

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЯ АОРТЫ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СТВОРОК АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА ПРИ КЛАПАНОСОХРАНЯЮЩЕМ ПРОТЕЗИРОВАНИИ КОРНЯ АОРТЫ

Успенский В. Е., Торопова Я. Г., Сапранков В. Л., Мазин В. И.,  
Минин С. А., Гуськова М. В., Моисеева О. М., Гордеев М. Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Национальный медицинский исследовательский центр имени  
В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской  
Федерации, Санкт-Петербург, Россия

### Контактная информация:

Успенский Владимир Евгеньевич,  
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»  
Минздрава России,  
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,  
Россия, 197341.  
E-mail: v.e.uspenskiy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.09.2024  
и принята к печати 27.09.2024.

### Резюме

**Актуальность.** Перспективным методом хирургического лечения аневризмы корня и восходящей аорты (ВА) при неизменных створках аортального клапана (АК) является протезирование корня и ВА с реимплантацией АК (операция Дэвида). До настоящего времени не сформулированы однозначные критерии, позволяющие сделать выбор в пользу клапаносберегающей либо клапаноуносящей операции. Главными критериями остаются результаты визуальной ревизии и выбор метода лечения на основании опыта хирурга. **Цель.** В эксперименте разработать прототип и методику применения устройства позиционирования створок АК, которое позволит упростить и стандартизировать клапаносохраняющее протезирование корня аорты, улучшить результаты и повысить воспроизводимость данных операций. **Материалы и методы.** Трехмерное (3D) моделирование компонентов устройства выполнено в параметрической среде автоматизированного проектирования с открытым исходным кодом FreeCAD 0.20.1. Двумерные эскизы преобразовывались в трехмерные модели и экспортировались в виде файлов формата stl для 3D-печати. Твердые компоненты модели изготавливались из полимолочной кислоты (PLA-пластик), эластичные — из резиноподобного фотополимера (Dropstil F556 10 shore A) также методом 3D-печати по технологии SLA. **Результаты.** Устройство представляет собой 2 одинаковых кольца-измерителя переменного диаметра, соединенных между собой тремя стойками переменной длины. В верхней части каждого из креплений стоек к дистальному кольцу имеются Т-образные вырезы для временного закрепления нитей-держалок, проведенных через комиссуры створок АК. Для проксимальной фиксации протеза аорты и проксимального кольца-измерителя используются 3 П-образных шва, проведенных внутри кнаружи через фиброзное кольцо АК, проксимальную часть сосудистого протеза и взятых в турникеты. Диаметры колец-измерителей могут бесступенчато меняться в диапазоне 25–40 мм путем вращения червячного привода. С внутренней стороны устройства помещается сосудистый протез, швы-держалки, фиксированные к вершинам комиссур, фиксируются в Т-образных вырезах в верхних частях стоек. Устройство позволит менять положение точки коаптации створок, площадь коаптации и выполнять гидравлические пробы в условиях разных позиций створок, а также переменных диаметров на уровне фиброзного кольца АК и синотубулярного соединения (25–40 мм). При достижении целевой позиции точки коаптации, площади коаптации и удовлетворительного результата гидравлической пробы створки с комиссурами фиксируются внутри протеза, устройство удаляется. **Заключение.** Создано новое устройство для облегчения выполнения, воспроизводимости и стандартизации клапаносохраняющего протези-

рования АК. Полученные результаты позволят облегчить и ускорить выполнение клапаносохраняющего протезирования корня и ВА, повысить воспроизводимость методики, снизить риски осложнений.

**Ключевые слова:** аневризма, аортальный клапан, воспроизводимость результатов, грудная аорта, клапаносохраняющий, реимплантация, технология, трехмерная печать.

*Для цитирования:* Успенский В.Е., Торопова Я.Г., Сапранков В.Л. и др. Разработка устройства для измерения параметров корня аорты и позиционирования створок аортального клапана при клапаносохраняющем протезировании корня аорты. *Трансляционная медицина.* 2024; 11(5): 388-397. DOI: 10.18705/2311-4495-2024-11-5-388-397. EDN: CDZJQE

## DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR ASSESSMENT OF AORTIC ROOT PARAMETERS AND POSITIONING OF AORTIC VALVE CUSPS DURING AORTIC VALVE-SPARING ROOT REPLACEMENT

Vladimir E. Uspensky, Yana G. Toropova, Valeriy L. Saprankov,  
Viktor I. Mazin, Sergey A. Minin, Maria V. Guskova,  
Olga M. Moiseeva, Mikhail L. Gordeev

Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

**Corresponding author:**

Vladimir E. Uspensky,  
Almazov National Medical Research Centre,  
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg, Russia,  
197341.

E-mail: v.e.uspenskiy@gmail.com

Received 02 September 2024; accepted  
27 September 2024.

### Abstract

**Background.** A promising method of surgical treatment of aneurysms of the root and ascending aorta (AA) with unchanged aortic valve (AV) cusps is aortic valve-sparing root replacement (VSR) with AV reimplantation (David procedure). To date, there are no clear indications to make a choice in favor of valve-replacing or valve-sparing intervention. The result of visual evaluation and the choice of treatment method based on the surgeon's experience remains the main criteria. **Objective.** In the experiment to develop a prototype and method of application of the device for positioning of AV cusps, which will simplify and standardize aortic valve-sparing root replacement, improve the results and increase the reproducibility of these operations. **Design and methods.** Three-dimensional (3D) modeling of the device components was performed in the parametric open-source computer-aided design environment FreeCAD 0.20.1. Two-dimensional sketches were converted into three-dimensional models and exported as stl files for 3D printing. Solid components of the model were made of polylactic acid (PLA-plastic), elastic components were made of rubber-like photopolymer (Dropstil F556 10 shore A) also by 3D printing using SLA technology. **Results.** The device consists of 2 similar ring-sizers of variable diameter connected by three struts of variable length. In the upper part of each of the struts fastenings to the distal ring represents T-shaped cutouts for temporary locking of the suture-holders passed through the commissures of the AV cusps. For proximal locking of the aortic graft and the proximal ring-sizer, 3 U-shaped sutures are used, passed from inside to outside through the AV ring, the proximal part of the graft and taken in the tourniquets. The diameters of the ring-sizers can be varied between 25–40 mm by rotating a worm drive. A graft is placed on the inner side of the device, the suture-holders attached to the tops of the commissures are locked in the T-shaped notches in the upper parts of the struts. The device will allow changing the position of the coaptation point, coaptation square and performing hydraulic tests in different positions of the cusps, as well as variable diameters at the level of the AV ring and sinotubular junction (25–40 mm). When the target position of the coaptation point,

coaptation area and satisfactory hydraulic test result are achieved, the cusps with commissures are locked inside the graft and the device is removed. **Conclusion.** A new device has been developed to facilitate, reproduce, and standardize VSRR. The results obtained will facilitate and accelerate the performance of VSRR, increase the reproducibility of the technique, and reduce the risks of complications.

**Key words:** aneurysm, aortic valve, reimplantation, reproducibility of results, technology, thoracic aorta, three-dimensional printing, valve-sparing.

*For citation: Uspensky VE, Toropova YG, Saprankov VL, et al. Development of a device for assessment of aortic root parameters and positioning of aortic valve cusps during aortic valve-sparing root replacement. Translational Medicine. 2024; 11(5): 388-397. (In Rus.) DOI: 10.18705/2311-4495-2024-11-5-388-397. EDN: CDZJQE*

**Список сокращений:** АВА — аневризма восходящей аорты, АК — аортальный клапан, АР — аортальная регургитация, ВА — восходящая аорта, ВТЛЖ — выходной тракт левого желудочка, САПР — среда автоматизированного проектирования, СВ — синусы Вальсальвы, СТС — синотубулярное соединение, ФК — фиброзное кольцо.

### Введение

Аортальная регургитация (АР) — одно из часто встречающихся состояний, ассоциированных с аневризмой восходящей аорты (АВА). Причинами АР могут быть расширение фиброзного кольца (ФК) АК, синусов Вальсальвы (СВ), синотубулярного соединения (СТС) с изменением соотношений размеров этих структур корня аорты при отсутствии морфологических изменений самих полунных створок [1, 2]. Для планирования лечения и оценки возможности сохранения АК необходимо проанализировать механизм формирования АР [3, 4]. Основными методами хирургической коррекции АВА в сочетании с АР и вовлечением корня аорты являются протезирование АК, корня и восходящей аорты (ВА) клапаносодержащим кондуитом (операция Бенталла-Де Боно), протезирование корня и ВА с реимплантацией (операция Дэвида) или ремоделированием (операция Якуба) АК, реимплантация корня аорты (операция Florida sleeve — «Флоридский рукав») [5–9]. Небольшую долю вмешательств по поводу АВА в сочетании с АР составляет замещение корня аорты легочным аутографтом — операция Росса [10]. При аневризме ВА на уровне СВ и тубулярной части ВА рекомендуется протезирование корня и ВА с реимплантацией АК (операция Дэвида) [2]. Оптимальными кандидатами являются больные с АР I типа (расширение корня аорты в сочетании с морфологически нормальными створками) и II типа (пролапс створок) [3]. Исключая особенности тех-

ники и опыт хирурга, к основным факторам, лимитирующим эффективное клапаносохраняющее вмешательство, относятся степень расширения ФК АК и состояние створок АК. При клапаносберегающем протезировании корня и ВА в клинике с достаточным опытом риск осложнений и рецидива АР невелик. Операция Дэвида существенно снижает риск ассоциированных с протезом АК отдаленных осложнений и повышает качество жизни пациентов [11–13]. Госпитальная летальность не превышает 2 %, а в отдаленном периоде после операций с сохранением АК клапан-ассоциированные осложнения редки, их встречаемость существенно ниже, чем при клапаноуносящих вмешательствах [14, 15].

Несмотря на тенденцию к росту количества операций на ВА в нашей стране, оно остается небольшим. В 2022 г. в России было выполнено 3010 операций на ВА (в 2021 г. — 2564) в 86 клиниках с общей госпитальной летальностью 7,5 %. Следует отметить 346 (11,5 %) операций Дэвида (госпитальная летальность в 2022 г. — 4,05 %, в 2021 г. — 4,12 %) и 16 (0,53 %) операций Florida sleeve (госпитальная летальность в 2022 г. — 0 %, в 2021 г. — 6,67 %). Таким образом, доля клапаносохраняющих операций протезирования корня и ВА в РФ в общей массе вмешательств на грудной аорте остается крайне малой — не более 12–14 % от всех вмешательств на ВА [16].

Этапами клапаносберегающего протезирования корня аорты являются интраоперационные измерения параметров корня аорты, а также выбор протеза аорты подходящего диаметра, и общепринятая методика для решения данной задачи отсутствует. Выбор протеза аорты подходящего диаметра может основываться на значениях диаметра ФК АК, измеренного интраоперационно при чреспищеводной эхокардиографии или прямым методом стандартными калибрами (сайзерами), либо на значении

высоты корня аорты [17, 18]. Ключевыми элементами эффективной реконструкции АК являются локализация точки коаптации створок АК выше уровня ФК АК и длина коаптации не менее 3–4 мм [19]. Для моделирования проксимальной зоны протеза аорты возможна его дозированная пликация, и для упрощения данной задачи российскими исследователями было разработано специальное устройство для формирования проксимальной части сосудистого протеза [20]. Группа Н.-J. Schäfers разработала специальный инструмент, позволяющий с высокой точностью измерять планиметрические характеристики АК, облегчая выполнение клапаносохраняющего протезирования корня аорты [21]. Разработан и запатентован ряд приспособлений для клапаносохраняющих операций на ВА, однако эти устройства технически сложны, непросты в использовании и не нашли широкого применения в клинической практике [22–25]. Вышеописанные устройства и приемы в основном предназначены для решения какой-то одной задачи: измерения диаметра ФК АК, позиционирования створки (створок) АК либо подбора оптимального диаметра протеза аорты. До настоящего времени не сформулированы однозначные критерии, позволяющие сделать выбор в пользу вмешательства с сохранением либо протезированием АК, центральным остается результат визуальной оценки и выбор метода коррекции на основании опыта хирурга. Создание специального устройства позиционирования створок АК, которое позволит упростить и стандартизировать клапаносохраняющее протезирование корня аорты, улучшить результаты и повысить воспроизводимость клапаносохраняю-

щих операций, является актуальной задачей сердечно-сосудистой хирургии.

### Материалы и методы

В работе использовались методы виртуально-трехмерного (3D) моделирования и 3D-печати. 3D-моделирование компонентов устройства выполнено в параметрической среде автоматизированного проектирования (САПР) с открытым исходным кодом FreeCAD 0.20.1. Двумерные эскизы преобразовывались в трехмерные модели и экспортировались в виде файлов формата stl для 3D-печати. Твердые компоненты модели изготавливались из полимолочной кислоты (PLA-пластик — Polylactic Acid) методом 3D-печати по технологии FDM (Fused Deposition Modeling — моделирование плавным осаждением). Параметры печати: температура печати 190–220 °С, высота слоя 0,1–0,3 мм, скорость печати 60–150 мм/с, подогрев стола до 40–60 °С [26]. Эластичные элементы изготовлены из резиноподобного фотополимера (Dropstil F556 10 shore A) также методом 3D-печати по технологии SLA (Stereolithography — стереолитография). Параметры печати: толщина слоев 0,33 мм при плотности заполнения 100 %, высота слоя 100 мкм [27].

### Результаты

Разработка прототипа устройства была вдохновлена изобретением Н. Akimoto и соавторов (2001), создавших устройство под названием Commissure Holder (держатель комиссур), упрощающее выбор протеза аорты подходящего диаметра и определение оптимального положения, в котором каждая ко-

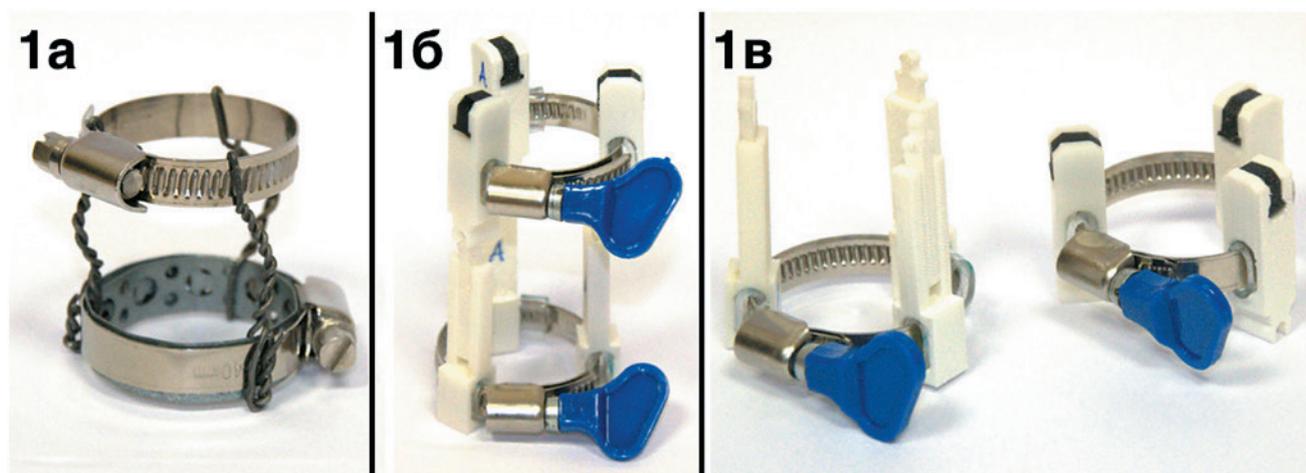


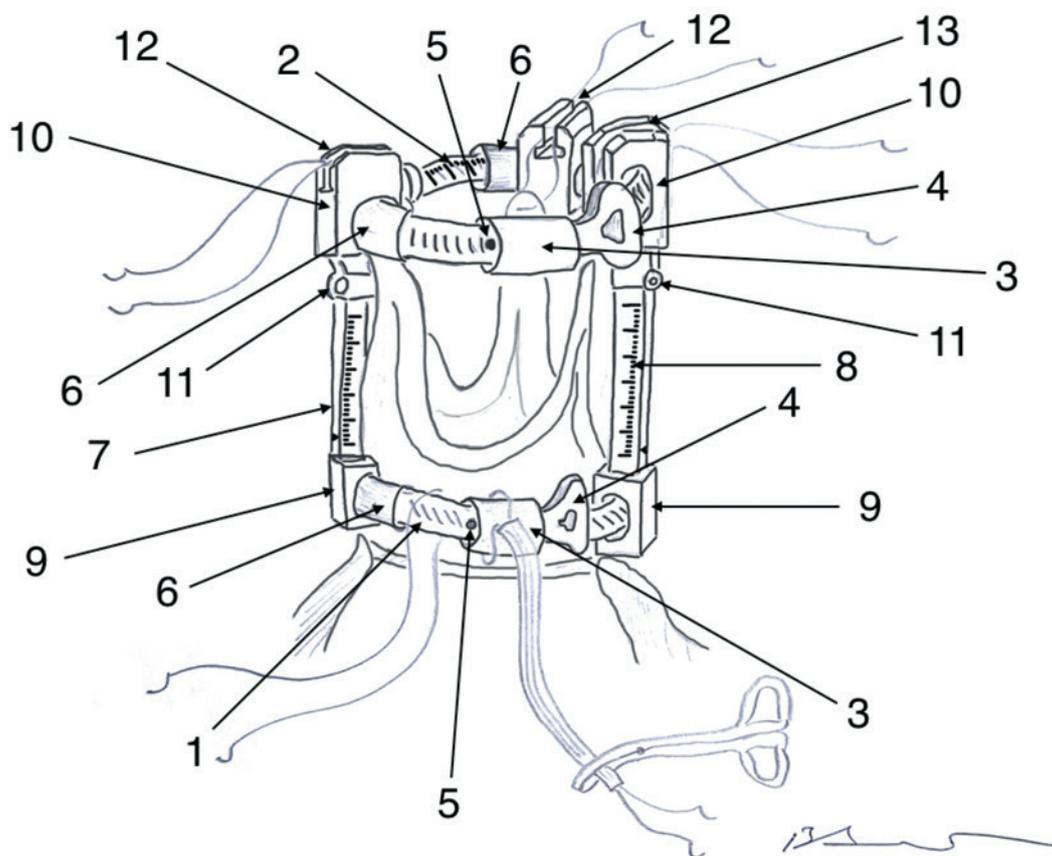
Рис. 1. Прототипы первого (1а) и второго поколений устройства Almazov Leaflet Holder (1б — в собранном виде, 1в — в разобранном виде)

Figure 1. Prototypes of the first (1a) and second (1b) generations of the Almazov Leaflet Holder device

миссура АК должна быть имплантирована в протез [28]. Также идея нашего устройства частично базировалась на изобретении М. Jelenc и коллег (2018), разработавших кольца-измерители (сайзеры), позволяющие правильно определить диаметр протеза аорты при реимплантации АК и дополнительно выполнить пластику створки [29].

Первый прототип нашего устройства был сконструирован для оценки возможности эффективно применения в клапаносохраняющей хирургии ВА и состоял из двух регулируемых по диаметру колец-измерителей, жестко соединенных меж-

ду собой тремя стойками — модель ALH-gen1 (Almazov Leaflet Holder, поколение 1) (рис. 1a). Предполагалось создание линейки устройств с регулируемыми диаметрами колец-измерителей и несколькими вариантами высоты стоек, соответственно переменной высоте комиссур и корня аорты. От данной конструкции пришлось отказаться в связи с высокой вариабельностью дистанции от уровня ФК АК до СТС, а также из-за неодинаковой высоты комиссур, в особенности при выраженном и асимметричном аневризматическом расширении корня аорты. Для решения



**Рис. 2. Схематическое изображение компонентов устройства Almazov Leaflet Holder**

Примечание: 1 — проксимальное кольцо-измеритель, 2 — дистальное кольцо-измеритель, 3 — основание корпуса привода, 4 — барашек, вращающий червячную передачу, 5 — «червяк», 6 — трубки из прозрачного силикона, надетые на кольца, 7 и 8 — раздвижные соединительные стойки, 9 — крепления стоек к проксимальному кольцу, 10 — крепления стоек к дистальному кольцу, 11 — разъемное присоединение дистального крепления к дистальному концу раздвижной стойки, 12 — Т-образные вырезы в верхней части каждого из креплений стоек к дистальному кольцу-измерителю, 13 — помещенный внутрь выреза мягкий Т-образный элемент.

**Figure 2. Schematic representation of the Almazov Leaflet Holder device components**

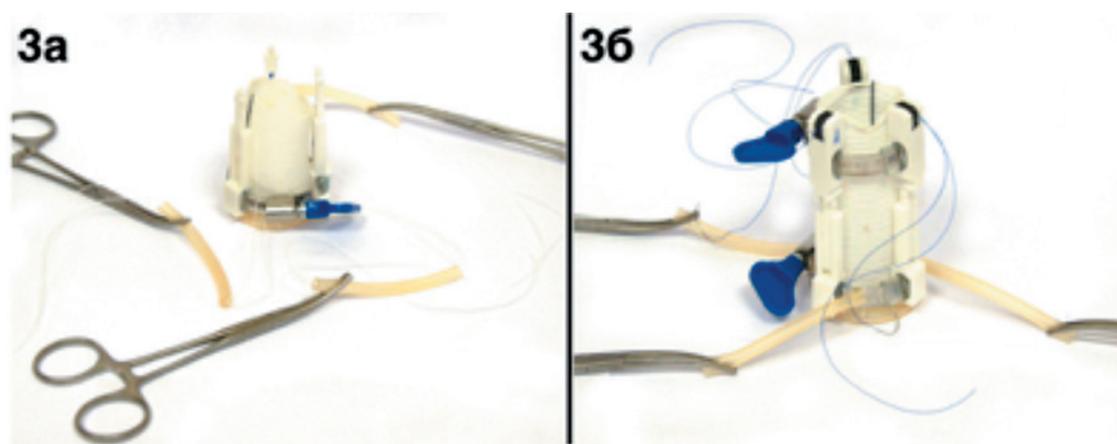
Note: 1 — proximal ring-sizer, 2 — distal ring-sizer, 3 — base of the actuator body, 4 — thumb screw rotating the worm gear, 5 — “worm”, 6 — silicone tubes put on the rings, 7 and 8 — sliding connecting struts, 9 — attachments of struts to the proximal ring, 10 — attachments of the struts to the distal ring, 11 — detachable connection of the distal attachment to the distal end of the sliding strut, 12 — T-shaped cutouts in the upper part of each of the strut attachments to the distal measuring ring, 13 — soft T-shaped element placed inside the cutout.

этой проблемы в модели второго поколения ALH-gen2 были применены соединительные стойки переменной длины, а также разъемные соединения стоек и колец-измерителей (рис. 1б, 1в).

В САПР FreeCAD были построены виртуальные модели компонентов устройства, далее компоненты были распечатаны на 3D-принтере с последующей сборкой устройства. Второе поколение устройства представляет собой 2 одинаковых кольца-измерителя переменной диаметра, соединенных между собой тремя стойками таким образом, что одно кольцо располагается над другим. Кольца-измерители выполнены в виде тонкой металлической полоски длиной 150 мм с нанесенными на внешней стороне зубьями, с внутренней стороны кольца нанесены обозначения миллиметров, отражающие диаметр кольца. Каждая металлическая полоска одним концом прикрепляется к основанию корпуса привода, другой конец (свободный) проходит через корпус привода. Диаметр кольца меняется при помощи червячной передачи. Каждая из трех соединительных стоек представляет собой 2 панели разных размеров. Панель большего размера, представляющая собой прямоугольный параллелепипед (внешняя часть стойки), имеет продольный паз, на внешней части стойки нанесены обозначения миллиметров. Внутренняя часть стойки имеет поперечное сечение, соответствующее пазу внешней части, и помещается внутрь последней,

что обеспечивает возможность их продольного перемещения друг относительно друга и изменения общей длины конструкции в диапазоне 30–50 мм. Крепления стоек выполнены в виде прямоугольных параллелепипедов с овальным отверстием, надеваются на кольца-измерители и могут перемещаться по периметру кольца. Присоединение дистальных креплений к концам раздвижных стоек выполнено разъемным, по типу шарикоподшипниковых. В верхней части каждого из креплений стоек к дистальному кольцу-измерителю имеются радиальные Т-образные вырезы с помещенным внутрь выреза элементом, выполненным из мягкого резиноподобного фотополимера. Вырезы служат для временного закрепления нитей-держалок, проведенных через вершины комиссур мобилизованных створок аортального клапана (рис. 2). Все составляющие устройства нетоксичны, могут быть в разобранном виде стерилизованы без повреждений методом холодной стерилизации для последующего интраоперационного применения.

Алгоритм применения разработанного устройства следующий. После пережатия аорты и кардиоплегии выполняется аортотомия, ревизия ВА и АК, измененные зоны стенки корня и ВА иссекаются, створки АК выкраиваются на комиссурах до уровня выходного тракта левого желудочка (ВТЛЖ). Через вершины комиссур проводятся швы-держалки. Для проксимальной фиксации про-



**Рис. 3. Позиционирование сосудистого протеза внутри устройства Almazov Leaflet Holder — gen2**

Примечание: 3а — проксимальное кольцо-измеритель установлено в области фиброзного кольца аортального клапана и фиксировано тремя П-образными швами на турникетах, 3б — с внутренней стороны устройства помещен сосудистый протез, швы-держалки фиксированы в Т-образных вырезах в верхних частях стоек.

### Figure 3. Placement of the graft inside the Almazov Leaflet Holder device

Note: 3a — the proximal ring-sizer is placed in the area of the aortic valve ring and stabilized with three U-shaped sutures on the tourniquets, 3b — vascular prosthesis is placed on the inner side of the device, the retainer sutures are stabilized in the T-shaped notches in the upper parts of the struts.

теза аорты используются 12 П-образных швов с тефлоновыми прокладками, проведенных из ВТЛЖ изнутри кнаружи через ФК АК с последующим проведением через проксимальную часть сосудистого протеза. Далее в область ФК АК устанавливается проксимальное кольцо-измеритель со стойками таким образом, что выкроенные створки АК оказываются внутри кольца, а каждая пара (от 3 до 6) П-образных швов, проведенных через ВТЛЖ, охватывает проксимальное кольцо, захватывается в турникет и таким образом тестово фиксирует кольцо устройства на уровне ФК АК (рис. 3а). Диаметр проксимального кольца может бесступенчато меняться в диапазоне 25–40 мм путем вращения червячного привода. Следующим этапом дистальное кольцо присоединяется к раздвижным стойкам через разъемные соединения, а швы-держалки, фиксированные к вершинам выкроенных комиссур, проводятся через дистальное кольцо. Далее с внутренней стороны устройства помещается сосудистый протез таким образом, как он будет располагаться после завершения реконструктивной операции, а швы-держалки, фиксированные к вершинам комиссур, фиксируются в Т-образных вырезах в верхних частях стоек (рис. 3б). Таким образом, комиссуры могут перемещаться по вертикали и по горизонтали с возможностью бесступенчатой фиксации в любых крайних и промежуточных положениях, а также возможно бесступенчатое изменение диаметра дистального кольца за счет вращения червячного привода, что позволяет моделировать диаметр области СТС в диапазоне 25–40 мм. В процессе тестового позиционирования створок внутри сосудистого протеза возможно изменение положения точки коаптации створок, площади коаптации и выполнение гидравлических проб в условиях разных позиций створок относительно ФК АК и сосудистого протеза, а также различных диаметров на уровне ФК АК и СТС (25–40 мм). При достижении целевой позиции точки коаптации, площади коаптации и удовлетворительного результата гидравлической пробы створки с комиссурами фиксируются внутри протеза, нити-держалки удаляются из Т-образных вырезов, от стоек отсоединяется дистальное кольцо-измеритель, размыкается и снимается проксимальное кольцо-измеритель. Двенадцать П-образных швов, ранее проведенных через ВТЛЖ и проксимальную часть сосудистого протеза, завязываются.

### Обсуждение

В результате работы создан прототип нового устройства для клапаносберегающей хирургии

ВА, получен патент «Устройство для интраоперационного позиционирования створок аортального клапана при формировании проксимального анастомоза сосудистого протеза с выходным трактом левого желудочка в процессе протезирования корня аорты с сохранением аортального клапана методом реимплантации». Разработанное устройство обеспечивает хорошую экспозицию зоны хирургической коррекции и снижает вероятность повреждения структур корня аорты в процессе реимплантации, в особенности створок АК. Тестовое позиционирование на различных уровнях створок, помещенных в сосудистый протез, изменения диаметра сосудистого протеза на уровнях ФК АК и СТС упрощают контроль позиции точки коаптации, выбор протеза оптимального диаметра, а также позволяют выполнить гидравлические пробы в различных условиях. Разработанное устройство решает проблему невозможности адекватного тестирования функции реимплантированного АК до момента запуска кровотока и снятия зажима с аорты, устраняя риски осложнений при повторном пережатии аорты для коррекции резидуальной АР. Ожидается, что применение разработанного устройства улучшит воспроизводимость протезирования корня аорты с реимплантацией АК, снизит оператор-зависимость и повысит стандартизацию методики, что обеспечит возможность применения данного метода «средними» хирургами и приблизит сложность клапаносохраняющего протезирования корня аорты к операции изолированного протезирования АК. Направлениями дальнейшей работы являются совершенствование конструкции, в том числе изменение конструкции разъемных соединений и колец-измерителей, определение параметров безопасности и эффективности устройства для оптимизации клапаносохраняющей коррекции АР в эксперименте на крупных лабораторных животных.

### Заключение

Создано новое устройство для облегчения выполнения, воспроизводимости и стандартизации клапаносохраняющего протезирования АК. Полученные результаты позволяют облегчить и ускорить выполнение клапаносохраняющего протезирования корня и ВА, повысить воспроизводимость методики, снизить риски осложнений.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциально конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

**Благодарности / Acknowledgement**

Авторы благодарят Гурщенко А.В., к.м.н., доцента кафедры сердечно-сосудистой хирургии Института медицинского образования ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, за помощь в экспериментальной работе по моделированию и коррекции аортальной недостаточности. / The authors thank A. V. Gurshchenkov, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Cardiovascular Surgery, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre, for assistance in experimental work on modeling and correction of aortic regurgitation.

**Финансирование / Funding**

Работа выполнена в рамках плановой темы государственного задания «Разработка устройства для клапаносохраняющей коррекции аортальной недостаточности», номер ЕГИСУ 123021000152-9. / The work was performed within the framework of the planned topic of the state task “Development of a device for valve-sparing correction of aortic insufficiency”, EGISU number 123021000152-9.

**Список литературы / References**

1. Khubulava GG, Marchenko SP, Starchik DA, et al. Geometric and morphological features of the aortic root in norm and aortic regurgitation. *Xirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova=Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2018; 5:4–12. In Russian [Хубулава Г.Г., Марченко С.П., Старчик Д.А. и др. Геометрические и морфологические характеристики корня аорты в норме и при недостаточности аортального клапана. *Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова*. 2018; 5:4–12]. DOI: 10.17116/hirurgia201854-12.
2. Mazzolai L, Teixido-Tura G, Lanzi S, et al. 2024 ESC Guidelines for the management of peripheral arterial and aortic diseases. *European heart journal*. 2024; 45:36:3538–3700. DOI: 10.1093/eurheartj/ehae179.
3. Le Polain de Waroux JB, Pouleur AC, Goffinet C, et al. Functional anatomy of aortic regurgitation: accuracy, prediction of surgical reparability, and outcome implications of transesophageal echocardiography. *Circulation*. 2007; 116(11 Suppl):I264–9. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.680074.
4. El Khoury G, de Kerchove L. Principles of aortic valve repair. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2013; 145(3 Suppl): S26–9. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.11.071.
5. Bentall H, De Bono A. A technique for complete replacement of the ascending aorta. *Thorax*. 1968; 23:4:338–9. DOI: 10.1136/thx.23.4.338.
6. De Paulis R, Scaffa R, Salica A, et al. Biological solutions to aortic root replacement: valve-sparing versus bioprosthetic conduit. *Journal of visualized surgery*. 2018; 4:94. DOI: 10.21037/jovs.2018.04.12.
7. David TE, Feindel CM. An aortic valve-sparing operation for patients with aortic incompetence and aneurysm of the ascending aorta. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 1992; 103:4:617–21; discussion 622. DOI: 10.1016/s0003-4975(02)04135-8.
8. Fagan A, Pillai R, Radleysmith R, et al. Results of new valve conserving operation for treatment of aneurysms or acute dissection of aortic root. *Br Heart J*. 1983;49:302.
9. Hess PJ, Jr., Klodell CT, Beaver TM, et al. The Florida sleeve: a new technique for aortic root remodeling with preservation of the aortic valve and sinuses. *The Annals of thoracic surgery*. 2005; 80:2:748–50. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2004.02.092.
10. Ross DN. Replacement of aortic and mitral valves with a pulmonary autograft. *Lancet (London, England)*. 1967; 2:7523:956–8. DOI: 10.1016/s0140-6736(67)90794-5.
11. Chernyavsky AM, Khvan DS, Alsov SA, et al. Quality of life of patients with the ascending aorta aneurism after valve-sparing surgery. *Cardiology*. 2017; 57:9:47–52. In Russian [Чернявский А.М., Хван Д.С., Альсов С.А. и др. Качество жизни пациентов с аневризмой восходящего отдела аорты после клапаносохраняющих операций. *Кардиология*. 2017; 57:9:47–52]. DOI: 10.18087/cardio.2017.9.10017.
12. Arabkhani B, Klautz RJM, de Heer F, et al. A multicentre, propensity score matched analysis comparing a valve-sparing approach to valve replacement in aortic root aneurysm: Insight from the AVIATOR database. *European journal of cardio-thoracic surgery : official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery*. 2023; 63:2:ezac514. DOI: 10.1093/ejcts/ezac514.
13. Charchian ÉR, Belov IuV, Stepanenko AB, et al. Valve-sparing technique for type A aortic dissection with insufficiency of aortic valve. *Cardiology*. 2014; 6:91–6. In Russian [Чарчян Э.Р., Белов Ю.В., Степаненко А.Б. и др. Клапансберегающие операции при расслоении аорты А типа с аортальной недостаточностью. *Кардиология*. 2014; 6:91–6]. DOI: 10.18565/cardio.2014.6.91-96.
14. Mastrobuoni S, Govers PJ, Veen KM, et al. Valve-sparing aortic root replacement using the reimplantation (David) technique: a systematic review and meta-analysis on survival and clinical outcome. *Annals of cardiothoracic surgery*. 2023; 12:3: 149–58. DOI: 10.21037/acs-2023-avs1-0038.
15. Khvan DS, Sirota DA, Zhul'kov MO, et al. Remote results of Florida Sleeve technique in patients with ascending aortic aneurysms and aortic insufficiency. *Angiology and Vascular Surgery*. 2020; 26:4:108–118. In Russian [Хван Д.С., Сирота Д.А., Жульков М.О. и др. Отдаленные результаты методики Florida sleeve у пациентов с аневризмой восходящего отдела аорты и аортальной недостаточностью. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2020; 26:4:108–118]. DOI: 10.33529/ANGIO2020411.
16. Bokeria LA, Milievskaya EB, Pryanishnikov VV, et al. *Cardiovascular surgery—2022. Diseases and congenital*

anomalies of the circulatory system. Moscow: Bakoulev NMRC of CVS of the Ministry of Health of Russia. 2023: 344. In Russian [Бокерия Л.А., Милюевская Е.Б., Прянишников В.В. и др. Сердечно-сосудистая хирургия—2022. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения. М.: НМИЦ ССХ им. А. Н. Бакулева Минздрава России; 2023: 344].

17. Schafers HJ. Aortic valve repair: easy and reproducible? *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2015; 149:1:129–30. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2014.09.022.

18. Schafers HJ, Schmied W, Marom G, et al. Cusp height in aortic valves. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2013; 146:2:269–74. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.06.053.

19. Gordeev ML, Uspenskiĭ VE, Ibragimov AN, et al. Surgical treatment of ascending aortic aneurysms. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya xirurgiya* =Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery. 2016; 9:3:42–50. In Russian [Гордеев М.Л., Успенский В.Е., Ибрагимов А.Н. и др. Хирургическое лечение аневризм восходящего отдела аорты. Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2016; 9:3:42–50]. DOI: 10.17116/kardio20169342-50.

20. Boldyrev SĬu, Man'kov DR, Rossokha OA, et al. New device for forming of the proximal part of vascular graft for the aortic root reconstruction in patients with ascending aorta aneurysm and bundle. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya xirurgiya*=Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery. 2014; 7:1:41–43. In Russian [Болдырев С.Ю., Маньков Д.Р., Россиха О.А. и др. Новое устройство для формирования проксимальной части сосудистого протеза для реконструкции корня аорты у больных с аневризмой и расщеплением восходящей аорты. Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2014; 7:1:41–43].

21. David TE. Aortic valve-sparing operations. *Ann Thorac Surg*. 2024; 117:1:45–53. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2023.09.027.

22. Elibol A. A novel device for technical standardization of valve-sparing aortic root reimplantation. *Turk Gogus Kalp Damar Cerrahisi Derg*. 2020; 28:1:43–52. DOI: 10.5606/tgkdc.dergisi.2020.19182.

23. Love JW, Hanlon JG. Device and method for assessing the geometry of a heart valve. Patent #US 6598307 B2, 29.06.2003.

24. Paolitto A, Paquette J, Valentini V. Surgical tool for measurement of valve annulus and cusp geometry. Patent #US 8317696 B2, 27.11.2012.

25. Dobrilovich N. Heart valve sizing ring for valve-sparing aortic root remodeling procedures. Patent #US 10182913 B2, 22.01.2019.

26. Tyler B, Gullotti D, Mangraviti A, et al. Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced drug delivery reviews*. 2016; 107:163–75. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.018.

27. Yu C, Schimelman J, Wang P, et al. Photopolymerizable biomaterials and light-based 3D printing strategies for biomedical applications. *Chemical reviews*. 2020; 120:19:10695–10743. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00810.

28. Akimoto H, Tsuru Y, Yokoyama H, et al. Commissure holder: an innovative device for aortic valve-sparing technique. *The Annals of thoracic surgery*. 2001; 71:4:1380–1. DOI: 10.1016/s0003-4975(00)02451-6.

29. Jelenc M, Jelenc B, Knežević I, et al. New graft sizing rings for aortic valve reimplantation procedures. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*. 2018; 26:1:1–3. DOI: 10.1093/icvts/ivx257.

#### Информация об авторах:

Успенский Владимир Евгеньевич, д.м.н., заведующий научно-исследовательской лабораторией заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Торопова Яна Геннадьевна, д.б.н., заместитель директора по научной работе Института экспериментальной медицины ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Сапранков Валерий Леонидович, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Мазин Виктор Игоревич, очный аспирант кафедры сердечно-сосудистой хирургии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Минин Сергей Александрович, врач — анестезиолог-реаниматолог ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Гуськова Мария Владимировна, врач-стажер отделения сердечно-сосудистой хирургии № 1 ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Моисеева Ольга Михайловна, д.м.н., директор Института сердца и сосудов ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Гордеев Михаил Леонидович, д.м.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела кардиоторакальной хирургии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

#### Authors information:

Vladimir E. Uspensky, M.D., Dr. Habil., Head of the Research Laboratory of Aorta and Aortic Valve Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Yana G. Toropova, Dr. Habil., Deputy Director for Research, Institute of Experimental Medicine, Almazov National Medical Research Centre;

Valeriy L. Saprankov, M.D., Junior Researcher, Research Laboratory of Aorta and Aortic Valve Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Viktor I. Mazin, full-time postgraduate student of the Department of Cardiovascular Surgery, Almazov National Medical Research Centre;

Sergey A. Minin, anesthesiologist-intensive care specialist, Almazov National Medical Research Centre;

Maria V. Guskova, fellow of the cardiovascular surgery department No. 1, Almazov National Medical Research Centre;

Olga M. Moiseeva, M.D., Dr. Habil., Director of the Heart and Vessels Institute, Almazov National Medical Research Centre;

Mikhail L. Gordeev, M.D., Dr. Habil., Full Professor, Chief Researcher of the Research Department of Cardiothoracic Surgery, Almazov National Medical Research Centre.