

СОЧЕТАННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕВОЙ ВЕНЕЧНОЙ АРТЕРИИ ВЗРОСЛЫХ МУЖЧИН

Островский Н.В.¹, Челнокова Н.О.¹, Голядкина А.А.², Мурылев В.В.³, Семенова Ю.И.¹

¹ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России», Саратов, Россия (410012, Саратов, ГСП ул. Большая Казачья, 112); e-mail: ostrovsky.colia@yandex.ru

²ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», Саратов, Россия (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83);

³ГБОУ ВПО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России» Москва, Россия (119991, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 2 (4));

В эксперименте проведено исследование упруго-деформативных свойств левой венечной артерии и ее ветвей у трупов мужчин в возрасте 31–70 лет. Проводили препарирование сосудов, ангиометрию, одноосное растяжение образцов артерий (n=160) на разрывной машине с последующим статистическим анализом полученных результатов. Изучали биомеханические параметры: предел прочности, относительное и абсолютное удлинение, коэффициент упругости. Установлено, что ствол левой венечной артерии и начальный отдел передней межжелудочковой ветви прочнее и эластичнее начальных отделов огибающей и диагональной ветвей левой венечной артерии. С возрастом жесткость стенок артерии и ее ветвей возрастает, статистически значимое увеличение отмечено после 40 лет. Однако прочность и эластичность стенки достоверно снижаются после 50 лет. Разница средних значений жесткости стенки между 1-й и 4-й возрастными группами составила в среднем: для ствола левой венечной артерии – 19 раз, для передней межжелудочковой и огибающей ветвей – 14 раз, диагональной – 11 раз. В результате проведенного исследования выявлена сегментарная и возрастная изменчивость биомеханических параметров левой венечной артерии взрослых мужчин.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, левая венечная артерия, морфология, механические свойства, эксперимент

THE COMBINED VARIABILITY OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF THE ADULT MEN LEFT CORONARY ARTERY

Ostrovskiy N.V.¹, Chelnokova N.O.¹, Golyadkina A.A.¹, Murylev V.V.³, Semenova Y.I.¹

¹Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Saratov, Russia (410012, Saratov, street B. Kazachya, 112; e-mail: ostrovsky.colia@yandex.ru

²Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia (410012, Saratov, street Astrakhanskaya, 83);

First Moscow State Medical University n.a. I.M. Sechenov, Moscow, Russia (119991, Moscow, street B. Pirogovskaya, 2 (4)).

The elastic-deformation properties of the left coronary artery and its branches of men aged 31-70 years were investigated. Preparation of the vessels, angiometriya, uniaxial tensile experiments of the arteries specimens (n=160) and a statistical analysis of the results were conducted. We studied the following biomechanical parameters: tensile strength, relative and absolute elongation, modulus of elasticity. It was found that the left coronary artery and the initial division of the anterior interventricular branch were stronger and more elastic than initial parts and diagonal branches of the left coronary artery. The rigidity of the walls increases with age. Statistically significant increase was observed after 40 years. However the strength and elasticity of the wall was significantly reduced after 50 years. Difference between the mean values of the wall stiffness between the 1st and 4th age groups were the following: for the left main coronary artery - 19 times, for the left anterior descending and circumflex branch - 14 times, the diagonal - 11 times. The study revealed segmental and age variability of the biomechanical parameters of the adult men left coronary artery.

Keywords: coronary heart disease, left coronary artery, morphology, mechanical properties, experiment

Ишемическая болезнь сердца в течение многих десятилетий занимает лидирующее положение в структуре заболеваемости и смертности как в России, так и в странах Европы. К тому же отмечено значительное «омоложение» данного заболевания, причем более характерное для лиц мужского пола. Атеросклероз левой венечной артерии признан одним

из главных факторов развития острой и хронической ишемии левого желудочка и межжелудочковой перегородки [7, 9].

Внедрение современных высокотехнологичных методов диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний, увеличение объема хирургической помощи, оказываемой данной категории больных, безусловно, дают положительный эффект. Однако, как и при развитии патологии, так и после проведения реконструктивно-восстановительных операций на артериях изменяются не только их ангиоархитектоника, но и биомеханические свойства. Значительное влияние на формирование местной гемодинамики, помимо ангиоархитектоники, оказывают упруго-деформативные свойства сосудистой стенки [3, 5, 10].

Представленные в доступной литературе экспериментальные данные по одноосному растяжению венечных артерий в мировой литературе представлены крайне скудно, наблюдается значительный разброс полученных данных, что объясняется различиями примененных методик и аппаратуры. При этом большинство исследований проведено на артериях животных. Таким образом, изучение биомеханических свойств сосудистой стенки венечных артерий человека в норме и при патологических состояниях имеет большое значение как для морфологии, так и для практической медицины.

Цель исследования

Экспериментально изучить упруго-деформативные и прочностные свойства левой венечной артерии у мужчин в возрасте 31–70 лет.

Материал и методы

Исследование упруго-деформативных и прочностных свойств левой венечной артерии было выполнено в отделе компьютерного моделирования в биомедицине и материаловедении Образовательно-научного института наноструктур и биосистем СГУ им. Н.Г. Чернышевского (начальник отдела – к.ф.-м. наук, доцент А.А. Голядкина). Материалом для исследования послужили 160 образцов левых венечных артерий 40 сердец, которые были изъяты при аутопсии 40 трупов мужчин в возрасте 31–70 лет в ГУЗ «БСМЭ СО» с разрешения Комитета по этике. Для выявления возрастной изменчивости материал исследования был распределен на возрастные группы: 1-я – 31–40 лет, 2-я – 41–50 лет, 3-я – 51–60 лет, 4-я – 61–70 лет. Исследовали механические свойства четырех сегментов левой венечной артерии (ЛВА): I – отрезок артерии от устья до места ее деления (ствол ЛВА); II – первые 4 см передней межжелудочковой ветви; III – первые 4 см огибающей ветви; IV – первые 4 см диагональной ветви левой венечной артерии. Эксперимент по изучению деформационно-прочностных свойств нативных образцов артерий проводили на настольной одноколонной испытательной машине Instron 5944 (зарегистрирована в Государственном

Реестре Российской Федерации под номером 43602-10) в жидкой среде BioBath (при комнатной температуре в 0,9%-ном водном растворе хлорида натрия) с нагрузочной ячейкой в 500 Н (рис. 1). Использовался тензометрический датчик с допустимой нагрузкой 500 Н с погрешностью измерения 0,4% от измеряемой величины в диапазоне от 500 Н до 5 Н и 0,5% от измеряемой величины в диапазоне от 5 Н до 1 Н.



Рис. 1. Разрывная установка Instron 5944 с BioBath

Исследование проводили в течение первых суток после наступления смерти. До начала экспериментов образцы сохранялись в физиологическом растворе при температуре $20 \pm 1^\circ \text{C}$. Образцы вырезались из сосуда в двух направлениях – продольном и окружном. Методика определения биомеханических свойств материала состояла в помещении между зажимами испытательной машины противоположных концов образца. Оптически определяли геометрию образца (длину, ширину, толщину или радиус) и задавали скорость перемещения траверсы.

Эксперимент заключался в следующем: при запуске машины верхний зажим на траверсе перемещается с установленной скоростью, тем самым растягивается исследуемый образец. Последний деформируется, и при этом в нем возникает сопротивление (усилие). В процессе растяжения образца фиксируются значения приложенной силы (Н) для возникновения деформации и значения перемещений образца (мм) в направлении приложения силы. Вся информация об удлинении образца, скорости перемещения траверсы и испытанного образцом сопротивления во время проведения эксперимента поступает в автоматизированный компьютерный вычислительный комплекс. При разрушении исследуемого материала испытание заканчивали. Изучали следующие полученные биомеханические параметры: значения напряжения (МПа) – предела прочности,

приходящееся на 1 мм² поперечного сечения образца исследуемой артерии при действии на него разрывной нагрузки; относительное удлинение (%) – отношение максимального удлинения образца до разрыва к его первоначальной длине; коэффициент упругости (МПа) – отношение значения напряжения к величине относительной деформации, т.е. способность сопротивления материала к растягивающей деформации.

Результаты исследования и их обсуждение

Эксперимент по растяжению образца артерии проводили с приложением деформации до его разрыва, таким способом получали значения абсолютной деформации образца. Однако в организме человека подобных нагрузок артерии не испытывают. С целью получения данных об относительном удлинении в пределах действия физиологических нагрузок (20–300 мм рт. ст.) исследовали по оригинальной методике левые венечные артерии на 10 нативных сердцах, в результате получили диапазон максимального физиологического относительного удлинения сегментов левой венечной артерии, который составил не более 10% в продольном направлении и 5% – в поперечном.

В ходе проведения статистического анализа о зависимости сила/удлинение и изменение площади поперечного сечения образцов получены средние зависимости «относительное удлинение – напряжение» для левой венечной артерии с учетом сегментарного деления и возраста.

Установлено, что стенки артерии I сегмента обладают большей эластичностью, чем стенки II, III и IV сегментов в среднем на 15% ($p < 0,05$). Для стенок I и II сегментов левой венечной артерии характерно скачкообразное увеличение жесткости с возрастом. Так, от 1-й ко 2-й возрастной группе жесткость артериальной стенки увеличивается в среднем от $0,01 \pm 0,0015$ МПа до $0,15 \pm 0,005$ и $0,10 \pm 0,003$ МПа соответственно. В 3-й возрастной группе данный параметр уменьшается в I сегменте до $0,10 \pm 0,002$ МПа, во II – до $0,08 \pm 0,001$ МПа, и к 4-й возрастной группе параметр вновь возрастает до $0,19 \pm 0,005$ и $0,14 \pm 0,004$ МПа соответственно. Для III и IV сегмента ЛВА выявлено, что жесткость стенки плавно увеличивается от 1-й к 4-й возрастной группе от $0,01 \pm 0,0011$ до $0,14 \pm 0,002$ и $0,11 \pm 0,0013$ МПа соответственно (рис. 2).

Разница средних значений жесткости стенки ЛВА между 1-й и 4-й возрастными группами составила: для I сегмента – 19 раз, для II и III – 14 раз, IV – 11 раз. Значения максимального относительного удлинения различных сегментов ЛВА в среднем составляют: I – $35,0 \pm 1,0\%$, II – $20,0 \pm 0,7\%$, III – $30,0 \pm 0,9\%$ и IV – $24,0 \pm 0,8\%$.

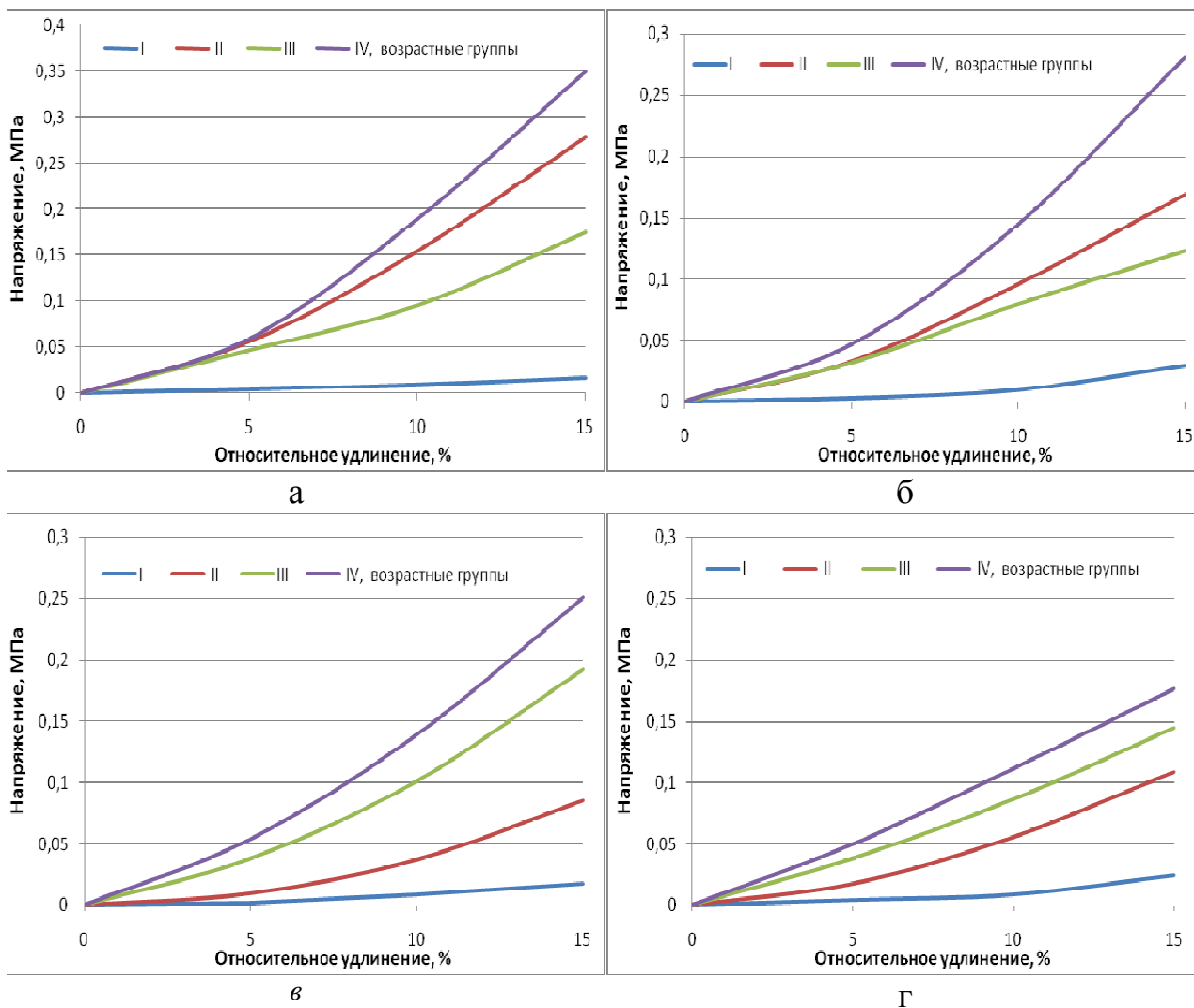


Рис. 2. Зависимость относительных удлинений от напряжений для I (а), II (б), III (в) и IV (г) сегментов левой венечной артерии в продольном направлении

Модуль Юнга (коэффициент упругости), характеризующий жесткость стенок сегментов левой венечной артерии, определяли как отношение напряжения к относительному удлинению в рамках физиологических нагрузок. Из представленной гистограммы (рис. 3) видно, что у лиц в возрасте 31–40 лет отмечена большая эластичность стенки артерий, чем в других возрастных группах, модуль Юнга в данной возрастной группе составляет в среднем $0,25 \pm 0,03$ МПа. Увеличение жесткости стенки в возрасте 41–70 лет в 3–5 раз, по-видимому, обусловлено поражением левой венечной артерии атеросклерозом.

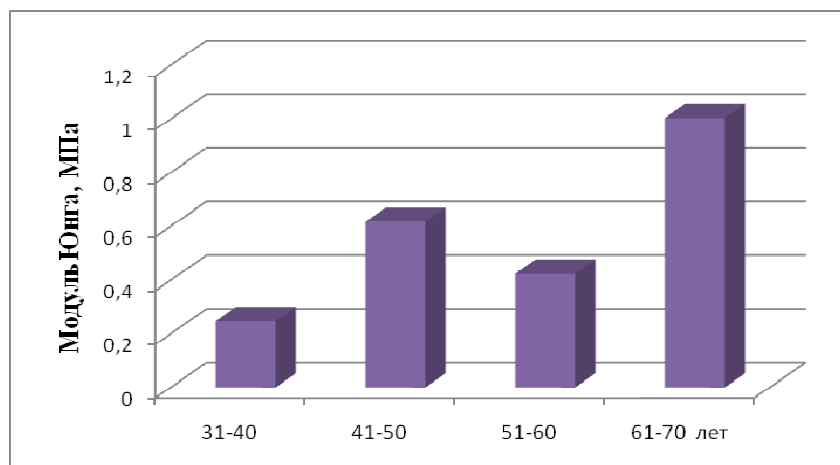


Рис. 3. Возрастная изменчивость модуля Юнга для левой венечной артерии

При сравнении средних значений модуля Юнга, полученных для сегментов ЛВА, отмечено, что больше жесткостью, чем эластичностью, обладают II и III сегменты ЛВА, а большей эластичностью – I и IV сегменты ЛВА (рис. 4).

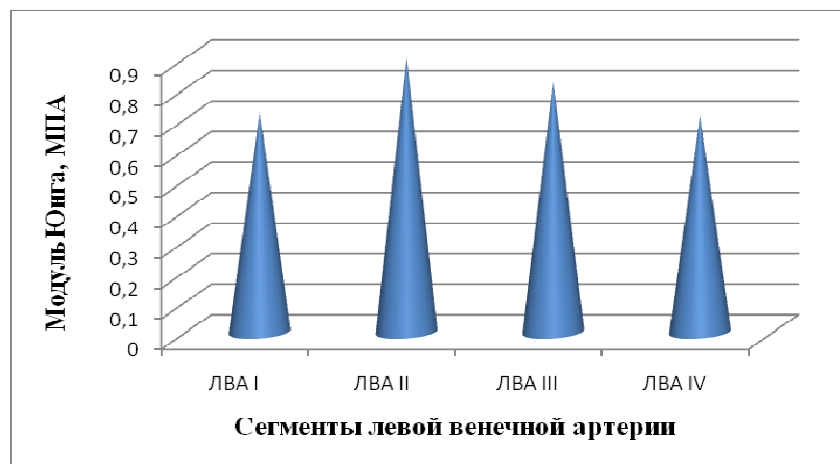


Рис. 4. Значения модуля Юнга для сегментов левой венечной артерии

Заключение

Таким образом, ствол ЛВА и начальный отдел передней межжелудочковой ветви прочнее и эластичнее начальных отделов огибающей и диагональной ветвей левой венечной артерии. С возрастом жесткость стенок 4 сегментов ЛВА возрастает, статистически значимое увеличение отмечено после 40 лет, что согласуется с представленными результатами в работах по изучению механических свойств артерий [1, 2, 4, 5, 6, 8, 10]. Однако прочность и эластичность стенки ЛВА достоверно снижаются после 50 лет. На наш взгляд, это обусловлено развитием более поздних стадий коронароатеросклероза, что и приводит к уменьшению способности артериальной стенки к сопротивлению приложенной деформации.

В настоящем исследовании разработана методика по определению биомеханических свойств ЛВА на современной разрывной машине. Получены новые данные по биомеханическим параметрам левой венечной артерии, так как эксперимент впервые

проводился в условиях, максимально приближенных к физиологическим, т.е. в водной среде. В ходе работы выявлена сегментарная и возрастная изменчивость упруго-деформативных и прочностных свойств левой венечной артерии мужчин в возрасте 31–70 лет. Полученные данные могут быть использованы при биомеханическом моделировании венечного сосудистого русла, а также при проведении стентирования, ангиопластики и аортокоронарного шунтирования ЛВА с целью снижения риска развития интра- и послеоперационных осложнений.

Список литературы

1. Ефимов А.А. Морфологический анализ возрастных изменений артериальной стенки // Российский медико-биологический вестник им. академика И.П. Павлова. 2011. № 3. С. 8–12.
2. Количественная оценка возрастных изменений морфологических показателей крупных артерий / А.А. Ефимов, Л.М. Курзин, В.В. Буров, К.А. Петросян // 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. С. 33–46.
4. Круглый М.М., Ярцев Ю.А. Аорта (морфофизиологические и клинко-экспериментальные исследования). Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1981. 128 с.
5. Морфобиомеханические закономерности строения средней мозговой артерии взрослых людей / В.Н. Николенко, О.А. Фомкина, Ю.А. Неклюдов, Ю.Д. Алексеев // Саратовский научно-медицинский журнал. 2012. Т. 8. № 1. С. 9–14.
6. Пурия Б.А., Касьянов В.А. Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига, 1980. 260 с.
7. Результаты хирургического лечения ишемической болезни сердца у больных молодого (до 45 лет) возраста / Л.А. Бокерия, М.М. Алшибая, С.А. Вищипанов, А.С. Вищипанов, Н.О. Сокольская, М.М. Амирбеков, А.К. Жалилов // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2014. № 1. С. 27–32.
8. Челнокова Н.О. Патоморфологическое обоснование выбора хирургической тактики операций в бассейне правой венечной артерии на основе прогнозирования и математического моделирования нарушений гемодинамики: дис. ...канд. мед. наук. Саратов. 2014. 236 с.

9. Челнокова Н.О., Маслякова Г.Н., Островский Н.В. Патоморфологические изменения стенки венечных артерий человека в аспекте построения адекватной компьютерной модели гемодинамики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2012. № 4 (24). С. 56–64.
10. Finite element model of the patched human carotid / A.V. Kamenskiy, A.S. Desyatova, Y.E. Salkovskiy, Y.A. Dzenis, I.I. Pipinos, T.G. Lynch, L.Yu. Kossovich, I.V. Kirillova, L.A. Bockeria, K.M. Morozov, V.O. Polyayev // Vascular and Endovascular Surgery. 2009. Т. 43. № 6. С. 533–541.

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.