

# ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРЯМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ В ОЦЕНКЕ ИНТРАОПЕРАЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ АНЕВРИЗМЫ АОРТЫ, ВОЗНИКШЕЙ НА ФОНЕ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ

DOI: 10.17691/stm2024.16.4.05

УДК 616.132–007.64:616.12–008.331.1:57.085

Поступила 14.01.2024 г.

© **В.Н. Николенко**, д.м.н., профессор, зав. кафедрой анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>; зав. кафедрой нормальной и топографической анатомии факультета фундаментальной медицины<sup>2</sup>;  
**Ю.В. Белов**, д.м.н., профессор, академик РАН, зав. кафедрой госпитальной хирургии<sup>1</sup>;  
**М.В. Оганесян**, к.м.н., доцент кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>; доцент кафедры нормальной и топографической анатомии факультета фундаментальной медицины<sup>2</sup>;  
**Ю.М. Ефремов**, к.б.н., зав. отделом современных биоматериалов Института регенеративной медицины<sup>1</sup>;  
**Н.А. Ризаева**, к.м.н., доцент кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>; доцент кафедры нормальной и топографической анатомии факультета фундаментальной медицины<sup>2</sup>;  
**А.Д. Вовкогон**, к.м.н., доцент кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>;  
**А.В. Саньков**, резидент студенческого научного кружка кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>;  
**Л.А. Гридин**, д.м.н., профессор, генеральный директор<sup>3</sup>;  
**П.С. Тимашев**, д.х.н., научный руководитель научно-технологического парка биомедицины<sup>1</sup>;  
**К.В. Булыгин**, к.м.н., доцент кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>; доцент кафедры нормальной и топографической анатомии факультета фундаментальной медицины<sup>2</sup>;  
**М.В. Санькова**, стажер-исследователь кафедры анатомии и гистологии человека<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский университет), ул. Трубецкая, 8/2, Москва, 119991;

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119234;

<sup>3</sup>Московский центр проблем здоровья при Правительстве Москвы, ул. Житная, 14, стр. 3, Москва, 119049

**Цель исследования** — изучить возможности применения в клинической практике методов прямых механических испытаний для оценки прочностных и упруго-деформативных характеристик интраоперационных образцов аневризмы дуги аорты, возникшей на фоне неконтролируемой артериальной гипертензии.

**Материалы и методы.** Экспериментальным материалом для исследования послужили резецированные части аневризмы аорты, полученные во время операции протезирования аневризмы у пациентки с неконтролируемой артериальной гипертензией. Применялись такие методы прямых механических испытаний, как инструментальное индентирование и метод одноосного растяжения.

**Результаты.** Показано, что методом прямого инструментального индентирования можно точно оценить и сравнить между собой жесткость всех трех слоев стенки аорты. В данном случае наибольшему атеросклеротическому повреждению была подвержена внутренняя оболочка интимы аорты. В области медиа наблюдался большой разброс значений данного показателя и расслоение материала. Метод одноосного растяжения позволяет получить точные параметры прочности сосудистой стенки, оценить жесткость, эластичность и деформативные способности интраоперационно взятой ткани аорты. Установлено, что стенка аневризмы по сравнению с нерасширенным участком аорты отличалась существенно меньшей прочностью как в продольном (в 4,25 раза), так и в поперечном (в 3,75 раза) направлениях, более низкой эластичностью и деформативной способностью.

**Заключение.** Продемонстрированы перспективы и возможности применения в клинической практике современных методов прямых механических испытаний, которые позволят получить более точные показатели прочностных и упруго-деформативных

Для контактов: Санькова Мария Вячеславовна, e-mail: cankov@yandex.ru

характеристик сосудов, уточнить патофизиологические механизмы развития сердечно-сосудистых осложнений и обосновать необходимость регулярного контроля жесткости сосудистой стенки.

**Ключевые слова:** неконтролируемая артериальная гипертензия; аневризма дуги аорты; методы прямых механических испытаний; прочностные и упруго-деформативные параметры аорты; жесткость сосудистой стенки; предиктор сердечно-сосудистых осложнений.

**Как цитировать:** Nikolenko V.N., Belov Y.V., Oganessian M.V., Efremov Y.M., Rizaeva N.A., Vovkogan A.D., Sankov A.V., Gridin L.A., Timashev P.S., Bulygin K.V., Sankova M.V. Potential of current direct mechanical testing methods in assessing intraoperative samples of aortic aneurysm caused by uncontrolled arterial hypertension. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2024; 16(4): 46, <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.4.05>

## English

## Potential of Current Direct Mechanical Testing Methods in Assessing Intraoperative Samples of Aortic Aneurysm Caused by Uncontrolled Arterial Hypertension

**V.N. Nikolenko**, MD, PhD, Professor, Head of the Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;  
Head of the Normal and Topographic Anatomy Department, Fundamental Medicine Faculty<sup>2</sup>;

**Y.V. Belov**, MD, PhD, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences,  
Head of the Hospital Surgery Department<sup>1</sup>;

**M.V. Oganessian**, PhD, Associate Professor, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;  
Associate Professor, Normal and Topographic Anatomy Department, Fundamental Medicine Faculty<sup>2</sup>;

**Y.M. Efremov**, PhD, Head of the Department of Modern Biomaterials, Institute for Regenerative Medicine<sup>1</sup>;

**N.A. Rizaeva**, PhD, Associate Professor, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;  
Associate Professor, Normal and Topographic Anatomy Department, Fundamental Medicine Faculty<sup>2</sup>;

**A.D. Vovkogan**, PhD, Associate Professor, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;

**A.V. Sankov**, Resident of the Student Scientific Circle, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;

**L.A. Gridin**, MD, PhD, Professor, General Director<sup>3</sup>;

**P.S. Timashev**, PhD, Scientific Director of Biomedical Science & Technology Park<sup>1</sup>;

**K.V. Bulygin**, PhD, Associate Professor, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>;  
Associate Professor, Normal and Topographic Anatomy Department, Fundamental Medicine Faculty<sup>2</sup>;

**M.V. Sankova**, Research Intern, Human Anatomy and Histology Department<sup>1</sup>

<sup>1</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119991, Russia;

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119234, Russia;

<sup>3</sup>Moscow Center for Health Problems under the Moscow Government, 14/3 Zhitnaya St., Moscow, 119049, Russia

**The aim of the study** was to investigate the potential of direct mechanical testing methods in clinical practice to assess the strength and elastic-deformative characteristics of intraoperative samples of aortic arch aneurysm caused by uncontrolled arterial hypertension.

**Materials and Methods.** The study experimental material was the resected parts of the aortic aneurysm obtained during aneurysm replacement surgery in a patient with uncontrolled arterial hypertension. The direct mechanical testing methods such as instrumental indentation and uniaxial extension were used.

**Results.** It was shown that by the direct instrumental indentation it is possible to accurately assess and compare the stiffness of all three layers of the aortic wall. In this clinical case, the inner aorta layer was subject to the greatest atherosclerotic damage. In the media area, the values of this indicator were widely scattered, whereas the material was greatly dissected. By uniaxial extension method it is possible to obtain accurate parameters of the vascular wall strength, as well as to assess the stiffness, elasticity, and deformability of the intraoperatively resected aortic tissue. It was found that the aneurysm aortic wall, compared with the non-dilated aortic section, was characterized by a significantly lower strength in both longitudinal (by 4.25 times) and transverse (by 3.75 times) directions. In addition, aneurysm tissues demonstrated a significantly lower elasticity and deformability.

**Conclusion.** The study demonstrated the perspectives and options of using in clinical practice current methods of direct mechanical testing, which makes it possible to obtain more accurate indicators of the strength and elastic-deformative vascular characteristics, to clarify the pathophysiological mechanisms of cardiovascular accidents, and to justify the need for regular monitoring of vascular wall stiffness in clinical practice, in particular in patients with uncontrolled arterial hypertension.

**Key words:** uncontrolled arterial hypertension; aortic arch aneurysm; direct mechanical testing methods; strength and elastic-deformative aorta characteristics; vascular wall stiffness; cardiovascular accident predictors.

## Введение

Артериальная гипертензия на сегодняшний день является одним из самых распространенных сердечно-сосудистых заболеваний. По данным ряда эпидемиологических исследований, частота встречаемости повышенного артериального давления (АД) среди взрослого населения достигает 40%, а в старших возрастных категориях этот показатель превышает 80% [1–3]. Показано, что лишь 48% пациентов знают о наличии у них этой патологии. Около трети обследованных принимают антигипертензивные препараты, однако только 11% из них лечатся действительно эффективно. В ситуациях, когда целевое АД не достигнуто, используется термин «неконтролируемая артериальная гипертензия» [4].

Наличие повышенного АД существенно увеличивает риск развития сосудистых катастроф и повышает смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в 8 раз [5]. Одним из серьезных осложнений неконтролируемой артериальной гипертензии является аневризма аорты, которая нередко длительно протекает бессимптомно и не выявляется при стандартном терапевтическом осмотре [6–8]. Первыми признаками существующей патологии могут стать симптомы внезапно возникающего острого аортального синдрома с расслоением и разрывом аорты, летальность при котором достигает 90%. Жизненный прогноз таких пациентов напрямую зависит от своевременной диагностики и профилактики этого неотложного состояния [9–12].

На сегодняшний день в качестве основного критерия для назначения планового оперативного лечения аневризмы аорты используется размер аорты в сочетании с оценкой темпа роста ее диаметра [13]. В то же время накоплено много теоретических научных данных, подтверждающих патогенетическую значимость жесткости сосудистой стенки как важного независимого предиктора сосудистых осложнений [14–17]. В связи с этим в клинической практике в последние годы широкое применение получили неинвазивные методы косвенной оценки ригидности аортальной стенки — ультразвуковое исследование, магнитно-резонансная томография и метод определения скорости пульсовой волны [18–20].

Более точные показатели физико-механических свойств биологических тканей предоставляют методы прямых механических испытаний, такие как прямое инструментальное индентирование и метод одноосного растяжения, которые в основном используются при изучении сосудов животных моделей, экспериментальных тканей человека, выращенных в искусственных средах, и трупного материала [21, 22]. Особую значимость данные методы могут иметь в клинической практике. Так, при неконтролируемой артериальной гипертензии первостепенное значение отводится измерению физико-механических параметров начальных отделов аорты, в которых в силу на-

ибольшего гемодинамического удара степень атеросклеротических изменений максимальна [23].

В связи с этим **цель настоящего исследования** — изучить возможности применения в клинической практике методов прямых механических испытаний для оценки прочностных и упруго-деформативных характеристик интраоперационных образцов аневризмы дуги аорты, возникшей на фоне неконтролируемой артериальной гипертензии.

## Материалы и методы

Экспериментальным материалом для исследования послужили резецированные части аневризмы аорты, полученные в результате открытого хирургического вмешательства у пациентки с неконтролируемой артериальной гипертензией.

*Пациентка С., 74 года, поступила в клинику госпитальной хирургии Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского Сеченовского университета с жалобами на слабость, головокружение, учащение эпизодов повышения АД до 180/110 мм рт. ст. В анамнезе: более 30 лет страдала гипертонической болезнью с максимальным повышением АД до 200/120 мм рт. ст., периодически принимала разные гипертензивные препараты без эффекта. Три года назад по данным эхокардиографии впервые отметили расширение аорты, оперативное вмешательство не предлагали. В июле 2023 г. при эхокардиографии выявлено увеличение диаметра расширенной части аорты до 68 мм. Рекомендована консультация кардиохирурга. В сентябре 2023 г. в клинике Сеченовского университета при эхокардиографии обнаружена расслаивающаяся аневризма дистального отдела восходящей аорты с наличием пристеночных тромбомасс. Диаметр аорты на уровне синусов Вальсальвы — 33 мм, на уровне сино-тубулярного гребня — 30 мм, диаметр дистального отдела восходящей части и дуги аорты достигал 71 мм на расстоянии 5,9 см от фиброзного кольца аортального клапана (ФКАК). Отмечались атеросклеротическое поражение корня и стенок аорты, фиброзных колец, створок аортального и митрального клапанов, аортальная недостаточность I степени, митральная недостаточность I степени, трикуспидальная недостаточность I степени, диастолическая дисфункция левого желудочка 1-го типа. Систолическая функция гипертрофированного левого желудочка сохранена (фракция выброса — 61%), зон гипокинезии нет, данные за перикардиальный и плевральный выпот отсутствовали.*

*При поступлении: состояние тяжелое, гемодинамически стабильно. Ожирение II степени. Область сердца не изменена, ЧСС — 84 в минуту, АД — 150/90 мм рт. ст. Пульс — удовлетворительного наполнения, аритмичный. Тоны сердца приглуше-*

ны, аритмичные, шумов нет. Со стороны других органов и систем — без особенностей.

При МСКТ-аортографии отмечались аневризма дистального отдела восходящей части и дуги аорты диаметром до 74 мм, расслоение аорты II типа по DeBakey (рис. 1). При доплерографии определялись признаки диффузных атеросклеротических изменений брахиоцефальных артерий и аорты, деформация хода ветвей дуги аорты. При рентгеноскопии грудной клетки очаговых и инфильтративных теней в легких не обнаружено. Легочный рисунок не усилен. Корни легких структурны, не расширены. Диафрагма расположена обычно. Синусы свободны. Аорта расширена в грудном отделе, удлинена, уплотнена с участками кальциноза. Сердце несколько увеличено в объеме за счет левого желудочка. Тень средостения не смещена. На электрокардиограмме: ритм синусовый, ЧСС — 96 в минуту. Интервал PQ — 0,20", QRS — 0,09", QRST — 0,34. Электрическая ось сердца отклонена влево. Отмечаются гипертрофия левого желудочка, нарушение процессов реполяризации левого

желудочка. Суточное мониторирование АД проводилось в амбулаторных условиях, на фоне антигипертензивной терапии. Выявлена стабильная систоло-диастолическая артериальная гипертензия умеренного уровня с эпизодами повышения АД до высокого уровня при физических нагрузках, с нарушением циркадного профиля диастолического АД по типу non-dipper.

В общем анализе крови: HGB — 133 г/л, RBC —  $4,71 \times 10^{12}/л$ , WBC —  $8,8 \times 10^9/л$ , NEUT — 73,3%, LYMP — 17,5%, Mono — 6,7%, PLT —  $275 \times 10^9/л$ . В биохимическом анализе крови: билирубин общий — 9,2 мкмоль/л, прямой — 1,8 мкмоль/л, белок общий — 75 г/л, мочевины — 8,9 ммоль/л, креатинин — 92 мкмоль/л, СКФ — 49,45 мл/мин, глюкоза — 5,34 ммоль/л, холестерин (ХС) — 6,72 ммоль/л, триглицериды — 5,61 ммоль/л, ХС ЛПВП — 0,93 ммоль/л, ХС ЛПНП — 3,33 ммоль/л, ХС не-ЛПВП — 5,79 ммоль/л, АСТ — 15 Ед./л, АЛТ — 13 Ед./л, КФК — 36 Ед./л, С-реактивный белок — 8,1 мг/л, калий — 4,6 ммоль/л, натрий — 135 ммоль/л, хлор — 101 ммоль/л. Коагулограмма:

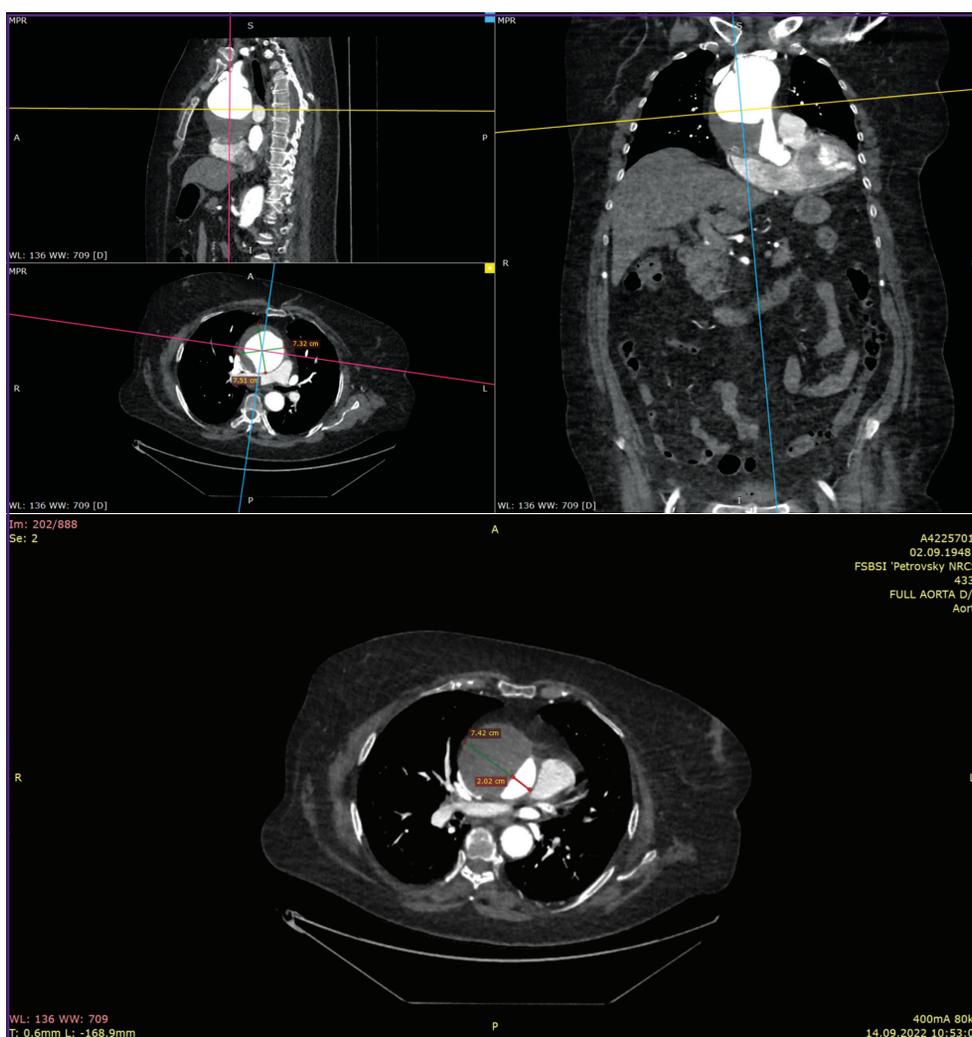


Рис. 1. МСКТ-аортография

АЧТВ — 25,4 с, АЧТВ-ПО — 0,82, ПТВ — 10,6 с, протромбин (активность по Квику) — 104,0%, МНО — 0,97, фибриноген — 5,39 г/л, антитромбин III — 131,0%, агрегация тромбоцитов — 76,4%. Общий анализ мочи — без патологии.

На основании данных проведенного обследования был установлен следующий диагноз: «Расслоение аорты II типа по DeVakeу, аневризма дистального отдела восходящей части и дуги аорты. Атеросклероз с преимущественным поражением аорты и брахиоцефальных артерий. Гипертоническая болезнь III стадии, III степени, риск 4. Неконтролируемая артериальная гипертензия. Гиперлипидемия. Гипертрофия миокарда левого желудочка. Хроническая болезнь почек С3А стадии. Гиперкоагуляционный синдром. Дисциркуляторная энцефалопатия II степени. Конституционально-экзогенное ожирение II степени».

При предоперационной чреспищеводной эхокардиографии: диаметр ФКАК — 31 мм. Диаметр восходящей части аорты на уровне синусов Вальсальвы — 30 мм, на уровне сино-тубулярного гребня — 27 мм, на 3,5 см от ФКАК — 40 мм, на уровне дистального отдела и дуги — 74 мм. Наблюдаются расслоение аорты на 4,5 см от ФКАК с тромбозом ложного канала, атеросклеротические изменения корня и стенок аорты, гипертрофия миокарда левого желудочка. Локальная и глобальная систолическая функция левого желудочка не нарушена. Гемодинамические параметры и функция аортального клапана — в норме. Имеет место трикуспидальная недостаточность I степени. Нисходящая аорта — без отрицательной динамики. По экстренным жизненным показаниям пациентке выполнено супракоронарное протезирование дистального отдела восходящей части и полудуги аорты синтетическим протезом AlboGraft 30 мм по методике Hemiarсh в условиях антеградной моногемисферальной перфузии го-

ловного мозга, умеренной гипотермии (27°C), искусственного кровообращения и кровяной кардиоopleгии по del Nido [24].

Резецированные части аневризмы аорты были доставлены в лабораторию в течение 2 ч после операции протезирования. При проведении натурального эксперимента применяли методы инструментального индентирования и одноосного растяжения. Макроиндентирование проводили на универсальной микромеханической системе Mach-1 v500csst (Biomomentum Inc., Канада). Использовали металлический сферический индентор с радиусом 3,25 мм. Образцы помещали на металлический держатель выпуклой или вогнутой стороной вверх, а также вверх срезом для измерений внутреннего слоя. Во время всех измерений влажное состояние материала поддерживали путем добавления фосфатно-солевого буфера. С помощью функции прибора find contact проводили индентирование образца до заданной нагрузки (0,1 Н), обеспечивающей глубину продавливания порядка 0,5–1,0 мм (рис. 2).

Для расчета модуля Юнга полученные зависимости нагрузки (F) от глубины продавливания (δ) аппроксимировали моделью Герца:

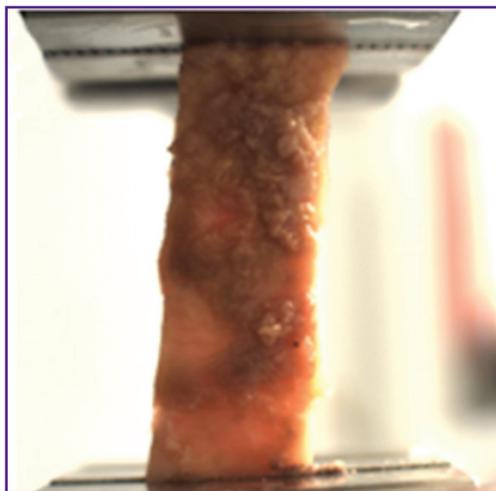
$$F = \frac{4}{3} f(\delta) \frac{E}{1-\nu^2} \delta^{\frac{3}{2}} \sqrt{R},$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона образца, который для биологических образцов принимается равным 0,5 [25]. На каждой стороне образца проводили ряд измерений (9–12) в режиме картирования; анализировали усредненные данные.

Для проведения одноосного растяжения были высечены образцы размерами 28,0×9,0 мм в направлениях вдоль (n=9) и поперек (n=9) тока крови при помощи стандартной вырубной матрицы. Образцы аневризмы и нерасширенного участка аорты исследовали посредством одноосного растяжения до раз-



**Рис. 2.** Инструментальное индентирование образцов аорты



**Рис. 3. Одноосное растяжение образцов аорты**

рыва на универсальной микромеханической системе Mach-1 v500csst (рис. 3). Прочность материала оценивали по показателю напряжения разрыва ( $\sigma$ , МПа):

$$\sigma = F/hw,$$

где  $F$  — это сила во время разрыва, Н;  $h$  — усредненная толщина образцов, мм;  $w$  — ширина образцов, мм.

Деформативную способность ( $\epsilon$ , %) определяли по величине максимального удлинения до момента разрыва:

$$\epsilon = \Delta L/L,$$

где  $\Delta L$  — это максимальное удлинение образцов во время эксперимента, мм;  $L$  — исходная длина образцов, мм.

О жесткости материала судили по значениям модуля Юнга ( $E$ , МПа):

$$E = \sigma/\epsilon,$$

где  $E$  — модуль Юнга, МПа;  $\sigma$  — показатель напряжения разрыва, МПа;  $\epsilon$  — максимальное удлинение образца до момента разрыва, мм [22].

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом Сеченовского университета при соблюдении этических норм Хельсинкской декларации (2013).

**Статистическая обработка данных.** Результаты исследования обрабатывали методом вариационной статистики с применением программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Нормальность распределения данных проверяли с помощью критерия Шапиро-Уилка. Учитывая, что распределение полученных числовых значений было нормальным, вычисляли средние значения показателей и их стандартные отклонения. О статистической значимости различий количественных пере-

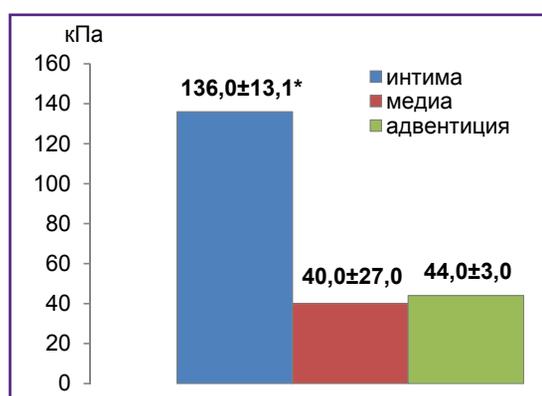
менных судили по t-критерию Стьюдента. Результаты рассматривали как статистически значимые при  $p < 0,05$ .

### Результаты

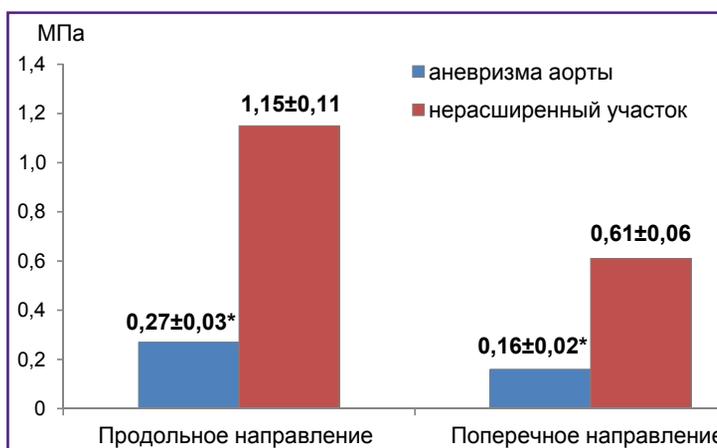
Стенка аорты как сосуда эластичного типа имеет трехслойную структуру, состоящую из внутренней оболочки (интимы), меди и адвентиции [26]. Показано, что внутренний слой резецированной части аорты (вогнутая сторона) имел статистически значимо большую жесткость (модуль Юнга) по сравнению с наружной (выпуклой) стороной и средним слоем (рис. 4).

В случае изучения меди в области максимальной дилатации аорты наблюдались большой разброс значений этого показателя и расслоение исследуемого материала.

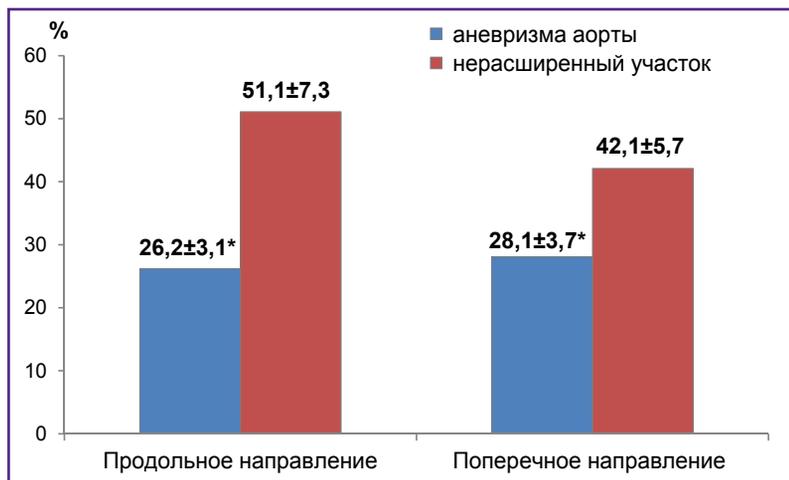
По данным одноосного растяжения стенка аневризматического мешка аорты по сравнению с нерасширенным участком отличалась существенно меньшей прочностью как в продольном (в 4,25 раза), так и в поперечном (в 3,75 раза) направлениях, на что указывали статистически значимо меньшие показатели максимального напряжения разрыва ( $\sigma$ , МПа) (рис. 5).



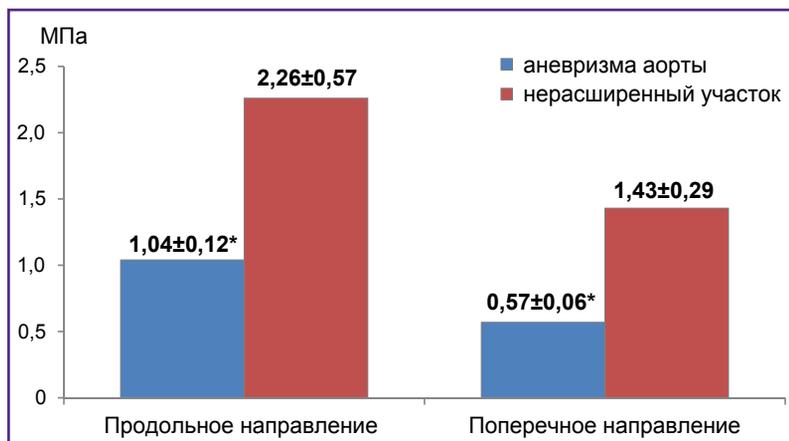
**Рис. 4. Модуль Юнга стенки аневризмы аорты**  
\*  $p < 0,05$



**Рис. 5. Максимальное напряжение разрыва образцов аорты**  
\*  $p < 0,05$



**Рис. 6. Максимальное удлинение образцов аорты до разрыва**  
\*  $p < 0,05$



**Рис. 7. Модуль Юнга (жесткость) образцов аорты**  
\*  $p < 0,05$

Ткани аневризмы демонстрируют значимо более низкую эластичность и деформативную способность по показателю максимального удлинения образцов до разрыва ( $\epsilon$ , %) (рис. 6).

Модуль Юнга в зоне дилатации имел меньшие значения по сравнению с нерасширенным участком аорты ( $E$ , МПа) (рис. 7).

## Обсуждение

Аневризма аорты, осложняющаяся молниеносным расслоением и разрывом сосудистой стенки, представляет собой серьезную медицинскую и социально-экономическую проблему для населения большинства стран мира. При неконтролируемой артериальной гипертензии изменение прочностных и упруго-деформативных свойств отмечается в первую очередь в дуге аорты, которая подвергается максимальным перепадам АД и вносит наибольший вклад в преобразование пульсирующего кровотока благодаря равномерному растяжению и сжатию до исход-

ных размеров [5, 23, 26–28]. В условиях увеличенного гемодинамического удара происходит повышение проницаемости интимы для липопротеинов низкой плотности и отложение их в стенке аорты, что сопровождается существенным изменением прочностных и упруго-деформативных характеристик этого сосуда [5–8]. Не случайно методами косвенной оценки ригидности кровеносных сосудов показано, что жесткость сосудистой стенки играет роль важного независимого предиктора сосудистых осложнений [14–17].

На примере данного клинического случая продемонстрированы возможности применения в клинической практике современных методов прямых механических испытаний в оценке физико-механических свойств интраоперационно взятого материала аорты. Так, показано, что метод прямого инструментального индентирования позволяет оценить и сравнить между собой жесткость всех трех слоев стенки аорты (при этом впервые проводилась оценка среднего слоя), что в дальнейшем при достаточной выборке позволит уточнить патофизиологические механизмы формирования аневризм. В данном случае установлено: наибольшему атеросклеротическому повреждению подвержена внутренняя оболочка этого сосуда, воспаление в которой сопровождается высвобождением множества биологически активных веществ и дезорганизацией соединительнотканной структуры средней оболочки аорты, что является основным фактором риска развития аневризмы аорты и ее расслоения. Не случайно при изучении меди в области дилатации аорты наблюдался большой разброс значений модуля Юнга и расслоение исследуемого материала.

Ускоренное формирование диффузно-очагового утолщения интимы этого отдела аорты на фоне неконтролируемой артериальной гипертензии служит морфологической основой взаимосвязанных деструктивных и компенсаторно-репаративных процессов, приводящих к утрате эластичности аортальной стенки, формированию аневризмы и истончению ее слоев [5–8, 15, 17, 27]. Так, показано, что метод одноосного растяжения позволяет получить точные параметры прочности сосудистой стенки, а также оценить жесткость, эластичность и деформативную способность интраоперационно взятой ткани аорты. В данном случае установлено, что стенка аневризмы в сравнении с нерасширенным участком аорты отличалась существенно меньшей прочностью, более

низкой эластичностью и деформативной способностью. Получение истинных показателей жесткости аортальной стенки методом одноосного растяжения при достаточной выборке и сопоставление их с результатами предоперационных исследований этих сосудов методами косвенной оценки позволит оценить уровень достоверности последних, создать математическую модель соответствия данных прямых и косвенных измерений для прогнозирования риска развития расслоения и разрыва аневризмы и для своевременного проведения плановой операции.

Кроме того, выявление преимущественно повреждаемого слоя в стенке аорты может определить дифференцированный подход к разработке оптимальной конструктивно-восстановительной тактики протезирования аневризмы, которая будет способствовать удержанию сосудистых швов и целостности анастомоза в послеоперационном периоде. Только четкое взаимодействие кардиолога, врача функциональной диагностики и сердечно-сосудистого хирурга позволит не допустить ошибку в оценке прогноза заболевания и выбрать единственно правильную тактику ведения пациента.

## Заключение

Продемонстрированы перспективы и возможности применения в клинической практике таких современных методов прямых механических испытаний, как инструментальное индентирование и метод одноосного растяжения. Использование этих биомедицинских технологий в оперативных клинических исследованиях позволит получить более точные показатели прочностных и упруго-деформативных характеристик сосудов, уточнить патофизиологические механизмы развития сердечно-сосудистых осложнений и обосновать необходимость регулярного контроля жесткости сосудистой стенки в клинической практике, в частности у пациентов с неконтролируемой артериальной гипертензией. Это будет способствовать разработке оптимальной тактики ведения данных пациентов, профилактике возникновения у них жизнеугрожающих состояний и снижению смертности.

**Финансирование исследования.** Измерение физико-механических свойств аортальной стенки методами прямых механических испытаний выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №23-15-00481 (<https://rscf.ru/project/23-15-00481/>).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература/References

1. Maksimov S.A., Balanova Y.A., Shalnova S.A., Muromtseva G.A., Kapustina A.V., Drapkina O.M. Regional living conditions and the prevalence, awareness, treatment,

control of hypertension at the individual level in Russia. *BMC Public Health* 2022; 22(1): 202, <https://doi.org/10.1186/s12889-022-12645-8>.

2. Lu W., Pikhart H., Tamosiunas A., Kubinova R., Capkova N., Malyutina S., Pajak A., Bobak M. Prevalence, awareness, treatment and control of hypertension, diabetes and hypercholesterolemia, and associated risk factors in the Czech Republic, Russia, Poland and Lithuania: a cross-sectional study. *BMC Public Health* 2022; 22(1): 883, <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13260-3>.

3. Османов Э.М., Маньяков Р.Р., Туктамышева Л.М., Гараева А.С. Гендерные и возрастные особенности распространенности гипертонической болезни в популяции среднеурбанизированного города центральной России. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины* 2022; 30(5): 766–770, <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2022-30-5-766-770>.

Osmanov E.M., Manyakov R.R., Tuktamysheva L.M., Garaeva A.S. Gender and age features of the prevalence of hypertension in the population of a medium-urbanized city of central Russia. *Probl Sotsialnoi Gig Zdravookhraneniia Istor Med* 2022; 30(5): 766–770, <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2022-30-5-766-770>.

4. Подзолков В.И., Тарзиманова А.И., Георгадзе З.О. Современные принципы лечения неконтролируемой артериальной гипертензии. *Рациональная фармакотерапия в кардиологии* 2019; 15(5): 736–741, <https://doi.org/10.20996/1819-6446-2019-15-5-736-741>.

Podzolkov V.I., Tarzimanova A.I., Georgadze Z.O. Modern principles of treatment of uncontrolled hypertension. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology* 2019; 15(5): 736–741, <https://doi.org/10.20996/1819-6446-2019-15-5-736-741>.

5. Romano S., Rigon G., Albrigi M., Tebaldi G., Sartorio A., Cristin L., Burrei G., Fava C., Minuz P. Hypertension, uncontrolled hypertension and resistant hypertension: prevalence, comorbidities and prescribed medications in 228,406 adults resident in urban areas. A population-based observational study. *Intern Emerg Med* 2023; 18(7): 1951–1959, <https://doi.org/10.1007/s11739-023-03376-8>.

6. Hibino M., Otaki Y., Kobeissi E., Pan H., Hibino H., Taddese H., Majeed A., Verma S., Konta T., Yamagata K., Fujimoto S., Tsuruya K., Narita I., Kasahara M., Shibagaki Y., Iseki K., Moriyama T., Kondo M., Asahi K., Watanabe T., Watanabe T., Watanabe M., Aune D. Blood pressure, hypertension, and the risk of aortic dissection incidence and mortality: results from the J-SCH study, the UK Biobank study, and a meta-analysis of cohort studies. *Circulation* 2022; 145(9): 633–644, <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.121.056546>.

7. Bento J.R., Meester J., Luyckx I., Peeters S., Verstraeten A., Loeys B. The genetics and typical traits of thoracic aortic aneurysm and dissection. *Annu Rev Genomics Hum Genet* 2022; 23: 223–253, <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-111521-104455>.

8. Acharya M.N., Mariscalco G. Surveillance for moderate-sized thoracic aortic aneurysms: equality is the goal. *J Card Surg* 2022; 37(4): 840–842, <https://doi.org/10.1111/jocs.16174>.

9. Saeyeldin A.A., Velasquez C.A., Mahmood S.U.B., Brownstein A.J., Zafar M.A., Ziganshin B.A., Eleferiades J.A.

Thoracic aortic aneurysm: unlocking the “silent killer” secrets. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2019; 67(1): 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11748-017-0874-x>.

10. Ostberg N.P., Zafar M.A., Ziganshin B.A., Elefteriades J.A. The genetics of thoracic aortic aneurysms and dissection: a clinical perspective. *Biomolecules* 2020; 10(2): 182, <https://doi.org/10.3390/biom10020182>.

11. Gouveia E., Melo R., Silva Duarte G., Lopes A., Alves M., Caldeira D., Fernandes E., Fernandes R., Mendes Pedro L. Incidence and prevalence of thoracic aortic aneurysms: a systematic review and meta-analysis of population-based studies. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 2022; 34(1): 1–16, <https://doi.org/10.1053/j.semtcvs.2021.02.029>.

12. Lu H., Du W., Ren L., Hamblin M.H., Becker R.C., Chen Y.E., Fan Y. Vascular smooth muscle cells in aortic aneurysm: from genetics to mechanisms. *J Am Heart Assoc* 2021; 10(24): e023601, <https://doi.org/10.1161/JAHA.121.023601>.

13. Anfinogenova N.D., Sinitsyn V.E., Kozlov B.N., Panfilov D.S., Popov S.V., Vrublevsky A.V., Chernyavsky A., Bergen T., Khovrin V.V., Ussov W.Y. Existing and emerging approaches to risk assessment in patients with ascending thoracic aortic dilatation. *J Imaging* 2022; 8(10): 280, <https://doi.org/10.3390/jimaging8100280>.

14. Gosse P., Boulestreau R., Doublet J., Gaudissard J., Cremer A. Arterial stiffness (from monitoring of Qkd interval) predict the occurrence of cardiovascular events and total mortality. *J Hum Hypertens* 2023; 37(10): 907–912, <https://doi.org/10.1038/s41371-022-00797-4>.

15. Chang G., Hu Y., Ge Q., Chu S., Avolio A., Zuo J. Arterial stiffness as a predictor of the index of atherosclerotic cardiovascular disease in hypertensive patients. *Int J Environ Res Public Health* 2023; 20(4): 2832, <https://doi.org/10.3390/ijerph20042832>.

16. Acampa M., Bongiorno M., Lazzerini P.E., Catania C., Domenichelli C., Guideri F., Tassi R., Cartocci A., Martini G. Increased arterial stiffness is a predictor of delayed ischaemic stroke after subarachnoid haemorrhage. *Heart Lung Circ* 2021; 30(4): 525–530, <https://doi.org/10.1016/j.hlc.2020.07.016>.

17. Zhang Y., Lacolley P., Protogerou A.D., Safar M.E. Arterial stiffness in hypertension and function of large arteries. *Am J Hypertens* 2020; 33(4): 291–296, <https://doi.org/10.1093/ajh/hpz193>.

18. Zhang J.R., Zhou J. The detection and evaluation of vascular stiffness. *Sheng Li Xue Bao* 2022; 74(6): 894–902.

19. Milan A., Zocaro G., Leone D., Tosello F., Buraioli I., Schiavone D., Veglio F. Current assessment of pulse wave velocity: comprehensive review of validation studies. *J Hypertens* 2019; 37(8): 1547–1557, <https://doi.org/10.1097/HJH.0000000000002081>.

20. Badji A., Sabra D., Bherer L., Cohen-Adad J., Girouard H., Gauthier C.J. Arterial stiffness and brain integrity: a review of MRI findings. *Ageing Res Rev* 2019; 53: 100907, <https://doi.org/10.1016/j.arr.2019.05.001>.

21. Liu F., Haeger C.M., Dieffenbach P.B., Sicard D., Chrobak I., Coronata A.M., Suárez Velandia M.M., Vitali S., Colas R.A., Norris P.C., Marinković A., Liu X., Ma J., Rose C.D., Lee S.J., Comhair S.A., Erzurum S.C., McDonald J.D., Serhan C.N., Walsh S.R., Tschumperlin D.J., Fredenburgh L.E. Distal vessel stiffening is an early and pivotal mechanobiological regulator of vascular remodeling and pulmonary hypertension. *JCI Insight* 2016; 1(8): e86987, <https://doi.org/10.1172/jci.insight.86987>.

22. Фомкина О.А., Николенко В.Н. Биомеханические параметры средней мозговой артерии при одноосном продольном и поперечном ее растяжении. *Астраханский медицинский журнал* 2012; 7(4): 253–255.

Fomkina O.A., Nikolenko V.N. Biomechanical parameters of the middle cerebral artery at its uniaxial longitudinal and transverse stretching. *Astrahanskij medicinskij zhurnal* 2012; 7(4): 253–255.

23. Pierce G.L., Coutinho T.A., DuBose L.E., Donato A.J. Is it good to have a stiff aorta with aging? Causes and consequences. *Physiology (Bethesda)* 2022; 37(3): 154–173, <https://doi.org/10.1152/physiol.00035.2021>.

24. Вачев А.Н., Дмитриев О.В., Козин И.И., Черновалов Д.А., Грязнова Д.А., Итальянцев А.Ю., Лукьянов А.А., Гуреев А.Д., Прожого М.Г. Протезирование восходящего отдела и дуги аорты по методике Нemiarch без циркуляторного ареста при аневризме и ограниченном расслоении. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия* 2020; 13(2): 151–156, <https://doi.org/10.17116/kardio202013021151>.

Vachev A.N., Dmitriev O.V., Kozin I.I., Chernovalov D.A., Gryaznova D.A., Italyantsev A.Yu., Lukyanov A.A., Gureev A.D., Prozhoga M.G. Ascending aorta and hemiarch replacement without circulatory arrest for aortic aneurysm and local dissection. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya khirurgiya* 2020; 13(2): 151–156, <https://doi.org/10.17116/kardio202013021151>.

25. Efremov Y.M., Shpichka A.I., Kotova S.L., Timashev P.S. Viscoelastic mapping of cells based on fast force volume and PeakForce Tapping. *Soft Matter* 2019; 15(27): 5455–5463, <https://doi.org/10.1039/c9sm00711c>.

26. di Gioia C.R.T., Ascione A., Carletti R., Giordano C. Thoracic aorta: anatomy and pathology. *Diagnostics (Basel)* 2023; 13(13): 2166, <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132166>.

27. Yang T., Yuan X., Gao W., Lu M.J., Hu M.J., Sun H.S. Causal effect of hypertension and blood pressure on aortic diseases: evidence from Mendelian randomization. *Hypertens Res* 2023; 46(9): 2203–2212, <https://doi.org/10.1038/s41440-023-01351-6>.

28. Белов Ю.В., Федоров Д.Н., Тааев Б.К., Даабуль А.С. Особенности гистологического строения стенки восходящей аорты при аневризме. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия* 2013; 6(2): 34–36.

Belov Iu.V., Fedorov D.N., Taaev B.K., Daabul' A.S. Specifics of histological structure of ascending aortic wall in aneurysm. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya khirurgiya* 2013; 6(2): 34–36.