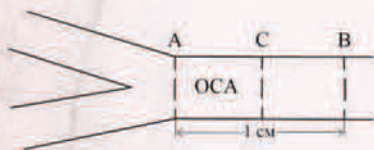
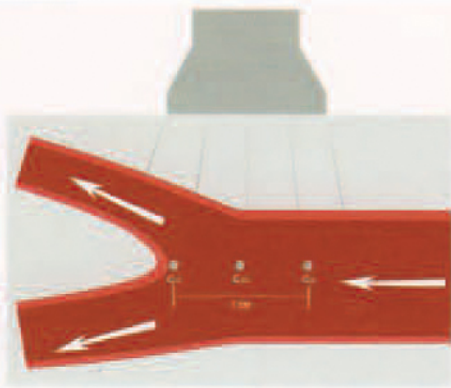




Е.И.Гайшун, И.В.Гайшун, А.М.Пристром

# Демпфирующая функция артерий и неинвазивные методы ее оценки



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Отделение медицинских наук  
Отделение физики, математики и информатики

Е.И.Гайшун, И.В.Гайшун, А.М.Пристром

# Демпфирующая функция артерий и неинвазивные методы ее оценки

Минск  
«Беларуская навука»  
2016

УДК 616.13-008.21

**Гайшун, Е. И.** Демпфирующая функция артерий и неинвазивные методы ее оценки / Е. И. Гайшун, И. В. Гайшун, А. М. Пристром. – Минск : Беларуская навука, 2016. – 92 с. – ISBN 978-985-08-1947-5.

Демпфирующая функция артерий, определяемая их растяжимостью (жесткостью) и эластичностью (упругостью) материала сосудистой стенки, обеспечивает амортизацию (сглаживание) периодических систолических волн кровотока. В монографии излагаются основные факторы, влияющие на демпфирующую функцию, обсуждается клиническая значимость жесткости артерий, описываются основные неинвазивные методы оценки системной и регионарной жесткости. Показано, что методы (показатели) оценки локальной жесткости (т. е. жесткости сегментов отдельных артерий) могут быть получены на основе известного в теории упругости закона Гука; это позволило выяснить причину зависимости показателей от артериального давления, разработать новые показатели, слабо зависящие от него. Установлены количественные зависимости между жесткостью артерий и частотой сердечных сокращений, что привело к показателям, оценивающим артериальную жесткость «в чистом виде» (вне связи с указанной частотой). Описаны особенности определения растяжимости сосудов со стеногическими поражениями и нарушением геометрии. Работоспособность предложенных показателей продемонстрирована при исследовании демпфирующей функции общей сонной артерии как у здоровых людей, так и у пациентов с хронической ИБС и артериальной гипертензией.

Монография предназначена для научных работников, терапевтов и кардиологов, а также для аспирантов и студентов медицинских вузов. Табл. 11. Ил. 13. Библиогр.: 155 назв.

Рецензенты:

доктор медицинских наук, профессор А. Г. Булгак,  
доктор медицинских наук, профессор Н. П. Митьковская,  
доктор физико-математических наук, профессор А. И. Астровский

**ISBN 978-985-08-1947-5**

© Гайшун Е. И., Гайшун И. В.,  
Пристром А. М., 2016

© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2016

## ВВЕДЕНИЕ

С середины 1950-х гг. коронарная болезнь сердца и смертность от нее приняли угрожающий характер в экономически развитых странах. Для выявления причин высокой смертности от ССЗ в США был организован грандиозный проект, известный теперь как Фремингемское исследование, направленный на выяснение причинных факторов, ведущих к коронарной смертности. Это исследование привело к созданию концепции о факторах риска в происхождении коронарного и церебрального атеросклероза и смертности от них. К числу факторов риска развития ССЗ были отнесены артериальная гипертензия, дислипидемия, курение, ожирение, сахарный диабет и др.

Смертность от ССЗ в странах бывшего СССР остается достаточно высокой. В Республике Беларусь за период с 1990 по 2005 г. показатель смертности от ССЗ на 100 тыс. человек увеличивался ежегодно в среднем на 3% (от 547,0 случаев в 1990 г. до 810,9 случаев в 2005 г. [42]). Начиная с 2006 г. появились тенденции к стабилизации этого показателя. Однако ССЗ по-прежнему остаются одной из главных причин преждевременной смертности.

Наряду с указанными выше факторами важное значение в увеличении риска развития неблагоприятных сердечно-сосудистых событий имеет повышенная жесткость крупных артерий, являющаяся независимым предиктором развития ССЗ и сердечно-сосудистой смертности [1, 19, 48, 83, 92, 106, 117, 119, 121, 132, 139, 155]. Кроме того, повышенная жесткость артерий обладает высокой прогностической значимостью на доклинических стадиях развития ССЗ [75, 117, 145].

В рекомендациях Европейского общества по артериальной гипертензии и Европейского общества кардиологов признано, что сосуды являются одним из главных органов-мишеней при артериальной гипертензии, а параметры их жесткости включены в число тестируемых при поиске субклинического поражения [131].

В зависимости от изучаемого участка артериального русла различают системную (интегральную), регионарную и локальную жесткость. Системная и регионарная жесткость характеризуют артериальную систему в целом и отдельные ее участки. Для характеристики жесткости конкретных артерий и их сегментов используется понятие локальной жесткости.

Предлагаемая работа посвящена в основном неинвазивным методам оценки локальной жесткости и включает следующие вопросы: физические основы методов, условия их применимости, зависимость от некоторых физиологических параметров (АД и ЧСС), использование в клинической практике. Для полноты излагаются некоторые способы определения системной и регионарной жесткости.

Методы определения артериальной жесткости, рассматриваемые в данной работе, основаны на механических свойствах сосудистой стенки и на некоторых гемодинамических фактах. Нервные и другие регулирующие воздействия не принимаются во внимание. Здесь мы исходим из того, что в конечном счете такие воздействия изменяют именно механические характеристики сердечно-сосудистой системы, приспособлявая их функционирование к потребностям организма. Поэтому изучение механики сердечно-сосудистой системы мы считаем предпосылкой для понимания процессов, происходящих в этой системе, и для управления ими.

Языком, на котором формулируются механические законы, является математика. Без ее использования невозможно сколь-нибудь строго описать обсуждаемые методы оценки артериальной жесткости. Поэтому в тексте много

математических расчетов и формул, которые, хотя и достаточно просты, могут представлять определенные трудности для неподготовленного читателя. В этом случае рекомендуется некоторые места, связанные с обоснованием методов, пропускать и обращаться непосредственно к конечным выводам.

При разработке и анализе методов оценки локальной жесткости артерий авторы неоднократно пользовались советами и консультациями члена-корреспондента НАН Беларуси Н. А. Манака. Ряд новых индексов растяжимости и показателей эластичности получен при его непосредственном участии. Выражаем ему глубокую благодарность за поддержку данной работы.

Авторы благодарны также рецензентам доктору медицинских наук, профессору А. Г. Булгаку, доктору медицинских наук, профессору Н. П. Митьковской, доктору физико-математических наук, профессору А. И. Астровскому, доброжелательная критика и замечания которых способствовали улучшению содержания книги.

## **КЛИНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ АРТЕРИАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ**

В главе приводятся краткие сведения о строении артериальной стенки, обсуждается значимость демпфирующей функции артерий, являющейся следствием способности их увеличивать поперечное сечение под действием давления, обращается внимание на феномен отраженной волны. Дается обзор методов оценки системной и регионарной артериальной жесткости, описываются факторы, влияющие на артериальную жесткость, приводятся данные о связи жесткости артерий с различными ССЗ.

### **1.1. Краткие сведения о строении и функциях артерий**

Стенки всех артерий состоят из трех оболочек: внутренней (интимы), средней (медии) и наружной (адвентиции). Интиму образуют два слоя: эндотелий – одиночный слой клеток, выстилающий всю поверхность сосуда, и тонкий субэндотелиальный слой, состоящий из соединительной ткани и эластических волокон. Субэндотелиальный слой образован переплетенными эластиновыми и коллагеновыми волокнами, лимфоидными и фибробластическими клетками. Эндотелий – наиболее функционально значимый элемент интимы – представляет собой плоский эпителий, клетки которого (эндотелиоциты) имеют полигональную форму, удлинненную по ходу сосуда, и связаны между собой плотными и щелевыми соединениями. Эндотелиоциты выполняют ряд важных регуляторных функций: осуществле-

ние транспорта веществ между кровью и тканями; участие в процессе свертывания крови; участие в регуляции сосудистого тонуса и обмене vasoактивных веществ и др.

Медиа включает слои циркулярно расположенных гладкомышечных клеток и сеть коллагеновых и эластических волокон. Эластические волокна образуют относительно густую сеть, они легко растягиваются в несколько раз. Эти волокна создают напряжение, противодействующее кровяному давлению, растягивающему сосуд. Коллагеновые волокна образуют сеть, оказывающую значительно большее сопротивление растяжению сосуда, чем эластические волокна; они противодействуют давлению только когда сосуд растягивается до определенной степени.

Адвентиция образована наружной эластичной мембраной и рыхлой волокнистой тканью, содержащей нервы и сосуды, питающие стенку (в сосудах диаметром больше 1 мм).

Артерии подразделяются на три типа: эластические, мышечно-эластические и мышечные. К эластическим артериям относятся сосуды крупного калибра, такие как аорта и легочная артерия. Средняя оболочка таких артерий состоит из большого количества эластических окончатых мембран, связанных друг с другом эластическими волокнами и образующих вместе с эластическими элементами других оболочек единый эластический каркас. Между мембранами находятся гладкомышечные клетки. Наличие большого количества эластических волокон и мембран позволяет этим сосудам растягиваться в период систолы и возвращаться в исходное состояние во время диастолы.

К артериям мышечно-эластического типа относятся, в частности, сонная и подключичная артерии. Строение внутренней оболочки у них такое же, как и у артерий эластического типа, однако в средней оболочке увеличивается количество гладкомышечных клеток, между которыми и эластическими элементами находится небольшое количество фибробластов (клеток, синтезирующих коллаген) и коллагеновых волокон.



К артериям мышечного типа относятся сосуды среднего и мелкого калибра. В их стенках имеется относительно большое количество гладкомышечных клеток.

Артериальная система обладает двумя важнейшими взаимосвязанными функциями: проводящей и демпфирующей. Проводящая функция заключается в доставке необходимого объема крови к периферическим тканям, а демпфирующая функция обеспечивает амортизацию (сглаживание) периодических систолических волн кровотока. Механизм сглаживания основан на способности крупных артерий увеличивать поперечное сечение при повышении давления во время систолы, а затем возвращаться в первоначальное состояние. Вследствие этого при поступлении в сосуд некоторого количества крови кинетическая энергия ее движения преобразуется в потенциальную энергию деформации стенки сосуда, при этом часть объема крови заполняет растянутые сегменты сосуда. Когда давление снижается, стенка сосуда возвращается в исходное положение, выталкивая из сосуда кровь, а потенциальная энергия вновь превращается в кинетическую и кровь продвигается по сосуду. Это приводит к следующим важным факторам: во-первых, обеспечивается непрерывность кровотока, во-вторых, существенно уменьшается мощность сердечного сокращения. Расчеты, проведенные в монографии [65], показывают, что в предельных случаях совершенно нерастяжимого и чрезвычайно эластичного сосудов мощность сердечного сокращения уменьшается до трех раз.

Почти во всех отделах кровеносной системы течение крови является *ламинарным* (слоистым): кровь движется цилиндрическими слоями параллельно оси сосуда. Слои, непосредственно прилегающий к стенке сосуда (пограничный слой), остается неподвижным, по этому слою скользит второй слой, по нему третий и т. д. В результате образуется параболический профиль скоростей с максимумом в центре сосуда.

При определенных условиях ламинарное течение переходит в *турбулентное*. Для турбулентного движения харак-

## СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений .....	3
Единицы измерения и статистические методы.....	4
Введение .....	6
<b>Глава 1. Клиническое значение и способы оценки артериальной жесткости</b> .....	9
1.1. Краткие сведения о строении и функциях артерий .....	9
1.2. Пульсовая волна.....	12
1.3. Системная, регионарная и локальная артериальная жесткость .....	14
1.4. Факторы, влияющие на жесткость артерий .....	20
1.5. Клиническая значимость артериальной жесткости .....	23
<b>Глава 2. Методы оценки локальной жесткости и упругости артерий</b> .....	25
2.1. Растяжимость и эластичность артерий.....	25
2.2. Физические основы показателей демпфирующих свойств артерий .....	27
2.3. Некоторые индексы растяжимости и показатели эластичности.....	31
2.4. Локальная скорость распространения пульсовой волны... ..	36
2.5. Какое артериальное давление использовать? .....	38
2.6. Проблема зависимости от артериального давления .....	41
2.7. Классификация показателей демпфирующих свойств .....	45
2.8. Референтные значения индексов растяжимости (жесткости) и показателей эластичности (упругости) для общей сонной артерии.....	46
2.9. Особенности оценки демпфирующих свойств артерий со стенотическими поражениями или нарушениями геометрии.....	48
2.10. Влияние частоты сердечных сокращений на демпфирующие свойства.....	51
2.11. Использование результатов суточного мониторинга частоты сердечных сокращений.....	55
	91

<b>Глава 3. Исследование демпфирующих свойств общей сонной артерии</b> .....	58
3.1. Оценка доли практически здоровых людей с нарушением демпфирующих свойств общей сонной артерии .....	58
3.2. Связь растяжимости, эластичности и толщины комплекса интима-медиа общей сонной артерии с индексом массы миокарда левого желудочка у пациентов с хронической ИБС...	62
3.3. Сравнительный анализ влияния $\beta$ -адреноблокаторов бисопролола и небиволола на демпфирующие свойства общей сонной артерии у пациентов с хронической ИБС, перенесших интракоронарное стентирование .....	65
3.4. Оценка вклада частоты сердечных сокращений в снижение жесткости общей сонной артерии у мужчин с эссенциальной гипертензией, принимавших небиволол .....	69
3.5. Еще раз о различии растяжимости и эластичности .....	73
Заключение .....	76
Литература .....	80

Научное издание

**Гайшун** Елена Ивановна,  
**Гайшун** Иван Васильевич,  
**Пристром** Андрей Марьянович

**ДЕМПФИРУЮЩАЯ ФУНКЦИЯ АРТЕРИЙ  
И НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ ЕЕ ОЦЕНКИ**

Редактор *О. Н. Пручковская*  
Художественный редактор *Д. А. Комлев*  
Технический редактор *О. А. Толстая*  
Компьютерная верстка *О. Н. Карпович*

Подписано в печать 15.01.2016. Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 4,94. Уч.-изд. л. 3,5.  
Тираж 120 экз. Заказ 5.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Республиканское унитарное предприятие  
«Издательский дом «Беларуская навука».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013.  
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.