Оперативная хирургия и клиническая анатомия
(Пироговский научный журнал)
2026, Т. 10, №2-2, с. 116–126
https://doi.org/10.17116/operhirurg202610022116

Russian Journal of Operative Surgery
and Clinical Anatomy
2026, vol. 10, no. 2-2, pp. 116–126
https:///doi.org/10.17116/operhirurg202610022116

Анатомия и математическое моделирование нормального митрального клапана: современное состояние проблемы. (Обзор литературы)

© Роман Николаевич Комаров, Сергей Сергеевич Дыдыкин, Илья Михайлович Васалатий, Наргиза Мустафаевна Бабакулова, Екатерина Сергеевна Першина, Никита Егорович Дружинин, Shikha Chauhan, Ольга Викторовна Дракина

ФГАОУ ВО «Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Клапанные пороки сердца — одни из самых распространенных заболеваний сердца, их доля ежегодно продолжает увеличиваться, что связано с общемировым глобальным ростом продолжительности жизни населения Земли. Анатомия и физиология атриовентрикулярных клапанов сердца, в частности митрального клапана, сложны и изучались на протяжении прошлого века. Весь этот материал послужил базой для построения математических и более сложных компьютерных моделей на современном этапе развития науки в области изучения функции и механизма работы митрального клапана. В последние десятилетия математическим моделированием работы отдельных структур митрального клапана в различные фазы сердечного цикла занимаются ученые в разных частях мира. Попытки компьютерного моделирования, направленные на объединение математического описания функций разных составных частей митрального клапана, также ведутся, однако крайне сложны и требуют мультидисциплинарного подхода: привлечения не только кардиохирургов, но и кардиологов, специалистов ультразвуковой диагностики, а также математиков и целых лабораторий математического моделирования. Разработки зарубежных специалистов и создание отечественной версии программного обеспечения — «виртуального двойника митрального клапана», безусловно, сможет помочь в дальнейшей разработке методов лечения — открытых и интервенционных операций на митральном клапане сердца: от транскатетерных процедур типа MitraClip до открытого хирургического лечения, особенно реконструктивных пластических операций на клапане сердца.

Ключевые слова: *анатомия митрального клапана, математическое моделирования структур митрального клапана, компьютерное моделирования митрального клапана, физиология митрального клапана.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Комаров Р.Н. — https://orcid.org/0000-0002-3904-6415
Дыдыкин С.С. — https://orcid.org/0000-0002-1273-0356
Васалатий И.М. — https://orcid.org/0000-0001-5830-0127
Бабакулова Н.М. — https://orcid.org/0000-0002-8740-9575
Першина Е.С. — https://orcid.org/0000-0002-3952-6865
Дружинин Н.Е. — https://orcid.org/0009-0006-8534-9827
Chauhan Shikha — https://orcid.org/0009-0000-1193-1802
Дракина О.В. — https://orcid.org/0000-0002-1038-2589
Автор, ответственный за переписку: Дракина О.В. — e-mail: odrakina@mail.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Комаров Р.Н., Дыдыкин С.С., Васалатий И.М., Бабакулова Н.М., Першина Е.С., Дружинин Н.Е., Chauhan Shikha, Дракина О.В. Анатомия и математическое моделирование нормального митрального клапана: современное состояние проблемы. (Обзор литературы). *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)*. 2026;10(2-2):116–126. https://doi.org/10.17116/operhirurg202610022116

Anatomy and mathematical modeling of the normal mitral valve: current state of the art. (Literature review)

© R.N. Komarov, S.S. Dydykin, I.M. Vasalatii, N.M. Babakulova, E.S. Pershina, N.E. Druzhinin, Shikha Chauhan, O.V. Drakina

Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

ABSTRACT

Valvular heart defects are among the most common heart diseases, and their incidence continues to increase annually due to the global increase in life expectancy. The anatomy and physiology of the atrioventricular valves, and the mitral valve in particular, are complex and have been studied over the past century. All this material has served as the basis for the construction of mathematical and, more complex, computer models in the current stage of scientific advancement in the study of the function and mechanism of the mitral valve. In recent decades, scientists around the world have been mathematically modeling the func-

tion of individual mitral valve structures during various phases of the cardiac cycle. Computer modeling efforts aimed at unifying the mathematical description of the functions of the various components of the mitral valve are also ongoing; however, they are extremely complex and require a multidisciplinary approach: involving not only cardiac surgeons but also cardiologists, ultrasound specialists, mathematicians, and entire mathematical modeling laboratories. The development of foreign specialists and the creation of a domestic version of the software — "virtual twin of the mitral valve" will undoubtedly be able to assist in the further development of treatment methods for open and interventional surgeries on the mitral valve of the heart: from transcatheter procedures such as MitraClip to open surgical treatment, especially reconstructive plastic surgery on the heart valve.

Keywords: *anatomy of the mitral valve, mathematical modeling of the mitral valve structures, computer modeling of the mitral valve, physiology of the mitral valve.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Komarov R.N. — https://orcid.org/0000-0002-3904-6415
Dydykin S.S. — https://orcid.org/0000-0002-1273-0356
Vasalatii I.M. — https://orcid.org/0000-0001-5830-0127
Babakulova N.M. — https://orcid.org/0000-0002-8740-9575
Pershina E.S. — https://orcid.org/0000-0002-3952-6865
Druzhinin N.E. — https://orcid.org/0009-0006-8534-9827
Chauhan Shikha— https://orcid.org/0009-0000-1193-1802
Drakina O.V. — https://orcid.org/0000-0002-1038-2589
Corresponding author: Drakina O.V. — e-mail: odrakina@mail.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Komarov RN, Dydykin SS, Vasalatii IM, Babakulova NM, Pershina ES, Druzhinin NE, Chauhan Shikha, Drakina OV. Anatomy and mathematical modeling of the normal mitral valve: current state of the art. (Literature review). *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy*. 2026;10(2-2):116–126. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/operhirurg202610022116

Введение

Патология сердечно-сосудистой системы занимает лидирующее положение в структуре заболеваемости и смертности людей во всем мире [1—3]. При этом клапанные пороки сердца являются одними из самых распространенных заболеваний сердца, и их доля ежегодно продолжает увеличиваться. Эта тенденция напрямую связана с общемировым глобальным ростом продолжительности жизни населения Земли [4]. Что касается приобретенных пороков сердца, есть четкая статистически значимая связь нозологии заболевания с уровнем социально-экономического развития страны проживания. Так, в странах с развитой экономикой и увеличивающейся продолжительностью жизни людей преобладают дегенеративные пороки аортального клапана у пожилых больных, тогда как в развивающихся странах, напротив, чаще встречается ревматическая этиология поражений митрального клапана (МК) в более молодом возрасте. В России приобретенные пороки клапанов сердца с количественной и качественной точки зрения занимают промежуточное положение, при котором поражения аортального клапана стоят на первом месте, но сразу за ними, догоняя по цифрам, следует патология МК [5]. В общемировых масштабах за последние 20 лет абсолютная распространенность первичной митральной недостаточности увеличилась на 70%, а ревматическая болезнь клапана до сих пор остается ведущей причиной смерти от клапанных пороков сердца [3, 6]. Таким образом, лечение митральных пороков сердца представляет глобальную проблему современного здравоохранения во всем мире [7, 8].

Нарушения геометрии и механики МК сопряжены с рядом распространенных заболеваний, включая функциональную и ишемическую митральную регургитацию, пролапс клапана, фибрилляцию предсердий, кальцификацию [1, 9].

Идеальный протез клапана сердца до настоящего времени не найден [2]. Общепринятые методы протезирования при грубой патологии МК, предлагаемые пациентам, имеют ряд ограничений. К недостаткам протезирования механическим протезом относятся необходимость в пожизненной антикоагулянтной терапии и связанные с этим возможные осложнения при несоблюдении режимов приема и отмены соответствующих препаратов: кровотечения и тромбоэмболия, а также ухудшение общего качества жизни пациента. Совокупность этих факторов не позволяет считать данный метод идеальным. С другой стороны, биологические клапаны, которые имеют целый ряд преимуществ, связанных с отсутствием длительного приема антикоагулянтов, также до настоящего времени несовершенны и могут подвергаться быстрой деградации и кальцификации, что требует проведения повторных вмешательств иногда уже через 5 или 10 лет после первичного вмешательства [10]. При этом, несмотря на значительный прогресс в последние десятилетия в разработке и производстве биологических клапанов, по гемодинамическим характеристикам такие протезы остаются несопоставимы с нативными клапанами, что также влияет на скорость их биодеградации. По-

мимо этого хирургическая коррекция патологии клапанного аппарата сердца с использованием протезов — как биологических, так и механических — является дорогостоящими процедурами, в том числе за счет производства протезов клапанов сердца. Совокупность перечисленных недостатков требует продолжения поиска альтернативных методов лечения клапанной патологии сердца, что возвращает интерес кардиохирургов к реконструктивным операциям на МК. Для этого применяются как местные ткани своего клапана, так и различные синтетические и биологические материалы (например, специально обработанный ауто- и ксеноперикард). Пластика различных структур МК, в том числе его подклапанного аппарата, является одним из эффективных и недорогих способов лечения, что доказано в целом ряде исследователей [2, 6, 8, 11—22]. Разработки зарубежных специалистов и создание отечественной версии программного обеспечения, так называемого виртуального двойника МК, безусловно, сможет помочь в дальнейшей разработке методов лечения — открытых и интервенционных операций на МК сердца: от транскатетерных процедур типа MitraClip до открытого хирургического лечения, особенно реконструктивных пластических операций на МК.

Таким образом, углубление понимания вопросов кардиохирургического лечения с применением реконструктивных вмешательств на МК нуждается в дальнейшем изучении, разработке дополнительных алгоритмов и методов хирургического и интервенционного лечения, основываясь на фундаментальных знаниях анатомического строения и функционирования разных структур сердца человека, принимая во внимание современные технологии, такие как математическое и компьютерное моделирование структур МК.

Функция митрального клапана. Функциональная классификация заболеваний МК Carpentier является одной из наиболее часто используемых классификаций заболеваний МК [23]. Математическая интерпретация этой классификации была предпринята в некоторых исследованиях, например, представляя расширение кольца за счет увеличения его диаметра или смещение папиллярных мышц за счет увеличения расстояния между папиллярными мышцами [24].

Митральный клапан — один из компонентов функциональной динамической системы. Систолическое и диастолическое состояние левого предсердия и левого желудочка, как и трансмитральный кровоток, играют значительную роль в функционировании клапана. В систолу свободные края створок смыкаются, закрывая клапан, тогда как в диастолу свободные края разделяются и клапан открывается [25, 26]. Существует два основных физиологических механизма, приводящих к снижению нагрузки на створки: седловидная форма кольца МК и прогиб створок.

Форма МК является ключевым моментом для многих аспектов его функции [12, 27]. Оценка морфологии МК может выявить различные нормальные и аномальные особенности, которые могут быть связаны с ухудшением клинических результатов хирургической реконструкции [12, 13, 28—30]. Нарушение любой из структур, составляющих единый сложный МК, может приводить к различной степени дисфункции. Поэтому неимоверно важно изучение анатомии, физиологии и морфометрии нормального МК с применением новейших технологий. По данным современной литературы, проведены исследования, посвященные математическому и компьютерному моделированию *in vivo* и *in silico* на разных моделях: на свиньях [31], овцах [32] и человеке [33], а также исследования *in vitro* на моделях свиньи [34] и овцы [35]. В перспективе развития реконструктивной хирургии МК сердца стоит создание компьютерных моделей, позволяющих визуализировать нормальный клапан, созданный с учетом актуальных значений конкретного пациента.

Современные анатомо-функциональные особенности МК сердца к настоящему времени изучены достаточно хорошо. Большой вклад в изучение и преподавание анатомии сердца молодым хирургам внес Г.Э. Фальковский [36, 37].

Нормальный МК предотвращает обратный ток крови при ее прохождении через левые камеры сердца. Клапан отличается сложной геометрией и топографо-анатомической структурой, которая включает митральное фиброзное кольцо, переднюю и заднюю створки МК и подклапанный аппарат, представленный хордами и папиллярными мышцами [4].

Форма и диаметр МК изменяются в течение сердечного цикла, что делает его динамической структурой [37]. В диастолу кольцо имеет более круглую форму, тогда как в систолу меняется на трехмерную седловидную форму синхронно с закрытием клапана и коаптацией створок [4].

Хорды МК характеризуются местом их прикрепления и размером. У человека выделяют базальные, краевые и третичные хорды [38].

Папиллярные мышцы представляют собой динамические структуры, которые активно движутся в течение сердечного цикла. Исследование на собаках показало, что сокращение и укорочение этих мышц способствует открытию створок МК, тогда как их удлинение способствует коаптации створок [39]. Хотя глобально выделяют две папиллярные мышцы [40], обычно анатомически существуют группы мышц, примыкающих друг к другу, общее число которых может достигать пяти. Все они прикрепляются к стенке левого желудочка в его средней, верхней или нижней части [41]. При этом их форма разнообразна: они напоминают либо конус (коническую форму), либо эллиптический параболоид, имеющий усеченную форму, либо раздвоенный или разделенные натрое [41].

Топографически передняя створка МК очень близко прилегает к аортальному, продолжаясь в фиброзную основу некоронарной створки аортального клапана и левой коронарной артерии [23]. Прилегающий участок соответствует передней части митрального кольца, ограниченный левым и правым фиброзными треугольниками. Задняя поверхность кольца МК находится дистальнее фиброзных треугольников и включает нижнюю часть пространственной седловидной конструкции клапана [38].

Таким образом, правильная работа МК зависит от нормального функционирования каждого из его структурных элементов — сложной взаимосвязанной системы.

Морфометрия нормального митрального клапана сердца. Первое исследование, в котором рассматривалась анатомическая структура МК для определения ключевых размеров, появилось в начале 90-х годов прошлого века. Исследование K. Kunzelman и соавт. [42] было основано на изучении и сравнении иссеченного аппарата МК человека и свиньи. Эта работа позволила получить первые базовые измерения МК человека и свиньи *ex vivo*, касающиеся длины и высоты створок, а также хордального аппарата. С развитием методов медицинской визуализации исследования *in vivo*, таких как трехмерная (3D) чреспищеводная эхокардиография и подобные ей, начали использоваться количественные характеристики для оценки морфологии клапанного аппарата сердца человека у здоровых и больных людей [12, 33—35, 43], что имело важное значение для следующего этапа развития хирургии пороков сердца.

Последующие исследования начали фокусироваться на компьютерной обработке математических моделей кольца митрального клапана: I. Salgo и соавт. (2002) [44], M. Stevanella и соавт. (2002, 2009, 2019) [30, 45, 46], J. Park и соавт. (2019) [25, 47]. Форму створок изучали M. Stevanella (2009) и J. Park (2019) [25, 30, 45—47]. Архитектуру хорд митрального клапана как у человека, так и у свиньи изучали A. Kaiser и соавт. (2019) [48].

Кроме того, известны работы по морфометрии МК путем получения данных исследований *in vitro* [29, 32, 46, 49]; *in vivo* [12, 31—33, 50]; *in silico* (т.е. на основе использования силикагеля) [42]. Обобщили и углубили эти знания в своем исследовании D. Oliveira и соавт. [1] для возможности использования в хирургических целях.

В мире существуют математические алгоритмы, которые автоматически генерируют параметрические трехмерные модели митрального клапана человека, разработанные на основе разных методов исследования: эхокардиографических данных *in vivo* [51], трехмерной чреспищеводной эхокардиографии [52, 53] и изображений четырехмерной компьютерной томографии [54]. Однако все они имеют те или иные допущения.

Современные модели могут быть основаны на общих анатомических ориентирах МК, в основе которых лежат параметрические поверхности. D. Oliveira и соавт. [1] выделяют ориентиры, являющиеся относительными константами для размеров фиброзного кольца или других отношений в сердечном цикле. Ориентиры используются для построения компьютерных моделей нормального МК, в том числе для конкретного пациента в хирургических целях реконструкции митрального клапана:

- левый и правый фиброзные треугольники, расположенные между митральным и аортальным клапанами сердца [1, 24, 52, 55];
- межтригональное расстояние [1, 24, 55];
- переднелатеральная и заднемедиальная комиссуры, расположенные по свободным краям и являющиеся точками соединения створок [24];
- задняя точка середины кольца [1];
- верхушки папиллярных мышц [52, 54].
- свободные края створок [52, 54] и др.

Однако единого мнения в актуальной литературе по количеству и составу ориентиров пока не получено.

Геометрическая форма митрального клапана. Исследования как *ex vivo*, так и *in vivo* к настоящему времени определили параметры, которые описывают геометрическую форму МК человека и имеют важнейшее значение для его функции. Основные обобщенные современные параметры показаны в **таблице**, указаны диапазоны значений структур митрального клапана для здоровых и больных людей по данным актуальной литературы.

D. Oliveira и соавт. (2020) [1] настаивают на том, что наиболее правильная пропорция, отраженная в исследованиях литературы — это значения, полученные в середине систолы **(таблица)** [1, 50, 63]. Эти же пропорции подтверждаются корреляциями на основе размерных данных, полученных при внутрисердечных операциях и вскрытиях свежих сердец человека.

Исследование *in vivo*, основанное на изучении МК овец, показало наличие динамической кольцевой деформации. При этом самые большие деформации принадлежали задней области и, напротив, области комиссуры демонстрировали наименьшее количество изменений [29]. Несмотря на наличие такой динамической изменчивости у животных, соотношение передней и задней полуокружностей кольца МК человека остается практически неизменным на протяжении всего сердечного цикла [1]. Доказано, что процесс патологического расширения кольца МК различен для передней и задней полуокружностей МК человека — в отличие от задней, передняя часть фиброзного кольца менее склонна к расширению [24]. Математически это означает, что межтригональное расстояние не должно меняться даже при дилатации МК [57, 64]. Остальные 2/3 кольца (заднее полукольцо), которые

в основном состоят из мышечной ткани, склонны к расширению [24]. Однако количественная величина этой пропорции в актуальной литературе противоречива: если в одних исследованиях отмечается, что передняя и задняя части соответствуют примерно 1/3 и 2/3 всего периметра кольца [61], то в других отмечается пропорция около 2/5 [63] или 3/5 [50]. При этом несоответствия пропорций в разных исследованиях могут обусловливаться разницей в анатомическом определении границ створок, которая в одних исследованиях принимается на уровне комиссур, в других — по так называемой самой низкой кольцевой высоте [24, 50, 61, 63, 69, 70, 71].

Часть геометрических компонентов кольца МК изменяется в норме в течение сердечного цикла, включая, например, переднюю и заднюю области кольца МК, переднезаднее (AP), переднелатерально-заднемедиальное (AL—PM) и межтригональное расстояния [62]. При этом и передняя, и задняя части кольца клапана участвуют в общем изменении длины и конфигурации митрального кольца в течение сердечного цикла. И хотя M. Rausch и соавт. (2011) [72] в исследовании на овцах сокращение кольца описывали только во время систолы, существуют другие работы по морфометрии МК человека, показывающие расширение кольца от середины систолы до ранней диастолы и сокращение между средней диастолой и ранней систолой [60, 72]. Таким образом, помимо самого математического значения параметра критически важно еще указание, в какой момент сердечного цикла он был измерен.

Форма нативного кольца здорового МК отличается сходством с седлом, характеризующимся кольцевой высотой. Эта конструкция снижает нагрузку на створки и уменьшает переднюю систолическую нагрузку, потенциально увеличивая долговечность возможных хирургических реконструкций при учете 3D-формы кольца МК [1, 44, 73]. На практике более глубокое седло соответствует более апикальному положению медиальной и латеральной частей кольца клапана, в то время как передняя и задняя части остаются в базальных отделах [44]. Математически это описывается количественно величиной отношения высоты кольца к ширине комиссуры (AHCWR) [12, 50, 63]. Таким образом, данный профиль МК человека зависит от ротационного положения кольца, что привело в свое время к созданию новых конструкций колец седловидной формы для аннулопластики [50, 63]. Фактически изменчивость клапана седловидной формы влияет на вариацию напряжения створки [44]: более глубокая форма седла, связанная с более высоким значением AHCWR [12], приводит к снижению пикового напряжения створки, как отмечается в вычислительном исследовании I. Salgo (2002) [44].

Математически кольцевая седловидная форма кольца МК в литературе определена с помощью уравнений параболоида, которые представляют собой квадратичные поверхности с одной осью симметрии или без центра симметрии [44, 45—47, 70—75]. Например, I. Salgo и соавт. (2002) [44] использовали гиперболический параболоид, тогда как J. Park и соавт. (2019) [47] — гиперболический параболоид и изогнутый тороид для определения формы седла.

В 2D-эхокардиографическом исследовании D. Oliveira и соавт. (2020) [1] обнаружены геометрические корреляции, касающиеся расстояния AL-PM (переднелатерально-заднемедиального размера МК) и других размеров митрального кольца [1]. Клиническое исследование H. Warraich и соавт. (2012) [74] чреспищеводной 3D-эхокардиографии с акцентом на конечные систолические размеры выявило более низкие углы между передней и задней серединами кольца в области комиссуры (NPA), которые были связаны с увеличением отношения AH (annular height) к расстоянию AL-PM [76].

Угол между передней и задней серединами кольца в области комиссуры (NPA) по данным литературы является важным фактором, но не единственным, влияющим на кольцевую седловую деформацию. Углы створок (αA и αP) и общий треугольник коаптации (2D-треугольник, образованный диаметром AP, передними и задними створками, во время коаптации створок), включая его высоту и площадь также играют важную роль при оценке геометрии и функции МК человека по данным современной литературы [1, 43, 68, 69, 76].

Существует гипотеза, согласно которой коаптационный треугольник здорового МК может быть основан на правиле золотого сечения — соотношении, наблюдаемом в природе, которое возникает в результате разделения определенного сегмента на две идентичные части [68]. Такие соотношения дают иррациональное число, округленное до 0,618 или 1,618, известное как золотая пропорция. В исследовании L. Deorsola и A. Bellone (2018) [68] утверждается, что значение 0,618 может быть получено соотношением между передним сухожильным тяжем и диаметром AP, между задним и передним сухожильными тяжами, а также между высотой общего треугольника коаптации и задним сухожильным тяжем. Авторы обнаружили сильные корреляции между исходным коаптационным треугольником и «золотым треугольником» во время ранней систолы, демонстрируя хорошие положительные линейные связи. Из-за технических ограничений визуализации авторы не смогли оценить коаптационный треугольник и повторить измерения для разных фаз сердечного цикла, чтобы определить, останется ли «золотая пропорция» в разные фазы сердечного цикла [68]. Тем не менее надо полагать, что передние и задние углы створок являются важными элементами для оценки прикрепления створок, при этом угол задней створки ⩾45° служит показателем сильного ограничения движе-

Основные современные геометрические параметры митрального клапана по данным D. Oliveira и соавт. (2020) [1], обобщивших данные предыдущих исследований [12, 23, 28, 33, 34, 42, 43, 50, 56—68]

The main modern geometric parameters of the mitral valve according to D. Oliveira et al. (2020) [1], who summarized the data of previous studies [12, 23, 28, 33, 34, 42, 43, 50, 56—68]

Структура митрального клапана	Сокращенное обозначение переменных	Значение	Размер в здоровом митральном клапане	Отклонения от нормы
Кольцо	AP диаметр, мм	Расстояние между передней и задней центральными точками кольца	30±6**	38,8±6,4***
	CW, мм	Диаметр кольца в области комиссур	33,3±3,7***	42,2±5,9***
	AL—PM диаметр, мм	Диаметр между переднелатеральной и заднемедиальной анатомическими ориентирами	31±5**	39±7**
	Окружность кольца, мм	Общий периметр края кольца	106±10***	136±19***
	Передняя/задняя полуокружности, мм	Периметр переднего/заднего края кольца	43,3±8,2**/63,01±9,06**	61,3±8**/75±11**
	Высота кольца, мм	Вертикальное расстояние между самой высокой и самой низкой точками кольца	7,9±1,9***	5,6±1,6***
	Площадь кольца, мм^2	Площадь, ограниченная двумерной проекцией кольца	780±270**	1,343±392***
	NPA, °	Угол между передней и задней серединами полукольца в области комиссуры	144±11**	157±12**
	IT расстояние, мм	Расстояние между левым и правым фиброзными треугольниками	30±3#	31±3#
	Передняя/задняя длина, мм	Длина от середины переднего/заднего полукольца до точки смыкания створок	21,2±3,0***/9,8±2,0***	26,3±6,1***/16±5***
Створки	Передняя/задняя площадь, мм^2	Площадь поверхности передней/задней створки	Передняя: 530±210** Задняя: 380±130**	Передняя: 760±190** Задняя: 610±230**
	Длина задней створки, мм	Длина от свободного края каждой створки до кольца	P1: 5—17; P2: 7—20; P3: 7—20##	P1: 16±5; P2: 19±6; P3: 16±4**
	Высота комиссур, мм	Высота от свободного края каждой комиссуры до кольца	AL: 5—13; PM: 4—12##	—
	Углы створок, °	Угол, образованный передней/задней створкой с линией кольца	Передний: 24,6±7** Задний: 34,7±9,6**	Передний 33,2±8,6** Задний: 44,4±11,9**
	Высота натяжения створки, мм	Расстояние от кольца до точки смыкания (tenting height)	7,4±1,3*	9,7±3,2**
	Площадь натяжения створки, мм^2	Плоскость, образуемая створками от кольца до точки смыкания (tenting area)	118,2±32,6*	350±50*
Подклапанный аппарат	Длина до папиллярных мышц, мм	Длина от папиллярной мышцы до передней середины кольца ALPM — переднелатеральная папиллярная мышца; PMPM — заднемедиальная папиллярная мышца	ALPM: 28,1±4,1*** PMPM: 28,5±4,8***	ALPM: 40,5±6*** PMPM: 41,8±5,9***
	Межсосочковое расстояние, мм	Расстояние между папиллярными мышцами	Внутренний диаметр: 14,4±4,8** Внешний диаметр: 31,1±5,4**	Внутренний диаметр: 26,7±8,4** Внешний диаметр: 43,1±9,7**
	Межсосочковый угол, °	Угол между средней точкой переднего полукольца и обеими папиллярными мышцами	26,2±6,5#	28,9±6,3#

Примечание. Размеры, полученные в момент: * — ранней систолы; ** — середины систолы; *** — конца систолы; # — усредненное значение за сердечный цикл; ## — *ex vivo*.

ния створок при ишемической митральной регургитации. В рядн современных исследований показано, что угол фиксации сегмента P3 менее 28,8° прогнозирует усиление регургитации в послеоперационном периоде [77, 78].

С диагностической и хирургической точки зрения, это означает, что углы створок могут представлять собой важные параметры для выявления ранних изменений анатомии МК как и для развития хирургических и интервенционных методов лечения патологии МК, а также послеоперационной инструментальной диагностики, особенно если эти данные коррелируют с другими размерами коаптационного треугольника [68].

Створки митрального клапана. Впервые геометрические параметры передней створки у человека были определены на основе данных *ex vivo*, полученных L. Duplessis и P. Marchand (1964) [79]. В исследовании были обнаружены зависимости между площадью поверхности передней створки и другими размерами клапана с умеренной корреляцией с длиной свободного края.

Основное внимание в последующих исследованиях было уделено математическому определению свободного края створок. В литературе задняя створка описывается математически как непрерывная полулунная полоска вокруг кольца МК — либо с углублениями [45, 46, 80], либо без них [24, 28, 81, 82]. Уравнения были получены с помощью математических гармонических функций [45], сплайн-функций [46] и параметрических уравнений [82]. Однако в значительной степени все они упрощают нативную форму задней створки, что приводит к чрезмерно идеализированной геометрии клапана [1]. Результаты поведенных исследований потенциально могут лечь в основу создания высокоточных моделей, касающихся здорового, больного и восстановленного МК. Однако интеграция этих знаний в создание глобальной компьютерной модели идеального МК человека *in vivo* пока остается сложной задачей.

Подклапанный аппарат. В настоящее время для моделирования МК человека математически принято сильно упрощать форму папиллярных мышц, а также схемы прикрепления хорд. Так, некоторые исследования представляют вершины папиллярных мышц как уникальные трехмерные точки, в которые вставляются все хорды [28, 45, 80—86]. Другие исследователи предполагают, что парабола представляет собой двумерный разрез формы папиллярной мышцы, с хордами, прикрепленными к вершинам папиллярных мышц [47]. Некоторые исследователи описывают сферическую [14, 46, 78] или С-образную форму [80] папиллярных мышц, и создают разные точки прикрепления хорд согласно их классификации.

Папиллярные мышцы. Пространственное положение папиллярных мышц у человека было определено математически T. Sakai и соавт. (1999) [83] и M. Tsukiji и соавт. (2008) [56]. Эти исследования были проведены с учетом таких измерений, как расстояние от папиллярных мышц до митрального кольца или до коаптации створок. В исследованиях были проведены измерения папиллярных мышц в пяти ключевых точках условного циферблата. При таком подходе каждая мышца связана с тремя расстояниями до кольца клапана, что позволило описать трехмерное пространственное положение их верхушек. Кроме того, было описано расстояние между папиллярными мышцами и угол между ними. В более позднем исследовании S. Stephens и соавт. (2017) [84] были использованы знания о подобных измерениях для создания аппарата трехмерной магнитно-резонансной томографии высокого разрешения, что привело к созданию высококачественных трехмерных моделей структуры МК человека.

Хорды. Математическое описание сухожильных хорд человека остается сложной задачей из-за того, что их геометрию крайне трудно досконально изучить с помощью современных обычных методов визуализации *in vivo* [4, 69, 70, 71], а это означает, что исследования *ex vivo* у человека служат основными источниками знаний об анатомии хордального аппарата. Как показали предыдущие исследования на свежих сердцах людей *ex vivo*, хорды отличаются морфологическим разнообразием по количеству, точкам прикрепления к створкам, толщине и характеру ветвления [85]. С помощью доступных в настоящее время методов визуализации трудно охарактеризовать точную локализацию прикрепления хорд к створкам и тем более математически описать расположение точек прикрепления к папиллярным мышцам [56]. Следовательно, современные математические описания хордального аппарата как множества связанных уникальных точек являются ограниченными и низко репрезентативными.

Недавние исследования A. Khalighi и соавт. (2017) [69, 70], основанные на прижизненном изучении МК овец, позволили оценить возможные направления будущего изучения геометрии и топографии сухожильных хорд, а также оценить механизм влияния на работу всего клапана нативных анатомических характеристик хорд [70]. Авторы использовали криволинейные модели для определения угла NPA, а также проанализировали пространственное распределение мест прикрепления хорд к створкам. Указанная работа дала ценную информацию о геометрических характеристиках хорд, включая наличие неоднородной площади поперечного сечения вдоль каждого сегмента (при этом структура хорд характеризовалась утончением по мере удаления от кончика папиллярных мышц); двухмерной природе хорд, которые вместе образуют трехмерную несущую опорную структуру створок МК и о разработке аналитических статистических моделей, описывающих геометрию хорд, а также позволяющих прогнозировать возможные формы

хорд [69, 70]. Чуть позже, в 2019 г. те же авторы обнаружили, что различная площадь поперечного сечения, схемы ветвления и точная локализация папиллярных мышц в одном и том же месте не оказывают значительного влияния на работу МК овец, и описали оптимальный диапазон количества хорд для соответствующей функции, который исключил более 75% дополнительных хорд [1, 71]. Таким образом, исследования A. Khalighi и соавт. [69—71] были крайне полезны в аспекте геометрических характеристик сухожильных хорд, которые, возможно, могут быть применены при разработки более сложных моделей МК человека и методов прижизненной визуализации *in vivo*.

Таким образом, анатомия и физиология МК сложны, изучались на протяжении прошлого века и служат базой для построения математических моделей на современном этапе развития медицины [74—86]. Математическим моделированием отдельных структур МК в различные фазы сердечного цикла занимаются ученые в разных частях мира последние десятилетия. Попытки компьютерного моделирования, направленные на объединение математического описания функций разных составных частей МК, также ведутся, однако крайне сложны и требуют мультидисциплинарного подхода: требуют привлечения не только кардиохирургов, но и кардиологов, специалистов ультразвуковой диагностики, а также математиков и целых лабораторий математического моделирования [87, 88]. Разработки зарубежных специалистов и создание отечественной версии программного обеспечения с созданием виртуального двойника МК, безусловно, могут помочь в дальнейшем понимании возможностей открытых и интервенционных операций на МК сердца: от эндоваскулярных процедур до открытого хирургического лечения, особенно реконструктивных пластических операций на МК сердца.

Участие авторов:
Концепция и дизайн исследования — Комаров Р.Н., Дыдыкин С.С., Дракина О.В.
Сбор и обработка материала — Бабакулова Н.М., Васалатий И.М., Дружинин Н.М., Першина Е.С.
Написание текста — Васалатий И.М., Дружинин Н.М., Chauhan Shikha
Редактирование — Дракина О.В., Першина Е.С.

Participation of authors:
Concept and design of the study — Komarov R.N., Dydykin S.S., Drakina O.V.
Collection and processing of material — Babakulova N.M., Vasalatii I.M., Druzhinin N.E., Pershina E.S.
Text writing — Vasalatii I.M., Druzhinin N.E., Chauhan Shikha
Editing — Drakina O.V., Pershina E.S.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Oliveira D, Srinivasan J, Espino D, Buchan K, Dawson D, Shepherd D. Geometric description for the anatomy of the mitral valve: A review. *J Anat. 2020;237(2):209-224.* https://doi.org/10.1111/joa.13196
2. Комаров Р.Н., Дыдыкин С.С., Чернявский С.В., Нуждин М.Д., Дракина О.В., Бабакулова Н.М., Васалатий И.М. Анатомия митрального клапана во время аутопсии в сравнении с данными прижизненной эхокардиографии. *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)*. 2023;7(3):19-27.
Komarov RN, Dydykin SS, Chernyavsky SV, Nuzhdin MD, Drakina OV, Babakulova NM, Vasalatii IM. Anatomy of the mitral valve during autopsy compared to the data of lifetime echocardiography. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy.* 2023;7(3):19-27. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/operhirurg2023703119
3. Coffey S, Roberts-Thomson R, Brown A, Carapetis J, Chen M, Enriquez-Sarano M, Zühlke L, Prendergast BD. Global epidemiology of valvular heart disease. *Nat Rev Cardiol.* 2021;18(12):853-864. https://doi.org/10.1038/s41569-021-00570-z
4. Levine RA, Hagége AA, Judge DP, Padala M, Dal-Bianco JP, Aikawa E, Beaudoin J, Bischoff J, Bouatia-Naji N, Bruneval P, Butcher JT, Carpentier A, Chaput M, Chester AH, Clusel C, Delling FN, Dietz HC, Dina C, Durst R, Fernandez-Friera L, Handschumacher MD, Jensen MO, Jeunemaitre XP, Le Marec H, Le Tourneau T, Markwald RR, Mérot J, Messas E, Milan DP, Neri T, Norris RA, Peal D, Perrocheau M, Probst V, Pucéat M, Rosenthal N, Solis J, Schott JJ, Schwammenthal E, Slaugenhaupt SA, Song JK, Yacoub MH; Leducq Mitral Transatlantic Network. Mitral valve disease — morphology and mechanisms. *Nat Rev Cardiol.* 2015;12(12):689-710. https://doi.org/10.1038/nrcardio.2015.161
5. Самородская И.В., Болотова Е.В., Урманбетов К.С. Распространенность приобретенных пороков сердца и особенности клинического течения у пожилых пациентов (обзор). *Новые технологии*. 2012;3.
Samorodskaya IV, Bolotova EV, Urmanbetov KS. Prevalence of acquired heart defects and features of the clinical course inelderly patients (review). *New technologies*. 2012;3. (In Russ.).
https://cyberleninka.ru/article/n/rasprostranennost-priobretennyh-porokov-serdtsa-i-osobennosti-klinicheskogo-techeniya-u-pozhilyh-patsientov-obzor.
6. Комаров Р.Н., Николенко В.Н., Дыдыкин С.С., и др. Анатомия митрального клапана в аспекте реконструктивной хирургии. *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)*. 2022;6(4):24-30.
Komarov RN, Nikolenko VN, Dydykin SS et al. Anatomy of the mitral valve in the reconstructive surgery. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy.* 2022;6(4):24-30. (In Russ., In Engl.)
https://doi.org/10.17116/operhirurg2022604124
7. Бокерия Л.А., Бокерия О.Л., Климчук И.Я., Мироненко М.Ю., Шварц В.А. Оценка морфометрических параметров митрального клапана при хирургическом лечении фибрилляции предсердий. *Анналы аритмологии*. 2016;4.
Bokeria LA, Bokeria OL, Klimchuk IY, Mironenko MY, Schwartz VA. Evaluation of morphometric parameters of the mitral valve in surgical treatment of atrial fibrillation. *Ann arrhythm*. 2016;4. (In Russ).
https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-morfometricheskih-parametrov-mitralnogo-klapana-pri-hirurgicheskom-lechenii-fibrillyatsii-predserdiy
8. Комаров Р.Н. Нуждин М.Д., Симонян А.О., Дракина О.В., Царегородцев А.В. Протезирование трикуспидального клапана ми-

тральным гомографтом: техника операции и непосредственные результаты. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2023;16(4):443-448.
Komarov RN, Nuzhdin MD, Simonyan AO, Drakina OV, Tsaregorodtsev AV. Tricuspid valve replacement with a mitral homograft: surgical technique and immediate results. *Cardiology and cardiovascular surgery*. 2023;16(4):443-448. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/kardio202316041443

9. Silbiger JJ. Anatomy, mechanics, and pathophysiology of the mitral annulus. *Am Heart J*. 2012;164(2):163-176.
https://doi.org/10.1016/j.ahj.2012.05.014
10. David TE, Armstrong S, McCrindle BW, Manlhiot C. Late outcomes of mitral valve repair for mitral regurgitation due to degenerative disease. *Circulation*. 2013;127(14):1485-1492.
https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.112.000699
11. Galloway AC, Colvin SB, Baumann FG, Grossi EA, Ribakove GH, Harty S, Spencer FC. A comparison of mitral valve reconstruction with mitral valve replacement: Intermediate-term results. *Ann Thorac Surg*. 1989;47(5):655-662.
https://doi.org/10.1016/0003-4975(89)90113-6
12. Lee AP, Hsiung MC, Salgo IS, Fang F, Xie JM, Zhang YC, Lin QS, Looi JL, Wan S, Wong RH, Underwood MJ, Sun JP, Yin WH, Wei J, Tsai SK, Yu CM. Quantitative analysis of mitral valve morphology in mitral valve prolapse with real-time 3-dimensional echocardiography: importance of annular saddle shape in the pathogenesis of mitral regurgitation. *Circulation*. 2013;127(7):832-841.
https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.112.118083
13. Lee AP, Jin CN, Fan Y, Wong RHL, Underwood MJ, Wan S. Functional Implication of Mitral Annular Disjunction in Mitral Valve Prolapse: A Quantitative Dynamic 3D Echocardiographic Study. *JACC Cardiovasc Imag*. 2017;10(12):1424-1433.
https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.11.022
14. Wang X, Zhang B, Zhang J, Ying Y, Zhu C, Chen B. Repair or replacement for severe ischemic mitral regurgitation: A meta-analysis. *Medicine* (*Baltimore*). 2018;97(31):e11546.
https://doi.org/10.1097/MD.0000000000011546
15. Fan Q, Li X, Cao G, Yu P, Zhang F. Outcome of mitral valve repair or replacement for non-ischemic mitral regurgitation: a systematic review and meta-analysis. *J Cardiothorac Surg*. 2021;16(1):1-10.
https://doi.org/10.1186/s13019-021-01563-2
16. Kasegawa H, Ushijima T, Takanashi S. A Repair-like Replacement for Unrepairable Mitral Valve, Structural Heart. *J Heart Valve Dis*. 2021;5(1):4.
https://doi.org/10.1080/24748706.2021.1898253
17. Kasegawa H, Tabata M, Shimizu A, Naito K, Fukui T, Takanashi S. A New Type of Mitral Valve Operation Using a Novel Stentless Mitral Valve made from Autologous Pericardium for Unrepairable Valve. *J Heart Valve Dis*. 2015;24(1):53-56.
18. Imam Ali Sabzi, Vahe Ch. Gasparyan. Gasparyan Method of Total Autologous Reconstruction of the Mitral Valve: Case Report. *Am J Cardiovasc Thorac Surg*. 2020.
https://doi.org/10.15226/2573-864x/5/2/00166
19. Manohar P, Naik LR, Mohan Rao PS. Auto-Pericardial Mitral Valve Implantation: A Pilot Study. *Heart Lung Circ*. 2022;31(4):575-581.
https://doi.org/10.1016/j.hlc.2021.09.015
20. Shomura Y, Tahta SA, Lansac E, Duran CM. Hemodynamic evaluation of a new stentless autologous pericardial mitral valve. *Ann Thorac Surg*. 2001;71(5 Suppl):S315-7.
https://doi.org/10.1016/s0003-4975(01)02498-5
21. Deac RF, Simionescu D, Deac D. New evolution in mitral physiology and surgery: mitral stentless pericardial valve. *Ann Thorac Surg*. 1995;60(2 Suppl):S433-8.
https://doi.org/10.1016/0003-4975(95)00303-3
22. Gasparyan VC, Galstyan VS. Total reconstruction of the mitral valve with autopericardium: anatomical study. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*. 2002;10(2):137-140.
https://doi.org/10.1177/021849230201000210
23. Carpentier A. Mitral valve annuloplasty. *Ann Thorac Surg*. 1990;49(3):508-509.
https://doi.org/10.1016/0003-4975(90)90277-d
24. Park CH, Yoon H, Jo IJ, Woo S, Heo S, Chang H, Lee G, Park JE, Kim T, Lee SU, Hwang SY, Cha WC, Shin TG. A Pilot Study Evaluating LV Diastolic Function with M-Mode Measurement of Mitral Valve Movement in the Parasternal Long Axis View. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(14):2412.
https://doi.org/10.3390/diagnostics13142412
25. Ranganathan N, Lam JH, Wigle ED, Silver MD. Morphology of the human mitral valve. II. The valve leaflets. *Circulation*. 1970;41:459-467.
26. McCarthy KP, Ring L, Rana BS. Anatomy of the mitral valve: understanding the mitral valve complex in mitral regurgitation. *Eur J Echocardiography*. 2010;11:i3-9.
27. Jassar AS, Vergnat M, Jackson BM, McGarvey JR, Cheung AT, Ferrari G, Regional annular geometry in patients with mitral regurgitation: implications for annuloplasty ring selection. *Ann Thorac Surg*. 2014;97:64-70.
28. Sonne C, Sugeng L, Watanabe N, Weinert L, Saito K, Tsukiji M, Yoshida K, Takeuchi M, Mor-Avi V, Lang RM. Age and body surface area dependency of mitral valve and papillary apparatus parameters: assessment by real-time three-dimensional echocardiography. *Eur J Echocardiogr*. 2009;10(2):287-294.
https://doi.org/10.1093/ejechocard/jen237
29. Mihaila S, Muraru D, Casablana S, Peluso, Cucchini U, Del Bianco L, Badano LP. Three-dimensional changes in mitral valve annulus geometry in organic and functional mitral regurgitation: insights for mitral valve repair. *Eur Heart J*. 2013;34(suppl_1):4751.
30. Jolley MA, Ghelani SJ, Adar A, Harrild DM. Three-Dimensional Mitral Valve Morphology and Age-Related Trends in Children and Young Adults with Structurally Normal Hearts Using Transthoracic Echocardiography. *J Am Soc Echocardiography*. 2017;30(6):561-571.
https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.01.018
31. Kunzelman KS, Einstein DR, Cochran RP. Fluid-structure interaction models of the mitral valve: function in normal and pathological states. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. *Biol Scie*. 2007;362:1393-1406.
32. Eckert CE, Zubiate B, Vergnat M. et al. In Vivo Dynamic Deformation of the Mitral Valve Annulus. *Ann Biomed Eng*. 2009;37:1757-1771.
https://doi.org/10.1007/s10439-009-9749-3
33. Stevanella, Marco et al. Mitral valve patient-specific finite element modeling from cardiac MRI: application to an annuloplasty procedure. *Cardiovasc Engineer Technol*. 2011;2(2):66-76.
34. Espino D, Shepherd D, Buchan K. Effect of mitral valve geometry on valve competence. *Heart Vessels*. 2007;22:109-115.
https://doi.org/10.1007/s00380-006-0937-x
35. Bloodworth CH, Pierce EL, Easley TF. et al. Ex Vivo Methods for Informing Computational Models of the Mitral Valve. *Ann Biomed Eng*. 2017;45:496-507.
https://doi.org/10.1007/s10439-016-1734-z
36. Фальковский Г.Э. Строение сердца и анатомические основы его функции. Материалы курса лекций. М.: НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2014.
Falkovsky GE. The structure of the heart and the anatomical basis of its function. Lecture course materials. Moscow: A.N. Bakulev Scientific Center of Cardiovascular Surgery, Russian Academy of Medical Sciences, 2014. (In Russ.).
37. Marzilli M, Sabbah HN, Lee T, Stein PD. Role of the papillary muscle in opening and closure of the mitral valve. *Am J Physiol*. 1980;238:H348-H354.
38. Dal-Bianco JP, Levine RA. Anatomy of the mitral valve apparatus: role of 2D and 3D echocardiography. *Cardiol Clin*. 2013;31(2):151-164.
https://doi.org/10.1016/j.ccl.2013.03.001
39. Хирургическая анатомия сердца по Уилкоксу. Р.Г. Андерсон, Д.Е. Спейсер, Э.М. Хлавачек, Э.К. Кук, К.Л. Бейкер; пер. с англ.; под ред. Г.Э. Фальковского, С.П. Глянцева, Ю.С. Глянцевой. М.: Логосфера, 2015.
Wilcox's Surgical Anatomy of the Heart. RG Anderson, DE Speiser, EM Hlavacek, EK Cook, KL Baker; translated from English; ed by GE Falkovsky, SP Glyantsev, YuS Glyantseva. Moscow: Logosfera, 2015. (In Russ.).

40. Al-Atabi M, Espino DM, Hukins DW, Buchan KG. Biomechanical assessment of surgical repair of the mitral valve. *Proc Inst Mech Eng H*. 2012;226(4):275-287. https://doi.org/10.1177/0954411912437116
41. Saha A, Roy S. Papillary muscles of left ventricle-Morphological variations and it's clinical relevance. *Indian Heart J*. 2018;70(6):894-900. https://doi.org/10.1016/j.ihj.2017.12.003
42. Kunzelman KS, Cochran RP, Verrier ED, Eberhart RC. Anatomic basis for mitral valve modelling. *J Heart Valve Dis*. 1994;3(5):491-496.
43. Delgado V, Tops LF, Schuijf JD, de Roos A, Brugada J, Schalij MJ et al. Assessment of mitral valve anatomy and geometry with multislice computed tomography. *JACC: Cardiovasc Imag*. 2009;2:556-565.
44. Salgo IS, Gorman JH 3rd, Gorman RC, Jackson BM, Bowen FW, Plappert T et al. Effect of annular shape on leaflet curvature in reducing mitral leaflet stress. *Circulation*. 2002;106:711-717.
45. Stevanella M, Votta E, Redaelli A. Mitral valve finite element modeling: implications of tissues' nonlinear response and annular motion. *J Biomech Engineer*. 2009;131:121010.
46. Stevanella M, Maffessanti F, Conti CA, Votta E, Arnoldi A, Lombardi M et al. Mitral valve patient-specific finite element modeling from cardiac MRI: application to an annuloplasty procedure. *Cardiovasc Engineer Technol*. 201;2:66-76.
47. Park J, Geirsson A, Bonde PN. Mathematical blueprint of a mitral valve. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*. 2019;31:399-411.
48. Kaiser AD, McQueen DM, Peskin CS. Modeling the mitral valve. *Int J Numerical Methods Biomed Engineer*. 2019;35:e3240.
49. Espino DM, Shepherd DE, Buchan KG. Effect of mitral valve geometry on valve competence. *Heart Vessels*. 2007;22(2):109-115. https://doi.org/10.1007/s00380-006-0937-x
50. Jassar AS, Vergnat M, Jackson BM, McGarvey JR, Cheung AT, Ferrari G, Woo YJ, Acker MA, Gorman RC, Gorman JH 3rd. Regional annular geometry in patients with mitral regurgitation: implications for annuloplasty ring selection. *Ann Thorac Surg*. 2014;97(1):64-70. https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2013.07.048
51. Grbic S, Easley TF, Mansi T, Bloodworth CH, Pierce EL, Voigt I et al. Personalized mitral valve closure computation and uncertainty analysis from 3D echocardiography. *Med Image Analys*. 2017;35:238-249.
52. Mansi T, Voigt I, Georgescu B, Zheng X, Mengue EA, Hackl M et al. An integrated framework for finite-element modeling of mitral valve biomechanics from medical images: application to MitralClip intervention planning. *Med Image Analys*. 2012;16:1330-1346.
53. Zhang F, Kanik J, Mansi T, Voigt I, Sharma P, Ionasec RI et al. Towards patient-specific modeling of mitral valve repair: 3D transesophageal echocardiography-derived parameter estimation. *Med Image Analys*. 2017;35:599-609.
54. Ionasec RI, Voigt I, Georgescu B, Wang Y, Houle H, Vega-Higuera F et al. Patient-specific modeling and quantification of the aortic and mitral valves from 4-D cardiac CT and TEE. *IEEE Transact Med Imag*. 2010;29:1636-1651.
55. Veronesi F, Corsi C, Sugeng L, Mor-Avi V, Caiani EG, Weinert L et al. A study of functional anatomy of aortic-mitral valve coupling using 3D matrix transesophageal echocardiography. *Circulation: Cardiovasc Imag*. 2009;2:24-31.
56. Tsukiji M, Watanabe N, Yamaura Y, Okahashi N, Obase K, Neishi Y, Toyota E, Kawamoto T, Okura H, Ogasawara Y, Yoshida K. Three-dimensional quantitation of mitral valve coaptation by a novel software system with transthoracic real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2008;21(1):43-6. https://doi.org/10.1016/j.echo.2007.05.023
57. Suri RM, Schaff HV, Dearani JA, Sundt TM, Daly RC, Mullany CJ, Enriquez-Sarano M, Orszulak TA. Recovery of left ventricular function after surgical correction of mitral regurgitation caused by leaflet prolapse. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2009;137(5):1071-1076. https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2008.10.026
58. Topilsky Y, Vaturi O, Watanabe N, Bichara V, Nkomo VT, Michelena H, Le Tourneau T, Mankad SV, Park S, Capps MA, Suri R, Pislaru SV, Maalouf J, Yoshida K, Enriquez-Sarano M. Real-time 3-dimensional dynamics of functional mitral regurgitation: a prospective quantitative and mechanistic study. *J Am Heart Assoc*. 2013;2(3):e000039. https://doi.org/10.1161/JAHA.113.000039
59. Dudzinski DM, Hung J. Echocardiographic assessment of ischemic mitral regurgitation. *Cardiovasc Ultrasound*. 2014;12:46. https://doi.org/10.1186/1476-7120-12-46
60. Jiang Y, Wang Y, Dong N, Shi J. Zhonghua Wai Ke Za Zhi. Current status and prospects of risk models for heart valve surgery. 2014;52(2): 89-93. Chinese.
61. Garbi M, Monaghan MJ. Quantitative mitral valve anatomy and pathology. *Echo Res Pract*. 2015;2(3):R63-72. https://doi.org/10.1530/ERP-15-0008
62. Kim GS, Kim JB, Han S, Choo SJ, Chung CH, Lee JW, Jung SH. Mitral valve repair versus replacement for moderate-to-severe mitral regurgitation in patients undergoing concomitant aortic valve replacement. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2014;18(1):73-79. https://doi.org/10.1093/icvts/ivt402
63. Pouch AM, Vergnat M, McGarvey JR, Ferrari G, Jackson BM, Sehgal CM et al. Statistical assessment of normal mitral annular geometry using automated three-dimensional echocardiographic analysis. *Ann Thorac Surg*. 2014;97:71-77.
64. Calleja A, Poulin F, Woo A, Meineri M, Jedrzkiewicz S, Vannan MA et al. Quantitative modeling of the mitral valve by three-dimensional transesophageal echocardiography in patients undergoing mitral valve repair: correlation with intraoperative surgical technique. *J Am Society Echocardiography*. 2015;28:1083-1092.
65. Machino-Ohtsuka T, Seo Y, Ishizu T, Sato K, Sugano A, Yamamoto M et al. Novel mechanistic insights into atrial functional mitral regurgitation—3-dimensional echocardiographic study. *Circulation*. 2016; 80:2240-2248.
66. Obase K, Yoshida K. Effect of Annuloplasty for Mitral Valve Prolapse: Beyond the Annulus and Leaflet. Circ Cardiovasc *Imag*. 2016;9(10): e005621. https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.116.005621
67. Owais K, Montealegre-Gallegos M, Jeganathan J, Matyal R, Khabbaz KR, Mahmood F. Dynamic changes in the ischemic mitral annulus: Implications for ring sizing. *Ann Card Anaesth*. 2016;19(1):15-19. https://doi.org/10.4103/0971-9784.173014
68. Deorsola L, Bellone A. Coaptation Triangle and Golden Proportion in mitral valve anatomy. Does nature play with geometry? *Echocardiography*. 2018;35(1):30-38. https://doi.org/10.1111/echo.13727
69. Khalighi AH, Drach A, Bloodworth CHT, Pierce EL, Yoganathan AP, Gorman RC et al. Mitral valve chordae tendineae: topological and geometrical characterization. *Ann Biomed Engineer*. 2017;45:378-393.
70. Khalighi AH, Drach A, Gorman RC, Gorman JH 3rd, Sacks MS. Multi-resolution geometric modeling of the mitral heart valve leaflets. *Biomech Model Mechanobiol*. 2018;17:351-366.
71. Khalighi AH, Rego BV, Drach A, Gorman RC, Gorman JH 3rd, Sacks MS. Development of a functionally equivalent model of the mitral valve chordae tendineae through topology optimization. *Ann Biomed Engineer*. 2019;47:60-74.
72. Rausch MK, Bothe W, Kvitting JP, Swanson JC, Miller DC, Kuhl E. Mitral valve annuloplasty: a quantitative clinical and mechanical comparison of different annuloplasty devices. *Ann Biomed Eng*. 2012;40(3): 750-761. https://doi.org/10.1007/s10439-011-0442-y
73. Jimenez JH, Liou SW, Padala M, He Z, Sacks M, Gorman RC et al. A saddle-shaped annulus reduces systolic strain on the central region of the mitral valve anterior leaflet. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2007;134: 1562-1568.
74. Warraich HJ, Chaudary B, Maslow A, Panzica PJ, Pugsley J, Mahmood F. Mitral annular nonplanarity: correlation between annular height/commissural width ratio and the nonplanarity angle. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2012;26(2):186-190. https://doi.org/10.1053/j.jvca.2011.09.007
75. Ciarka A, Braun J, Delgado V, Versteegh M, Boersma E, Klautz R, Dion R, Bax JJ, Van de Veire N. Predictors of mitral regurgitation recurrence in patients with heart failure undergoing mitral valve annuloplasty. *Am J Cardiol*. 2010;106(3):395-401. https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2010.03.042

76. Silbiger JJ. Mechanistic insights into ischemic mitral regurgitation: echocardiographic and surgical implications. *J Am Society Echocardiography*. 2011;24:707-719.

77. Bouma W, Gorman RC. Commentary: Three-dimensional P3 tethering angle at the heart of future surgical decision making in ischemic mitral regurgitation. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2019;157:1806-1807. https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.10.048

78. Sun X, Jiang Y, Huang G, Huang J, Shi M, Pang L, Wang Y. Three-dimensional mitral valve structure in predicting moderate ischemic mitral regurgitation improvement after coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2019;157(5):1795-1803.e2. https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.09.018

79. Duplessis LA, Marchand P. The anatomy of the mitral valve and its associated structures. *Thorax*. 1964;19(3):221-227. https://doi.org/10.1136/thx.19.3.221

80. Choi A, McPherson DD, Kim H. Biomechanical evaluation of the pathophysiologic developmental mechanisms of mitral valve prolapse: effect of valvular morphologic alteration. *Med Biol Engineer Comput*. 2016;54:799-809.

81. Cochran RP, Kunzelman KS. Effect of papillary muscle position on mitral valve function: relationship to homografts. *Ann Thorac Surg*. 1998;66(6 Suppl):S155-61. https://doi.org/10.1016/s0003-4975(98)01100-x

82. Pedrizzetti G, Domenichini F. Left ventricular fluid mechanics: the long way from theoretical models to clinical applications. *Ann Biomed Eng*. 2015;43(1):26-40. https://doi.org/10.1007/s10439-014-1101-x

83. Sakai T, Okita Y, Ueda Y, Tahata T, Ogino H, Matsuyama K, Miki S. Distance between mitral anulus and papillary muscles: anatomic study in normal human hearts. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1999;118(4):636-641. https://doi.org/10.1016/S0022-5223(99)70008-5

84. Stephens SE, Liachenko S, Ingels NB, Wenk JF, Jensen MO. High resolution imaging of the mitral valve in the natural state with 7 Tesla MRI. *PLoS One*. 2017;12(8):e0184042. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184042

85. Gunnal SA, Wabale RN, Farooqui MS. Morphological study of chordae tendinae in human cadaveric hearts. *Heart Views*. 2015;16(1):1-12. https://doi.org/10.4103/1995-705X.152994

86. Rim Y, Laing ST, McPherson DD, Kim H. Mitral valve repair using ePTFE sutures for ruptured mitral chordae tendineae: a computational simulation study. *Ann Biomed Eng*. 2014;42(1):139-148. https://doi.org/10.1007/s10439-013-0908-1

87. Бокерия Л.А., Лищук В.А., Газизова Д.Ш., Сазыкина Л.В., Соболев А.В., Махмудова А.Н., Неджепов М.Б., Дракина О.В. Концепция регуляции сердечно-сосудистой системы — от управления функциями к согласованию возможностей. Часть 4. Анализ клинического материала. *Клиническая физиология кровообращения*. 2013;1:24-34.
Bokeria LA, Lishchuk VA, Gazizova DSh, Sazykina LV, Sobolev AV, Makhmudova AN, Nejepov MB, Drakina OV. The concept of regulation of the cardiovascular system — from control of functions to coordination of capabilities. Part 4. Analysis of clinical material. *Clinical physiology of blood circulation*. 2013;1:24-34. (In Russ.).

88. Бокерия Л.А., Лищук В.А., Газизова Д.Ш., Сазыкина Л.В., Соболев А.В., Махмудова А.Н., Неджепов М.Б., Дракина О.В. Концепция регуляции сердечно-сосудистой системы — от управления функциями к согласованию возможностей. Часть 5. Роль регуляции. *Клиническая физиология кровообращения*. 2013;1:34-44.
Bokeria LA, Lishchuk VA, Gazizova DSh, Sazykina LV, Sobolev AV, Makhmudova AN, Nejepov MB, Drakina OV. The concept of regulation of the cardiovascular system — from control of functions to coordination of capabilities. Part 5. The role of regulation. *Clinical physiology of blood circulation*. 2013;1:34-44. (In Russ.).

Поступила 13.02.2026
Received 13.02.2026
Принята к печати 11.05.2026
Accepted 11.05.2026