

УДК 612.13.601.1

В.Д. Киселев, А.А. Кондыков, Ю.Г. Поморова,
А.В. Требухов, О.В. Филатова

**Анализ биомеханических свойств артериальной стенки
в зависимости от давления и вектора потока**

В настоящее время детально изучена зависимость биомеханических свойств артериальной стенки от артериального давления, от скорости кровотока при действии нейрогуморальных факторов. Однако в реальной гемодинамике имеет место сочетание данных факторов. Проблема их взаимодействия остается неизученной. Целью настоящего исследования являются изучение биомеханических свойств артериальной сосудистой стенки при сочетанном действии давления и потока крови, изучение биомеханических параметров артериальной сосудистой стенки на экспериментальных животных и трехкомпонентной модели сосудистой стенки в условиях вариаций внутрисосудистого давления, величины и вектора скорости кровотока.

Материалы и методы исследования. Исследование биомеханических свойств стенки артерий проводилось по методике, изложенной в работе [1]. Ретроградный поток создавался системой кранов, осуществляющих реверсию потока в кровеносном сосуде. Зависимый от диаметра модуль упругости Юнга (E) для артериальной стенки рассчитывался по Hudetz [2]. Расчет скорости распространения пульсовой волны произведен по формуле [3].

Результаты и их обсуждение. Зависимость диаметра артерий от давления по данным исследований в нашей лаборатории [4] представлена на рисунке 1.

Из рисунка видно, что зависимость носит сложный нелинейный гистерезисный характер. Нижняя

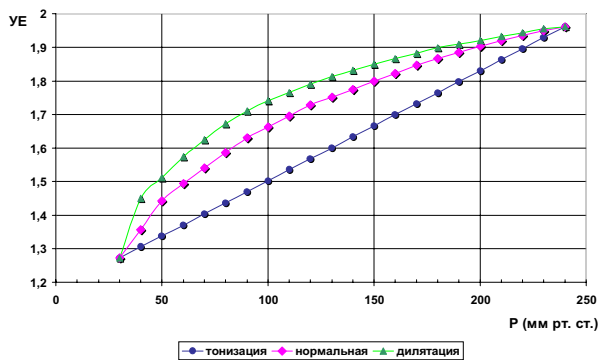


Рис. 1. Зависимость диаметра изолированной артерии от величины кровяного давления при различных условиях эксперимента

кривая получается при нагрузке сосуда давлением в условиях его максимальной тонизации. Средняя кривая соответствует реакции нормального (физиологически адекватного) сосуда на нагрузку давлением. Верхняя кривая получается в режиме разгрузки давлением (спада давления) в условиях максимальной дилатации (расслабления) сосуда потоком или обработки папаверином [4, с. 259].

Такого рода зависимость предопределяется особенностями биомеханических свойств сосудистой стенки. В основу анализа данных зависимостей заложена трехэлементная модель сосудистой стенки: эластин как упругий пассивный элемент, гладкомышечный активный элемент и жесткий коллагеновый каркасный элемент [5]. В предыдущих работах была показана реакция этих элементов [6] на нагрузку сосуда давлением. Начальная часть кривой (область низких давлений до 60 мм рт. ст.) отражает свойства эластинового элемента. При дальнейшем росте давления к регулированию диаметра сосуда подключается активный гладкомышечный элемент (диапазон давлений 60–160 мм рт. ст.), и лишь в области высоких давлений (свыше 160 мм рт. ст.) фактором, ограничивающим прирост диаметра со-

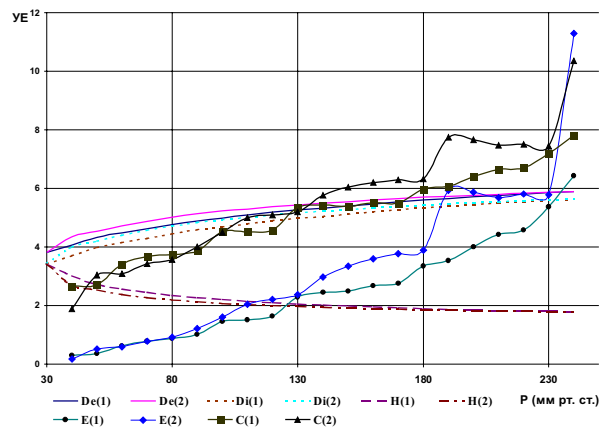


Рис. 2. Расчетные значения модуля упругости E и скорости распространения пульсовой волны в зависимости от значений артериального кровяного давления: De – наружный диаметр, Di – внутренний диаметр, H – толщина сосудистой стенки, E – модуль упругости Юнга, C – скорость распространения пульсовой волны; 1 – нагрузка давлением, 2 – разгрузка.

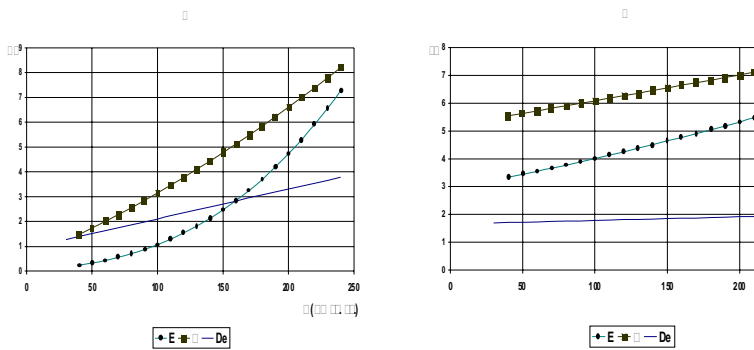


Рис. 3. Значения E и СРПВ для отдельных элементов сосудистой стенки: А – эластический сосуд, Б – мышечный сосуд, В – коллагеновый сосуд

суда, начинает выступать коллагеновый каркас.

Зависимость давление–диаметр дает возможность охарактеризовать сосудистую стенку с помощью модуля упругости Юнга, который является показателем жесткости сосудистой стенки. На рисунке 2 представлены результаты расчета этого показателя и сопутствующей ему скорости распространения пульсовой волны.

Виден рост модуля упругости на этапе нагружения артерии, четко выражена трехфазность увеличения, соответствующая подключению отдельных элементов сосудистой стенки. В соответствии с изменениями модуля упругости аналогичное поведение демонстрирует и СРПВ. Такое поведение характеристик биомеханических свойств сосудистой стенки является общепризнанным, однако в многочисленных наблюдениях на человеке не было получено достоверных зависимостей между СРПВ и артериальным давлением. К тому же в некоторых исследованиях были получены значения СРПВ,

снижающиеся с ростом давления [7], что не находит объяснения из расчетов.

В связи с этим определен интерес представляет рассмотрение случаев поведения модуля упругости E и СРПВ отдельно для каждого элемента сосудистой стенки. Для этого исходные данные для диаметра сосуда были представлены уравнением прямой с наклоном, характерным для каждого компонента сосудистой стенки (рис. 3).

Видно, что у разных сосудов несколько различается угол наклона кривых модуля упругости и СРПВ, однако по своим абсолютным значениям расхождения незначительны. Следовательно, на характере зависимости давление–диаметр не сказываются ни абсолютный просвет сосуда, ни преобладание какого-либо элемента мышечной стенки, и, соответственно, этими факторами нельзя объяснить как «аномальные» зависимости давление–СРПВ [7], так и декорреляцию этой зависимости [8]. Такое объяснение было бы получено, если

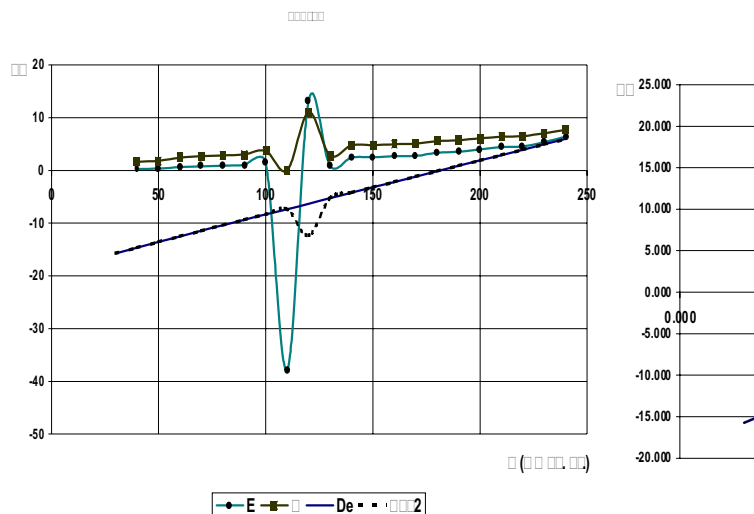


Рис. 4. Зависимость E и СРПВ от флуктуаций диаметра артерии

сделать небольшое и кратковременное (относительно всего периода изменения давления от 30 до 240 мм рт. ст.) уменьшение или увеличение значения диаметра, как показано на рисунке 4.

Пунктиром обозначен характер изменения диаметра при изменении его значения на 1,75%, без чего эти изменения на графике незаметны. Обращает внимание значительная реакция модуля упругости и СРПВ на столь небольшие изменения диаметра (что, по-видимому, и лежит в основе разнообразных взаимоотношений артериального давления и характеристик артериального пульса, наблюдаемых у человека). Такие эпизодические колебания тонуса гладкомышечного элемента и диаметра магистрального сосуда могут иметь место в эксперименте и на магистральных сосудах человека *in situ*, в результате автоматии гладких мышц, их активации при сосудистых рефlekсах, при активации симпатической нервной системы эмоциогенными стимулами, при эндотелий-зависимой поток-чувствительной релаксации [9].

Своеобразные функциональные последствия выявлены при эндотелий-зависимой релаксации артериальных сосудов обратным потоком крови. Установлено, что ретроградный кровоток лучше релаксирует центральные сосуды котла (обычный кровоток эффективней релаксирует периферические артериальные магистральные). Увеличение диаметра аорты и ее ветвей повышает их пульсовую емкость, что минимизирует величину обратного кровотока, обычно име-

ющего место в магистральных артериях [5].

Результат моделирования свойств артерии, соответствующий разрыхлению вещества стенки, дегенерации мышечного и коллагеновых слоев, представлен на рисунке 5.

Видно, что такая имитация возрастных изменений артерий дает существенное (в 4,3 раза) падение СРПВ в области низких и средних давлений и в 2,3 раза в области высоких. Такая возрастная динамика изменения свойств сосудистой стенки может объяснять факты снижения СРПВ в старшей возрастной группе.

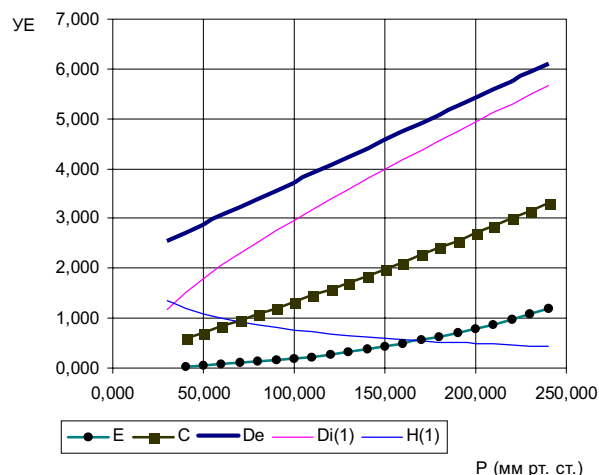


Рис. 5. Зависимость E и СРПВ при утолщении сосудистой стенки в 2 раза и дегенерации мышечных и коллагеновых волокон

Литература

1. Филатова О.В. Взаимодействие давления и потока в экзотемной регуляции диаметра артериальных сосудов: Автореф. дис... канд. биол. наук. Барнаул, 1993.
2. Hudetz A.G. Incremental elastic modulus for orthotropic incompressible arteries // *Biochem.* 1979. Vol. 12.
3. Пурина Б.А., Касьянов В.А. Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига, 1980.
4. Филатова О.В., Требухов А.В., Клименко И.Н. Статодинамические биомеханические свойства артериального русла в связи с сочетанной эндотелий-зависимой регуляцией давлением и потоком в различных возрастных группах в зависимости от пола, особенностей поведения животных // XVII съезд Всероссийского физиологического общества им. И.П. Павлова: Тез. докл. Ростов-на-Дону, 1998.
5. Фолков Б., Нил Э. Кровообращение /Пер. с англ. И.М. Вернч. М., 1976.
6. Филатова О.В. Реакция активных и пассивных

элементов стенки артериальных кровеносных сосудов в зависимости от давления и потока // *Актуальные вопросы возрастной, прикладной и экологической физиологии: Сб. ст.* Барнаул, 1992. С. 33-40.

7. Поморова Ю.Г., Кондыков А.А., Киселев В.Д. Вариации связи скорости распространения пульсовой волны и АД // *Известия АГУ.* Барнаул, 1999. Вып. 4. С. 153-157.

8. Маркман В.Г., Королева Е.Л. Анализ взаимосвязи СРПВ с измерениями АД у человека при функциональных нагрузках // *Физиология человека.* 1987. №2. С. 259-264.

9. Плешкова Н.В., Киселев В.Д. Вариабильность параметров дигитальной фотосфигмограммы у бодрствующего человека, в различные фазы сна и при вегетосудистых асимметриях // *Фундаментальные, прикладные и клинические проблемы физиологии* / Под ред. В.Д. Киселева. Барнаул, 1996.