начальной длиной образца, в 1-й возрастной группе этот показатель составляет 50%. Значительное понижение разрушающих напряжений (на 50%) и деформаций (на 20%) характерно для 4-й возрастной группы по сравнению с 1-й. При исследовании обнаружено, что ткани левого желудочка в 4-й возрастной группе обладают наименьшей растяжимостью и прочностью по сравнению с тканями правого желудочка и межжелудочковой перегородки, так как для их разрушения удлинением необходима достаточно небольшая сила – в среднем 10 Н. Это позволяет предположить, что при динамических нагрузках пожилые люди более подвержены разрыву желудочков сердца, в особенности левого. Полученные данные позволяют расширить понимание морфологической организации желудочков сердца, что весьма актуально для развития персонализированной медицины. Учитывая индивидуальные, возрастные и половые различия биомеханических характеристик тканей желудочков сердца, возможно рационально подобрать тип материала заплат при реконструктивно-восстановительных операциях на сердце.

Список литературы

1. Белов Ю.В. Варакин В.А. Хирургическое ремоделирование левого желудочка при постинфарктных аневризмах // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2000. – № 3. – С. 68–72.
2. Ефимов А.А., Курзин Л.М., Буров В.В., Петросян К.А. Количественная оценка возрастных изменений морфологических показателей крупных артерий // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – № 1. – С. 350–352.
3. Конечно-элементное моделирование ишемической болезни сердца исходя из картины морфофункциональных изменений венечных артерий и сердечной мышцы человека / А.А. Голядкина, И.В. Кириллова, О.А. Щучкина, Г.Н. Маслякова, Н.В. Островский, Н.О. Челнокова // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 4 (54). – С. 33–46.
4. Результаты хирургического лечения ишемической болезни сердца у больных молодого (до 45 лет) возраста / Л.А. Бокерия, М.М. Алшибая, С.А. Вищипанов [и др.] // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2014. – № 1. – С. 27–32.

5. Смолук Л.Т., Проценко Ю.Л. Механические свойства пассивного миокарда: эксперимент и математическая модель // Биофизика. – 2010. м. Т. 55, № 5. – С. 905–909.

6. Челнокова Н.О., Голядкина А.А., Щучкина О.А. Клинико-морфологические основы моделирования гемодинамики в системе венечных артерий с учетом их взаимодействия с миокардом (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 762–768.

7. Meyer G.A., McCulloch A.D., Lieber R.L. A nonlinear model of passive muscle viscosity // J. Biomech. Eng. – 2011. – Vol. 133, № 9. – P. 1007–1011.

References

1. Belov Ju. V. Varaksin V.A. Grudnaja i serdechno-sosudistaja hirurgija, 2000. no. 3. pp. 68–72.

2. Efimov A.A., Kurzin L.M., Burov V.V., Petrosjan K.A. Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehnicheckie nauki, 2013. vol. 18. no. 1. pp. 350–352.

3. Goljadkina A.A., Kirillova I.V., Shhuchkina O.A., Masljakova G.N., Ostrovskij N.V., Chelnokova N.O. Rossijskij zhurnal biomehaniki, 2011. vol. 15, no. 4 (54). pp. 33–46.

4. Bokerija L.A., Alshibaja M.M., Vishhipanov S.A., Vishhipanov A.S., Sokolskaja N.O., Amirbekov M.M., Zhali-

lov A.K. Grudnaja i serdechno-sosudistaja hirurgija, 2014. no 1. pp. 27–32.

5. Smoljuk L.T., Procenko Ju.L. Biofizika, 2010. vol. 55, no. 5. pp. 905–909.

6. Chelnokova N.O., Goljadkina A.A., Shhuchkina O.A. Saratovskij nauchno-medicinskij zhurnal, 2011. vol. 7, no. 4. pp. 762–768.

7. Meyer G.A., McCulloch A.D., Lieber R.L. J. Biomech. Eng, 2011. vol. 133, no. 9. pp. 1007–1011.

Рецензенты:

Калмин О.В., д.м.н., профессор, заведующий кафедрой анатомии человека, ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет» Минобрнауки России, г. Пенза;

Баландина И.А., д.м.н., профессор, заведующая кафедрой нормальной, топографической и клинической анатомии, оперативной хирургии, ГБОУ ВПО «Пермский государственный медицинский университет им. акад. Е.А. Вагнера» Минздрава России, г. Пермь.