

DOI: <https://doi.org/10.51922/2616-633X.2024.8.1.2187>

ВАРИАНТНАЯ АНАТОМИЯ ПОЛУЛУННЫХ ЗАСЛОНОК КЛАПАНА АОРТЫ И ЛЕГОЧНОГО СТВОЛА

А.А. Пасюк, Н.А. Трушель

УО «Белорусский государственный медицинский университет», Республика Беларусь, Минск
pasiuk@rambler.ru

УДК 611.126+611.131/132

Ключевые слова: полулунные заслонки, клапан аорты, клапан легочного ствола, анатомия человека.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ. А.А. Пасюк, Н.А. Трушель. Вариантная анатомия полулунных заслонок клапана аорты и легочного ствола. *Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски*, 2024, Т. 8, № 1, С. 2187–2192.

В статье представлены современные отечественные и зарубежные литературные данные о вариантной анатомии полулунных заслонок клапана аорты и легочного ствола. Показаны анатомические особенности, заключаются в различии вариантов строения и количества полулунных заслонок, асимметричности их строения, различии морфометрических характеристик. Уделено внимание изменению анатомической терминологии с 2019 года, в которой выделен клапанный комплекс сердца, состоящий из фиброзного скелета сердца, предсердно-желудочковых кла-

панов и корней аорты и легочного ствола. Показано, что в литературных источниках имеется небольшое количество данных о размерах и положении узелков полулунных заслонок клапана аорты и клапана легочного ствола. В статье уделено внимание частоте встречаемости отверстий и их морфометрическим характеристикам в полулунных заслонках изучаемых клапанов. Представлены гистологические особенности полулунных заслонок, проявляющиеся в их утолщении и изменении клеточного и волокнистого состава в зависимости от возраста человека.

VARIANT ANATOMY OF THE SEMILUNAR LEAFLETS OF THE AORTIC AND PULMONARY VALVES BASED

H.A. Pasiuk, N.A. Trushel

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

Key words: semilunar leaflets, aortic valves, pulmonary valve, human anatomy.

FOR REFERENCES. H.A. Pasiuk, N.A. Trushel. Variant anatomy of the semilunar leaflets of the aortic and pulmonary valves based. *Neotlozhnaya kardiologiya i kardiovaskulyarnye riski* [Emergency cardiology and cardiovascular risks], 2024, vol. 8, no. 1, pp. 2187–2192.

The article presents contemporary domestic and foreign literature data on the variant anatomy of the aortic and pulmonary semilunar leaflets. The anatomical features shown include the differences in the structure and number of semilunar leaflets, of their structural asymmetry, and the variation in morphometric characteristics. Attention is given to the changes in anatomical terminology since 2019, which now distinguishes the valvular complex of the heart, consisting of the fibrous skeleton of the heart, atrioventricular

valves, and the roots of the aorta and pulmonary trunk. It is shown that there is a limited amount of data in the literature regarding the sizes and positions of nodules on the semilunar leaflets of the aortic and pulmonary valves. The article focuses on the prevalence of openings and their morphometric characteristics in the semilunar leaflets of the studied valves. Histological features of the semilunar leaflets are presented, which include thickening and changes in cellular and fibrous composition depending on the age of the individual.

Исследованию клапанного аппарата сердца посвящено много отечественных и зарубежных работ [1–3]. В ранних источниках литературы клапан аорты (КА) и клапан легочного ствола (КЛС) рассматривались как структурные части желудочков, включающие полулунные заслонки, узелки и луночки полулунных заслонок. В последние годы показано участие большого комплекса структур, препятствующего обратному току крови. Современный структурно-функциональный взгляд нашел отражение в новой анатомической терминологии (*Terminalogia Anatomica*) 2019 года, где отдельным разделом выделен клапанный комплекс сердца, состоящий из фиброзного скелета сердца, предсердно-желудочковых клапанов, корней аорты и легочного ствола. В состав корня аорты и корня легочного ствола входит соответствующий клапан, а также синусы, межзаслоночные треугольники и надклапанный гребень [4]. Таким образом, КА и КЛС представляет собой сложную структуру, все части которой функционируют вместе, обеспечивая правильную работу сердца. Полулунные заслонки КА и КЛС являются наиболее важным элементом и вызывают особый интерес у врачей, морфологов и физиологов.

Актуальность исследования строения и функции полулунных заслонок КА и КЛС обусловлена большой частотой встречаемости сердечно-сосудистых заболеваний, среди которых особое место занимают врожденные и приобретенные пороки упомянутых клапанов. Основными функциональными проявлениями при этих пороках являются стеноз и недостаточность клапана. Пороки КЛС чаще встречаются при врожденных аномалиях сердца, и часто в сочетании с другими аномалиями. В странах с высоким уровнем дохода среди причин формирования приобретенных пороков клапанов сердца преобладают дегенеративные изменения как последствия инфекционного эндокардита, а в странах с низким доходом доминируют ревматические поражения. По данным исследования «Euro Heart Survey on VHD» 2005 года среди всех приобретенных клапанных пороков наиболее часто (44,3%) регистрировалось поражение КА [5, 6].

Исследование строения клапанов аорты и легочного ствола обусловлено необходимостью знаний о вариантах анатомии и морфометрических особенностях ПЗ в связи с использованием этих знаний при оперативных вмешательствах на сердце человека при замене или создании новых ПЗ. История оперативных вмешательств на клапанах сердца прошла несколько этапов: от попыток использования подручных средств в целях уменьшения выраженности порока до внедрения в практику рентгенэндоваскулярных техник [6–8]. Одним из направлений рекон-

структивных операций на полулунных клапанах сердца является операция Ozaki S., внедрившего методику восстановления клапана аорты из аутоперикарда. Ее возможно применять при широком спектре заболеваний КА. Оригинальный метод Ozaki заключается в иссечении створок патологического клапана, выкраивании неостворок из аутоперикарда, фиксированного в 0,6% растворе глутарового альдегида. Авторы считают, что независимая замена створок более эффективна в сохранении естественных движений кольца КА и координации между работой левого желудочка, кольцом аорты и синусами Вальсальвы. [8]. В дальнейшем данный метод был предложен и для реконструктивных операций на КЛС [9]. В связи с вышесказанным, знания о размерах, возрастных и половых особенностях ПЗ клапанов аорты и легочного ствола могут быть полезны в практическом здравоохранении.

При выявлении вариантов числа полулунных заслонок клапана аорты встречаются варианты с одной (0,01%), двумя (0,9–2,5%) и четырьмя полулунными заслонками (0,013–0,043%). Общеупотребимыми терминами в отношении количества полулунных заслонок являются: одностворчатые, двустворчатые, трёхстворчатые и четырёхстворчатые клапаны. Одностворчатый КА встречается редко, и чаще связан с другими врожденными пороками развития левых отделов сердца. Он возникает в результате не разделения полулунных заслонок к моменту рождения. Одиночная заслонка прикреплена по окружности сосуда, как купол, вокруг эксцентрично расположенного отверстия аорты. Обычно на артериальной поверхности у основания купола можно обнаружить три неглубоких шва.

Двустворчатый клапан состоит из двух ПЗ. Чаще всего размеры одной из заслонок преобладают над второй. Более крупная заслонка имеет срединный шов как результат неполного разделения или сращения в эмбриональном развитии. В 59% наблюдают слияние коронарных заслонок, в 37% – правой коронарной и некоронарной заслонок, в 4% – левой коронарной и некоронарной заслонки. Реже заслонки имеют одинаковый размер и срединный шов отсутствует [10, 11]. По данным литературы [10–14], морфология двустворчатого КА разнообразна. Морфологическими признаками приобретенного двустворчатого клапана является наличие псевдоспайки, которая достигает синугублярного соединения, трёх межзаслоночных треугольников и трёх синусов. Межзаслоночный треугольник под линией слияния может быть почти такой же высоты, как и другие треугольники. При врожденной аномалии двустворчатого АК имеются две почти равные заслонки, два синуса и два треугольника

между заслонками [11, 12]. ПЗ двустворчатого клапана расположены либо в переднезадней, либо в лево-правой ориентации. Чаще встречается переднезадний вариант, встречающийся в 79% случаев, при этом обе коронарные артерии берут начало от переднего синуса, имеющего шов [14].

Четырехстворчатый КА встречается крайне редко и обычно сопряжен с регургитацией крови, склонен к срастанию полулунных заслонок и кальцификации. При четырехстворчатом КА в дополнение к трём нормальным полулунным заслонкам имеется дополнительная, расположенная между правой коронарной и некоронарной заслонками [15].

При выявлении аномалий развития ПЗ клапана легочного ствола установлено, что наиболее часто встречается наличие четырёх заслонок [16]. Четырёхстворчатый клапан встречается по данным аутопсий в 1 случае на 400–2000 вскрытий. Соотношение мужчин к женщинам составляет 2:1. Как правило, сочетается с пороками развития КА из-за общности эмбрионального развития [16].

В полулунной заслонке клапанов аорты и легочного ствола выделяют два края: свободный и фиксированный. На свободном крае ПЗ обоих клапанов находится зона смыкания, известная как луночка ПЗ, занимающая всю ширину свободного края и занимающая примерно одну треть глубины заслонки. В средней части луночки на её желудочковой поверхности образуется утолщение – узелок ПЗ (Аранция). Фиксированный край полулунной заслонки прикрепляется по линии параболической формы к стенке артерии достигая сверху надклапанного гребня, а книзу опускается немного ниже желудочко-артериального соединения. Область, в которой проксимальные концы фиксированных краев соседних полулунных заслонок почти соприкасаются называется комиссура ПЗ.

Каждая ПЗ имеет две поверхности: артериальную и желудочковую. Артериальная поверхность, шероховатая, обращена в просвет аорты или легочного ствола и испытывает большую нагрузку при диастоле желудочков. Желудочковая поверхность гладкая, обращена в желудочек, и испытывает большее давление при систоле. Обе поверхности покрыты эндотелием. Основа заслонки состоит из нескольких слоёв. В более старых литературных источниках описывались два слоя соединительной ткани: плотный фиброзный на желудочковой стороне ПЗ и более рыхлый губчатый на артериальной стороне [17]. В современных работах показано трехслойное строение ПЗ: помимо фиброзного и губчатого слоев, существует желудочковая зона, представленная эластическими волокнами [18]. Таким образом, основа ПЗ состоит из трех слоев: желудочковый слой состоит из более рыхлой соединительной ткани, бо-

гатой эластином и протеогликанами; губчатый слой преимущественно состоит из протеогликанов; и фиброзный слой находится на артериальной стороне ПЗ, содержит главным образом коллагеновые волокна с небольшим количеством эластина [19, 20, 21]. В фиброзном слое ПЗ пучки коллагена располагаются циркулярно, параллельно свободному краю ПЗ, обеспечивая волнистость артериальной поверхности ПЗ. В области прикрепления ПЗ выявляются радиальные коллагеновые волокна. Что объясняет меньшую растяжимость ПЗ в циркулярном направлении, и относительно большую в радиальном. В области узелка ПЗ желудочковый слой утолщается, где он представляет собой массу эластичной ткани [22].

Выделяют следующие возрастные типы строения ПЗ клапанов аорты и легочного ствола: [23] а). ПЗ клапана аорты и легочного ствола сердца новорожденных, детей грудного возраста и детей от 1 года до 12 лет, состоящие из плотной волокнистой оформленной и рыхлой волокнистой неоформленной соединительной ткани, в межклеточном веществе которой располагаются многочисленные аргирофильные или коллагеновые волокна, незначительное число клеток (фибробластов, фиброцитов), а также волокна сердечной поперечнополосатой мышечной ткани в основании клапанов; б) ПЗ клапана аорты и легочного ствола сердца подростков и юношей, состоящие из плотной волокнистой оформленной и рыхлой волокнистой неоформленной соединительной ткани, в межклеточном веществе которой имеются многочисленные эластические волокна, немногочисленные клетки (фибробласты, фиброциты, гистиоциты) и волокна сердечной поперечнополосатой мышечной ткани в основании клапанов; в) ПЗ клапана аорты и легочного ствола людей зрелого возраста, состоящие главным образом из плотной волокнистой оформленной соединительной ткани с наличием в основании клапанной небольшого количества основного вещества, немногочисленных клеток (фибробластов, гистиоцитов), гладкой мышечной ткани, а также волокон сердечной поперечнополосатой мышечной ткани [23].

С увеличением возраста наблюдается грубение волокон соединительной ткани, как коллагеновых, так и эластических, а также уменьшение количества рыхлой волокнистой неоформленной соединительной ткани (развивается склероз ткани створок предсердно-желудочковых клапанов и полулунных заслонок клапанов аорты и легочного ствола) [24]. Уменьшается протяженность волокон сердечной поперечнополосатой мышечной ткани, следовательно снижаются ее количество и число проникающих в клапаны кровеносных сосудов. В то же время,

местная или системная микроангиопатия (сахарный диабет, артериальная гипертензия), способны в свою очередь определять нарушение трофики ткани клапанов. В связи с указанными изменениями клапаны теряют свои эластические и упругие свойства, что оказывает влияние на механизм смыкания створок и гемодинамику [24]. Также уменьшается количество клеточных элементов в ПЗ [25]. У пациентов старше 65 лет выявляются дальнейшие дегенеративные изменения ПЗ, проявляющиеся в кальцификации преимущественно фиброзного слоя ПЗ. Stradins P. и др., изучавшие биомеханические свойства ПЗ, показали, что упругость ПЗ клапанов легочного ствола и аорты существенно не отличаются друг от друга при радиальном растяжении (0.29 ± 0.06 и 0.32 ± 0.04 МПа, соответственно), но различается при циркулярном растяжении (2.78 ± 1.05 и 1.74 ± 0.29 МПа, соответственно). Средняя толщина ПЗ клапана аорты составляет $0,605 \pm 0,196$ мм. Средняя толщина ПЗ клапана легочной ствола равна $0,397 \pm 0,114$ мм [26]. Толщина ПЗ у взрослых в области луночек меньше, чем в основной части ПЗ. Толщина заслонок КА больше, чем КЛС.

По результатам исследователей очень разнятся данные о размерах ПЗ. Большинство исследователей отмечают, что ПЗ КА не равны по размерам [27]. По данным М.А. Silver только в 16% случаев выявляются одинакового размера ПЗ КА (разница в площади между створками менее 5%); в 51% наблюдений одна ПЗ отличается по размеру от двух других, а в 33% случаев – все три ПЗ имеют разный размер [28].

Данные научной литературы относительно длины свободного края ПЗ КА у взрослых людей варьируют: правая заслонка – от 25 до 33 мм, левая – от 22,5 до 31,5 мм, задняя – от 26 до 32,7 мм. Высота ПЗ у взрослых людей колеблется от 13,3 до 15 мм. Длина фиксированного края ПЗ КА составляет $34,3 \pm 3,1$ мм [29]. Subramanian S. et. al, изучая связь между диаметром луковички аорты и размерами ПЗ выявили сильную корреляционную связь между межкомиссуральным расстоянием и другими размерами для каждой ПЗ в отдельности [30].

Vollebergh F.E., Becker A.E. обнаружили, что правая ПЗ КА была самой большой, тогда как позже Sliver M.A., Roberts W.C., используя планиметрические измерения, показали, что задняя некоронарная ПЗ имела наибольшую площадь [30, 31]. Длина фиксированного края ПЗ больше у левой полулунной заслонки КА. По данным исследователей задняя (некоронарная) заслонка КА самая большая, а правая – наименьшая. КА характеризуется большей длиной свободного края и высотой задней ПЗ [29, 33, 34].

Относительно клапана легочного ствола Вое В.А. выделил следующие типы: симметричный трехстворчатый (47%); асимметричный трехстворчатый с одной малой ПЗ (32%); трехстворчатый асимметричный с одной крупной ПЗ (16%); одна рудиментарная створка в почти двустворчатом клапане (5%) [35]. Имеются данные о том, что длина передней заслонки КЛС больше других [33].

По результатам исследования особенностей строения КА в зависимости от пола человека, чаще выявлялись различия относительно размеров «корня аорты», а именно: более высокие и тяжелые люди имели больший диаметр кольца КА и длины синусов Вальсальвы. У мужчин больше выражена длина свободного края и высота задней ПЗ. Также отмечается, что возрастные изменения ПЗ КА у мужчин более выражены.

Относительно половых отличий отмечается, что размеры ПЗ клапана аорты и легочного ствола от пола зависят в меньшей степени, чем от площади поверхности тела. Относительно возрастных изменений указывается, что у мужчин возрастные изменения размеров ПЗ более выражены по сравнению с женщинами. Из наиболее выраженных возрастных изменений ПЗ отмечено увеличение высоты задней ПЗ клапана аорты и высоты передней ПЗ клапана легочного ствола [36].

Как известно, с возрастом человека происходит изменения формы луковички аорты, расширение синотубулярного соединения, увеличивается площадь ПЗ КА. Зачастую такие изменения сложно дифференцировать от явлений индивидуальной анатомической изменчивости [32, 36].

При изучении плотности и эластичности полулунных заслонок установлено, что плотность ПЗ КА значительно увеличивается с возрастом человека. Растяжимость ПЗ клапана аорты уменьшалась как в циркулярном, так и в радиальном направлении. В заслонках КЛС наблюдалось увеличение плотности ПЗ при низкой радиальной и циркулярной растяжимости. В обоих клапанах и во всех возрастных периодах человека растяжимость ПЗ в циркулярном направлении была ниже, чем в радиальном что объясняется преимущественно циркулярным направлением соединительнотканых волокон в ПЗ [25]. При исследовании распределения нагрузки на ПЗ КА во время диастолы показали, что напряжение является самым высоким в паракомиссурных областях свободного края ПЗ [39, 40].

Для ПЗ КА и КЛС характерно наличие в них отверстий, которые выявляются в луночках ПЗ. В подавляющем большинстве случаев отверстия в ПЗ располагаются преимущественно у свободного края в комиссуральной зоне. Обычно отверстия ПЗ распо-

лагаются выше линии смыкания при закрытом положении клапана и не приводят к обратному току крови. Однако более крупные отверстия, выходящие за пределы зон смыкания, могут привести к значительной регургитации крови [38]. По данным литературы частота встречаемости фенестр полулунных заслонок варьирует в диапазоне от 25 до 72% случаев. Наиболее часто отверстия в ПЗ встречаются в левых, реже в правой и задней ПЗ КА. Таким же образом распределялась и площадь выходящих отверстий ПЗ. Отверстия в ПЗ КА наблюдались во всех возрастных группах, однако их размеры увеличиваются с возрастом человека [41]. Частота встречаемости отверстий в ПЗ КА приблизительно равна частоте встречаемости отверстий в ПЗ КЛС [42].

В литературе мало данных о размерах и положении узелков ПЗ. Sahasakul et al. обнаружили увеличение толщины узелка ПЗ с возрастом человека, которое становится более выраженным после 50 лет, при этом узелок по размеру в два раза толще луночки [38]. По данным одних исследователей узелки чаще располагаются по центру ПЗ, однако по данным других – они в большинстве случаев смещены от середины заслонки. При этом, на ПЗ КА узелки чаще всего смещены вправо, а на ПЗ КЛС – влево [43]

Относительно частоты встречаемости и выраженности узелков ПЗ указывается, что

узелки чаще всего были отмечены на задней заслонке КА, реже – на левой ПЗ этого клапана. Что касается выраженности узелков КЛС, то хуже всего были развиты на левой его заслонке [44].

Таким образом, анализ данных литературы показал, что полулунные заслонки клапана аорты и легочного ствола характеризуются анатомическими и гистологическими особенностями в зависимости от возраста и пола человека. Анатомические особенности заключаются в различии вариантов строения и количества ПЗ изучаемых клапанов, асимметричности их строения, различии морфометрических характеристик ПЗ и их образований (луночек, узелков), наличии отверстий в ПЗ. Гистологические особенности характеризуются возрастными изменениями ПЗ, проявляющимися в их утолщении, изменении клеточного и волокнистого состава. Однако не смотря на большое количество работ за последние десятилетия, анализ полученных литературных данных свидетельствует о том, что до сих пор нет единого мнения о размерах ПЗ клапанов легочного ствола и аорты, об изменении морфометрических характеристик клапанных структур в зависимости от возраста человека.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения спонсорской помощи.

Конфликт интересов. Нет.

REFERENCE

- Mikhailov S.S. *Klinicheskaya anatomiya serdtsa* [Clinical anatomy of the heart]. M.: Meditsina, 1987, 288 p. (in Russian).
- Bokeriya L.A., Gudkova R.G. *Serdechno-sosudistaya khirurgiya – 2013. Bolezni i vrozhdennye anomalii sistemy krovoobrashcheniya* [Cardiovascular surgery – 2013. Diseases and congenital anomalies of the circulatory system]. M.: NTsSSKh im. A.N. Bakuleva, 2014, 220 p. (in Russian).
- Thubrikar M. *The Aortic Valve* (1st ed.). New York : Routledge, 2011. doi: 10.4324/9780203737163
- FIPAT. *Terminologia Anatomica*. 2nd ed. FIPAT.library.dal.ca. Federative International Programme for Anatomical Terminology, 2019.
- Coffey S., Roberts-Thomson R., Brown A. et al. Global epidemiology of valvular heart disease. *Nat Rev Cardiol*, 2021, vol. 18, pp. 853–864. doi: 10.1038/s41569-021-00570-z.
- Komarov R.N., Katkov A.I., Puzenko D.V. et al. Khirurgiya kornya aorty i aortalnogo klapana: istoriya i sovremennost [Surgery of the aortic root and aortic valve: history and modernity]. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya*, 2019, vol. 23(4), pp. 9–25. doi: 10.21688/1681-3472-2019-4-9-25. (in Russian).
- Hribernik I., Thomson J., Ho A. et al. Comparative analysis of surgical and percutaneous pulmonary valve implants over a 20-year period. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2022, vol. 61(3), pp. 572–579. doi: 10.1093/ejcts/ezab368.
- Ozaki S., Kawase I., Yamashita H. et al. A total of 404 cases of aortic valve reconstruction with glutaraldehyde-treated autologous pericardium. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, vol. 147(1), pp. 301–306. doi: 10.1016/j.jtcvs.2012.11.012.
- Baird C. W., Cooney B., Chávez M. et al. Congenital aortic and truncl valve reconstruction using the Ozaki technique: Short-term clinical results. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, vol. 161(5), pp. 1567–1577. doi: 10.1016/j.jtcvs.2020.01.087.
- Mathieu P., Bossé Yo., Huggins G. S. et al. The pathology and pathobiology of bicuspid aortic valve: State of the art and novel research perspectives. *J Pathol Clin Res*, 2015, pp. 1(4):195–206. doi:10.1002/cjp2.21.
- Edwards J.E. The congenital bicuspid aortic valve. *Circulation*, 1961, vol. 23, pp. 485–488. doi: 10.1161/01.cir.23.4.485.
- Roberts W.C. The congenitally bicuspid aortic valve. A study of 85 autopsy cases. *Am J Cardiol*, 1970, vol. 26(1), pp. 72–83. doi: 10.1016/0002-9149(70)90761-7.
- Davies M.J. *Pathology of Cardiac Valves*. London: Butterworths & Co, 1980, pp. 1–61.
- Roberts W.C. The congenitally bicuspid aortic valve. A study of 85 autopsy cases. *Am J Cardiol*, 1970, vol. 26(1), pp. 72–83. doi: 10.1016/0002-9149(70)90761-7.
- Hurwitz L.E., Roberts W.C. Quadricuspid semilunar valve. *Am J Cardiol*, 1973, vol. 31(5), pp. 623–626. doi: 10.1016/0002-9149(73)90332-9.
- Jung S.-Y. Quadricuspid pulmonary valve in an adult patient identified by transthoracic echocardiography and multi-detector computed tomography. *Hellenic J Cardiol*, 2015, vol. 56, pp. 266–268.
- Hurle J.M., Colvee E. Changes in the endothelial morphology of the developing semilunar heart valves. A TEM and SEM study in the chick. *Anat Embryol (Berl)*, 1983, vol. 167(1), pp. 67–83. doi: 10.1007/BF00304601.
- Fallahiazouard E., Ahmadipourrouposht M., Idris A., Yusof N.M. A review of: application of synthetic scaffold in tissue engineering heart valves. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2015, vol. 48, pp. 556–565. doi: 10.1016/j.msec.2014.12.016.
- Sacks M.S., Smith D.B., Hiester E.D. The aortic valve microstructure: effects of transvalvular pressure. *J Biomed Mater Res*, 1998, vol. 41, pp. 131–141. doi: 10.1002/(SICI)1097-4636(199807)41:1<131::aid-jbm16>3.0.co;2-q.
- Gould S.T., Srigunapalan S., Simmons C.A., Anseth K.S. Hemodynamic and cellular response feedback in calcific aortic valve disease. *Circ Res*, 2013, vol. 113(2), pp. 186–197. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.112.300154.
- Yin Yip C.Y., Simmons C.A. The aortic valve microenvironment and its role in calcific aortic valve disease. *Cardiovasc Pathol*, 2011, vol. 20, pp. 177–182. doi: 10.1016/j.carpath.2010.12.001.

22. Scott M., Vesely I. Aortic valve cusp microstructure: the role of elastin. *Ann Thorac Surg*, 1995, vol. 60(2 Suppl), pp. S391-394. doi: 10.1016/0003-4975(95)00263-k.
23. Kulchitskii K.I., Sokolov V.V., Marushchenko G. N. *Klapany serdtsa* [Heart valve]. Kiev: Zdorove, 1990, 184 s. (in Russian).
24. Kilessa V. V., Kilessa G. S. Klapannyi apparat serdtsa - ot anomalii do porokov [Valvular apparatus of the heart - from anomalies to valvular heart disease] *Krymskii terapevticheskii zhurnal*, 2012, vol. 2(19), pp. 12-16. (in Russian).
25. van Geemen D., Soares Ana L.F., Oomen Pim J.A. et al. Age-dependent changes in geometry, tissue composition and mechanical properties of fetal to adult cryopreserved human heart valves. *PLoS One*, 2016, vol. 11(2), pp. e0149020. doi: 10.1371/journal.pone.0149020.
26. Stradins P., Lacinis R., Ozolanta I. et al. Comparison of biomechanical and structural properties between human aortic and pulmonary valve. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2004, vol. 26(3), pp. 634-639. doi: 10.1016/j.ejcts.2004.05.043.
27. Roberts W.C. The structure of the aortic valve in clinically isolated aortic stenosis: an autopsy study of 162 patients over 15 years of age. *Circulation*, 1970, vol. 42(1), pp. 91-97. doi: 10.1161/01.cir.42.1.91.
28. Silver M.A., Roberts W.C. Detailed anatomy of the normally functioning aortic valve in hearts of normal and increased weight. *Am J Cardiol*, 1985, vol. 55(4), pp. 454-461. doi: 10.1016/0002-9149(85)90393-5.
29. De Kerchove L., Momeni M., Aphram G. et al. Free margin length and coaptation surface area in normal tricuspid aortic valve: an anatomical study. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2018, vol. 53(5), pp. 1040-1048. doi: 10.1093/ejcts/ezx456.
30. Subramanian S., Tikhomirov V., Bharati S. et al. Relationship of Normal Aortic Valve Cusp Dimensions: A Tool to Optimize Cusp Reconstruction Valvuloplasty. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*, 2016, vol. 28(2), pp. 521-527. doi: 10.1053/j.semtcvs.2015.08.005.
31. Vollebergh F.E., Becker A.E. Minor congenital variations of cusp size in tricuspid aortic valves. Possible link with isolated aortic stenosis. *Br Heart J*, 1977, vol. 39(9), pp. 1006-1011. doi: 10.1136/hrt.39.9.1006.
32. Sliver M.A., Roberts W.C. Detailed anatomy of the normally functioning aortic valve in hearts of normal and increased weight. *Am J Cardiol*, 1985, vol. 55(4), pp. 454-461. doi: 10.1016/0002-9149(85)90393-5.
33. Ivanov V.A. Osobennosti stroeniya serdtsa i ego otdelnykh struktur u prakticheskii zdorovykh lits v zavisimosti ot ikh polovoi prinadlezhnosti [Gender-oriented approach to the study of the anatomy of a healthy heart and its particular elements]. *Astrakhanskii meditsinskii zhurnal*, 2015, vol. 10(2), pp. 51-56. (in Russian).
34. Kunzelman K.S., Grande K.J., David T.E. et al. Aortic root and valve relationships. Impact on surgical repair. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 1994, vol. 107(1), pp. 162-170.
35. Boe B., Cheatham S.L., Armstrong A.K. et al. Leaflet morphology classification of the Melody transcatheter pulmonary valve. *Congenit Heart Dis*, 2019, vol. 14(2), pp. 297-304. doi: 10.1111/chd.12728.
36. Odinkova S.N., Nikolenko V.N., Komarov R.N. et al. Korrelyatsii morfometricheskikh parametrov struktur kornya aorty, imeyushchie prakticheskoe znachenie v khirurgicheskoi korrektsii aortalnogo klapana [The correlations of morphometric parameters of structures of the aortic root having practical significance in the surgical correction of the aortic valve]. *Morfologicheskie vedomosti*, 2020, vol. 28(1), pp. 30-36. doi: 10.20340/mv-mn.2020.28(1):30-36. (in Russian).
37. Ivanov V. A. Osobennosti stroeniya i korrelyatsionnye svyazi lineinykh razmerov klapannogo apparata serdtsa u muzhchin i zhenshchin zrelogo vozrasta [Structural features and correlation of linear dimensions of the valvular apparatus of the heart in men and women of mature age]. *Forcipe*, 2020, vol. 3(52), pp. 36-40. (in Russian).
38. Sahasakul Y., Edwards W.D., Naessens J.M., Tajik A.J. Age-related changes in aortic and mitral valve thickness: implications for two-dimensional echocardiography based on autopsy study of 200 normal human hearts. *Am J Cardiol*, 1988, vol. 62(7):424-430. doi: 10.1016/0002-9149(88)90971-x.
39. Gnyaneshwar R., Kumar R., Balakrishnan K. Dynamic analysis of the aortic valve using a finite element model. *Ann Thorac Surg*, 2002, vol. 73(4), pp. 1122-1129. doi: 10.1016/s0003-4975(01)03588-3.
40. Schäfers H., Bierbach B., Aicher D. A new approach to the assessment of aortic cusp geometry. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2006, vol. 132(2), pp. 436-438. doi: 10.1016/j.jtcvs.2006.04.032.
41. Dudkiewicz D., Zhingre Sanchez J.D., Holda J. et al. Aortic valve fenestrations: Macroscopic assessment and functional anatomy study. *Clin Anat*, 2023, vol. 36(4), pp. 612-617. doi: 10.1002/ca.24002.
42. Foxe A.N. Fenestrations of the semilunar valves. *Am J Pathol*, 1929, vol. 5(2), pp. 179-182.
43. Volodko A. V., Kazachenok Ya. A. *Vozrastnye osobennosti klapanov aorty i legochnogo stvola cheloveka* [Age-related features of human aortic valves and pulmonary trunk]. M., 2021. (in Russian).
44. Barkina MA, Demidov VO, Gaponov AA. Morfometriya klapanov aorty i legochnogo stvola [Morphometry of the aortic and pulmonary valves]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*, 2023, vol. 3, pp. 82-88. (in Russian).

Поступила: 22.02.2024