



УДК 612.1 + 616.005

DOI 10.17802/2306-1278-2024-13-3-111-117

## РОЛЬ ГРЕБЕНЧАТЫХ МЫШЦ В ФОРМИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ГЕМОДИНАМИКИ В ПОЛОСТЯХ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА

В.Е. Милюков<sup>1</sup>, В.А. Брюханов<sup>2</sup>, Х.М. Шарифова<sup>2</sup>, К.К. Нгуен<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Островитянова, 1, стр. 6., Москва, Российская Федерация, 117513; <sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), ул. Трубецкая, 8, стр. 2, Москва, Российская Федерация, 119048; <sup>3</sup> Университет им. Йерсена, ул. Тон Тхат Тунг, 27, Далат, Вьетнам

### Основные положения

• Настоящий обзор предваряет планируемое исследование и представляет собой критический анализ доступных в литературе научных работ, посвященных роли гребенчатых мышц в формировании морфофункциональных условий организации внутриполостной гемодинамики в сердце.

### Резюме

В обзоре проанализированы современные публикации по оценке функциональной роли гребенчатых мышц в организации условий движения крови в предсердиях. На основе данного анализа определен ряд вопросов для дальнейших исследований, ответы на которые будут способствовать разработке новых диагностических систем и критериев в кардиологии, а также созданию анатомо-физиологически обоснованных протезов клапанов в кардиохирургии с учетом индивидуальных гидродинамических закономерностей кровотока.

### Ключевые слова

Гребенчатые мышцы • Гемодинамика • Закрученный поток крови • Ушко левого предсердия

Поступила в редакцию: 27.05.2024; поступила после доработки: 19.06.2024; принята к печати: 05.07.2024

## ROLE OF PECTINATE MUSCLES IN HEMODYNAMICS IN THE CAVITIES OF THE HUMAN HEART

V.E. Milyukov<sup>1</sup>, V.A. Bryukhanov<sup>2</sup>, K.M. Sharifova<sup>2</sup>, C.C. Nguyen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «N.I. Pirogov Russian National Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation, 1, bld. 6, Ostrovityanova St., Moscow, Russian Federation, 117513; <sup>2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), 8, Trubetskaya St., bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119048; <sup>3</sup> Yersin university of Da Lat of Viet Nam, 27, Ton That Tung, Ward 8, Da Lat, Vietnam

### Highlights

• This review precedes the planned study and is an analysis of the available works on the role of pectinate muscles in the development of morphological and functional conditions of intracavitary hemodynamics in the heart.

### Abstract

This review presents an analysis of recent publications on the assessment of the functional role of the pectinate muscles in the development of morphological and functional conditions of blood flow in the atria. The results of this analysis helped us to identify a number of topics for further research. The results of this research should help us develop new diagnostic systems and criteria in cardiology field, and assist in furthering research regarding the development of anatomically and physiologically substantiated valve prostheses, taking into account the individual characteristics of the hydrodynamic patterns of blood flow.

### Keywords

Pectinate muscles • Hemodynamics • Swirling blood flow • Left atrial appendage

Received: 27.05.2024; received in revised form: 19.06.2024; accepted: 05.07.2024

Для корреспонденции: Валерий Александрович Брюханов, bryuhanov02@mail.ru; адрес: ул. Трубецкая, 8, стр. 2, Москва, Российская Федерация, 119048

Corresponding author: Valeriy A. Bryukhanov, bryuhanov02@mail.ru; address: 8, Trubetskaya St., bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119048

## Список сокращений

ФП – фибрилляция предсердий

### Введение

Знание функциональной анатомии и физиологии сердечно-сосудистой системы является основным условием понимания всех звеньев патогенеза и, соответственно, разработки патогенетически обоснованных методов лечения заболеваний в кардиологии. Сердечные аритмии – распространенное клиническое проявление широкого спектра видов сердечной патологии. Нарушения ритма сердца обусловлены изменениями источников и регулярности частоты генерации электрических импульсов вследствие нарушения процесса их возникновения и/или проведения, а фибрилляция предсердий (ФП) представляет собой наиболее распространенный вид нарушения сердечного ритма, который характеризуется быстрой и неорганизованной электрической активацией сокращений миокарда предсердий. ФП также ассоциируется с повышенным риском тромбообразования в предсердиях [1]. В свою очередь отсутствие скоординированных сокращений предсердий при ФП приводит к нарушению организации движения крови в полостях сердца, способствуя тромбообразованию и возникновению грозного осложнения – кардиоэмболического инсульта [2, 3]. Доказано, что около трети случаев ишемического инсульта связаны с предшествующей ФП [4]. При этом ушко левого предсердия в 90–100% случаев является основным местом локализации тромбообразования у пациентов с неклапанной, не связанной с ревматическими пороками ФП [5, 6]. Однако в современной литературе, по нашему мнению, в недостаточной степени описаны основы формирования гидродинамических условий движения крови внутри полостей сердца. В частности, исследователи мало уделили внимания влиянию гребенчатых мышц, формирующих неровную поверхность в ушках предсердий, на условия организации кровотока в предсердиях [7].

### Морфология гребенчатых мышц

В правом предсердии гребенчатые мышцы расположены на внутренней поверхности правого ушка предсердия, начинаясь радиально от пограничного гребня, и представляют собой параллельные мышечные тяжи, которые своим видом напоминают гребни расчески. [8]. В левом предсердии гребенчатые мышцы расположены только на внутренней поверхности ушка левого предсердия, что создает неровную поверхность с углублениями между мышечными пучками [9]. Однако, в отличие от гребенчатых мышц в правом предсердии, расположение гребенчатых мышц в левом предсердии

похоже на листья пальмы или они имеют ремневидную форму [10].

Как предполагают А.Р. Stepanchuk с соавт. (2018), в систолу предсердий ушки предсердий за счет сокращающихся гребенчатых мышц и углублений между ними придают турбулентность потоку крови, который устремляется в желудочки [11]. Однако данная гипотеза является спорной, так как другие исследователи считают, что углубления между гребенчатыми мышцами, создавая турбулентность кровотока, могут способствовать тромбообразованию [7]. Также данное мнение противоречит положениям классической триады Вирхова, согласно которой турбулентность кровотока ассоциируется с застоем и является фактором тромбообразования [13].

Для оценки влияния гребенчатых мышц на организацию гемодинамики в предсердиях необходим подробный анализ особенностей кровотока в предсердных полостях.

### Особенности гемодинамики в предсердиях

В гидродинамике жидкость считается сплошной (непрерывной) средой, заполняющей пространство без образования пустот. Все свойства жидкости (плотность, вязкость и др.), если не являются постоянными, то меняются в пространстве непрерывно, т. е. при бесконечно малом перемещении в пространстве получаются и бесконечно малые изменения свойств жидкости. Движение жидкости характеризуется следующими гидромеханическими элементами: скорость движения частиц и гидродинамическое давление.

Так как все реальные жидкости имеют вязкость, в них не может быть взаимного смещения (разрыва) прилегающих друг к другу частиц, поэтому скорости частиц меняются и во времени, и в пространстве непрерывно, т. е. являются в общем случае непрерывными функциями координат пространства и времени. Таким образом, чтобы полностью охарактеризовать картину движения жидкости, необходимо знать гидромеханические элементы во всех точках пространства, занятого движущейся жидкостью, а также ее механические свойства.

Виды движения крови в полостях сердца и по сосудам классически описывают как ламинарные и турбулентные потоки. Ламинарный кровоток характеризуется перемещением слоев жидкости параллельно стенке полости или сосуда, в отличие от турбулентного, где слои передвигаются как параллельно, так и перпендикулярно его стенке [14]. Ламинарное течение крови общепринято считается

преобладающим и физиологически нормальным для сосудов [15]. Однако в сердце при поступлении потоков крови из сосудов, впадающих в предсердия, а затем из предсердий в желудочки, периферийные слои крови могут отклоняться от центрального, что приводит к образованию вихрей, описываемых как закрученное движение крови [16]. Такой вид кровотока называют закручивающимся, или спиральным. Таким образом, очень важно различать понятия «турбулентный» и «закручивающийся» по отношению к виду кровотока, так как турбулентный кровоток характерен больше для сосудов и является фактором тромбообразования, а закручивающийся физиологичен и наблюдается в сердце [17, 18].

Впервые в 2000 г. в исследовании P.J. Kilner и коллег с помощью метода «магнитно-резонансного фазового картирования скорости» было продемонстрировано, что в правом предсердии при поступлении потоков крови в полость предсердия из верхней и нижней полых вен наблюдалось закручивание данных потоков в направлении по часовой стрелке. В левом же предсердии движение крови из легочных вен способствовало суммарному вращательному моменту потока крови против часовой стрелки [19]. F.M. Callaghan и соавт. (2016) заключили, что образующиеся вихри в правом предсердии необходимы для эффективного наполнения правого желудочка, в особенности вихревые образования в полости предсердия обеспечивают непрерывное движение крови во время наполнения и опорожнения, сохраняя кинетическую энергию текущей жидкости и предотвращая замедление перемещения [20]. В левом предсердии во время систолы желудочков при поступлении крови из легочных вен образуется вихревой поток, который далее в фазу быстрого наполнения желудочков гасится с последующим образованием вторичного транзитного предсердного вихревого потока, способствующего ускоренному поступлению крови в левый желудочек в систолу предсердий [21]. При обследовании пациентов, у которых наблюдается образование вихревых потоков, было обнаружено меньше органических заболеваний сердца, а также у них был меньший объем левого предсердия и левого желудочка по сравнению с лицами без вихревых потоков [22]. Таким образом, наличие образования вихревых потоков является нормальным физиологическим процессом. Однако в исследованиях влияние ушек предсердий на образование вихревых потоков не проанализировано в достаточной степени, что требует подробного разбора функциональной анатомии данной структуры.

### Особенности гемодинамики в ушке левого предсердия

Ушко левого предсердия является пальцевидным выступом от полости левого предсердия и наиболее часто расположено между передней и

боковой стенкой левого предсердия [23]. Ушко левого предсердия активно сокращается за счет гребенчатых мышц, расположенных на внутренней поверхности, обеспечивая при этом адекватный поток крови внутри ушка [24, 25]. Кровоток в полости ушка левого предсердия при исследовании методом эхокардиографии в норме описывается как четырехфазный:

1) ранняя диастолическая фаза изгнания, которая предположительно возникает в результате падения давления в левом предсердии при открытии митрального клапана, а также при пассивном внешнем сдавлении ушка наполняющимся левым желудочком;

2) поздняя диастолическая фаза изгнания, возникающая после зубца Р на электрокардиограмме, служащая результатом активного сокращения ушка;

3) диастолическая фаза наполнения ушка, которая возникает сразу после сокращения ушка и является результатом комбинированных эффектов расслабления и упругости;

4) «фаза систолических отражательных волн», функциональное значение которых не до конца изучено [26].

В доступной литературе нам удалось найти исследование, выполненное L.T. Zhang и M. Gay (2008), в котором с помощью компьютерного моделирования подробно проанализирована функциональная роль левого предсердия при наличии и отсутствии ушка левого предсердия. Компьютерное моделирование показало, что предсердие с ушком создает более сильные вихри вблизи отверстия ушка. В начале ранней диастолы при открытии митрального клапана в предсердии с ушком развивается больше вихрей. Предсердие без ушка, в сравнении с предсердием с ушком, имеет несколько более слабые вихри, которых, кроме того, меньше [27]. A.V. Agafonov с соавт. (2021) считают, что образующиеся вихри при сокращении ушка левого предсердия обеспечивают непрерывное движение рабочего объема крови в левом предсердии в фазу медленного наполнения левого желудочка, а также при сокращении ушка увеличиваются азимутальная скорость и динамический градиент давления, что повышает скорость притока крови через легочные вены [28].

Таким образом, с учетом результатов данных исследований можно подтвердить гипотезу о создании закрученного потока крови при сокращении ушка левого предсердия. Однако остается неясным, являются ли вихри, создаваемые сокращением ушка, факторами тромбообразования.

### Гемодинамика в ушках предсердий при фибрилляции предсердий

Как уже отмечено выше, ушко левого предсердия является самым частым местом тромбообразо-

вания при ФП. В ушке правого предсердия также возможно образование тромбов при ФП, приводящее к тромбоэмболии легочной артерии [29].

К основным факторам тромбообразования в ушке левого предсердия при ФП относятся застой крови, ремоделирование ушка при ФП, приводящее к расширению ушка и гипотрофии гребенчатых мышц, и сложная вариативная форма анатомии ушка [30–32]. К. Shinoda и коллеги (2016) выделили еще один фактор тромбообразования – количество и строение гребенчатых мышц. В ушке правого предсердия большинство гребенчатых мышц связаны друг с другом и образуют «дендритный вид», в отличие от ушка левого предсердия, для которого такое строение не характерно. Отмечено, что гребенчатых мышц в ушке правого предсердия меньше, чем в ушке левого предсердия, что может объяснять низкую частоту тромбообразования в нем [33].

ФП влияет на гемодинамику в предсердиях, приводя к застою крови в ушке левого предсердия и последующему тромбообразованию [34]. Как описано выше, сокращения ушка левого предсердия создают вихри, но при синусовом ритме во время систолы предсердий большинство вихревых потоков с массой крови смещается в желудочек [27]. При ФП же в течение всего сердечного цикла появляется больше вихрей. Во время ранней диастолы вихри, образующиеся во время систолы, остаются, сохраняя свою силу и количество. Далее некоторые вихри перераспределяются, в то время как другие остаются на первоначальном месте. В конце диастолы вихри остаются в предсердии, не будучи эффективно смыты в желудочек из-за отсутствия сокращения предсердия. Когда митральный клапан закрывается, эти вихри остаются, хотя их сила и уменьшается. При ФП снижается сократительная функция ушка левого предсердия, что не позволяет эффективно вымывать вихри и приводит впоследствии к застою крови [27, 35]. Не менее важным фактором является то, что при ФП происходит ремоделирование ушка левого предсердия, а именно расширение и растяжение ушка и уменьшение объема гребенчатых мышц в дополнение к эндокардиальному фиброэластозу [36].

Значимыми при изучении условий гемодинамики являются результаты, полученные группой авторов во главе с J. Garcia (2019). Установлено, что размер вихрей у пациентов с ФП в раннюю диастолу был значительно больше, чем у здоровых лиц. Крупные вихревые потоки наблюдались у пациентов с дилатацией левого предсердия, что в совокупности со сниженной сократимостью приводило к застою крови. Также продемонстрирована корреляция размеров вихревых потоков с увеличением возраста, выраженностью ремоделирования

левого предсердия и со шкалой риска CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc [37].

### Гемодинамика в анатомических вариациях строения ушка левого предсердия

Согласно наиболее распространенной классификации, разработанной L. Di Base с соавт. (2012), выделяют следующие формы ушка левого предсердия:

- 1) «кактус» – одна доминирующая центральная доля, от которой вверх и вниз отходят доли поменьше;
- 2) «куриное крыло» – изгиб в средней или проксимальной части ушка;
- 3) «ветроуказатель» – вытянутое ушко;
- 4) «цветная капуста» – сложное внутреннее строение и большое количество долей [38].

Наиболее простые формы ушка (без дополнительных долей) ассоциируются с меньшей частотой тромбоза [39]. В исследовании G.M. Bosi и коллег (2018) с использованием компьютерного моделирования установлено, что лучше всего кровь элиминировалась из ушка формы ветроуказателя, в отличие от ушка с формой цветной капусты, что свидетельствует о более высоком риске тромбообразования при данной форме [40]. Данные исследования I.M. Khurram с соавт. (2013) подтверждают, что ушки, имеющие форму цветной капусты или приближенную к ней, из-за наличия маленьких долей и толстых гребенчатых мышц являются независимыми факторами тромбообразования у пациентов с ФП [41]. Однако следует отметить, что в других работах сообщается об уменьшении объема гребенчатых мышц при ФП [36]. В доступной нам литературе не удалось найти исследований, содержащих описание влияния разных морфологических форм ушка левого предсердия на создание закрученного движения крови в левом предсердии. Тем не менее, например в исследовании A. Masci и коллег (2019), в котором выполнено моделирование и оценка влияния разных форм ушка при ФП на гемодинамику, продемонстрировано, что при ФП не извилистые формы ушка с небольшой длинной меньше всего подвержены застою крови, при этом в них возникали вихревые потоки с большей величиной, чем в извилистых формах ушек [42].

### Обсуждение

Активное развитие кардиологии и появление новых способов визуализации внутриполостного кровотока в сердце дает возможность для более подробного рассмотрения гидродинамических закономерностей и условий движения крови в предсердиях и желудочках как в норме, так и при различных заболеваниях, способствующих внутриполостному тромбообразованию. Классические теории, согласно которым выделяют ламинарный

и турбулентный виды кровотока, не позволяют ответить на ряд вопросов, связанных с ролью внутренних структур в организации потоков крови и индивидуальной предрасположенностью к тромбообразованию. Результаты многочисленных исследований показали, что в сердце наблюдается образование вихревых потоков крови [19–21]. Данный тип кровотока получил название «закручивающийся», или «спиральный», и в отличие от турбулентного кровотока сосудов является физиологичным, так как обеспечивает эффективное сохранение кинетической энергии крови во время сердечного цикла [43].

Проанализировав доступную литературу, мы пришли к выводу, что гребенчатые мышцы, которые располагаются на внутренней поверхности ушек предсердий, сокращаясь, не только способствуют сокращению ушек предсердий, но и благодаря сложному геометрическому расположению в ушках – созданию закрученного потока крови. Остается неизученной физиологическая роль образующегося закрученного потока крови, но некоторые авторы считают, что данный поток обеспечивает непрерывное движение рабочего объема крови в левом предсердии, повышая скорость притока крови через легочные вены [28]. В условиях ФП углубления между гребенчатыми мышцами становятся местами, предрасположенными к образованию тромбов из-за низких скоростей потока крови и турбулентности. Следовательно, гребенчатые мышцы способствуют как нормальной гемодина-

мике предсердий, так и являются фактором тромбообразования в патологических условиях.

Тем не менее представленные в литературе данные не позволяют точно ответить на следующие вопросы: каким образом анатомические вариации ушка левого предсердия влияют на создание закрученных потоков при синусовом ритме; какова функциональная роль закручивающегося потока, создаваемого гребенчатыми мышцами и ушком левого предсердия; какое влияние оказывают гребенчатые мышцы на гемодинамику в правом предсердии и его ушке. Ответы на данные вопросы и подтверждение гипотез, вероятнее всего, позволят разработать новые диагностические системы и критерии в кардиологии, а также создать анатомио-физиологически обоснованные протезы клапанов для нужд кардиохирургии с учетом индивидуальных гидродинамических закономерностей кровотока.

### Конфликт интересов

В.Е. Милуков заявляет об отсутствии конфликта интересов. В.А. Брюханов заявляет об отсутствии конфликта интересов. Х.М. Шарифова заявляет об отсутствии конфликта интересов. К.К. Нгуен заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии финансирования исследования.

### Информация об авторах

*Милуков Владимир Ефимович*, доктор медицинских наук, профессор и. о. заведующего кафедрой топографической анатомии и оперативной хирургии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-8552-6727

*Брюханов Валерий Александрович*, студент Международной школы «Медицина будущего» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-8445-3688

*Шарифова Хейля Муришуд кызы*, кандидат медицинских наук старший преподаватель кафедры анатомии человека федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-3966-0738

*Нгуен Као Кыонг*, кандидат медицинских наук декан факультета фармако-медсестринского дела Университета им. Йерсена, Далат, Вьетнам; **ORCID** 0000-0003-2190-6648

### Author Information Form

*Milyukov Vladimir E.*, PhD, Professor, Acting Head of the Department of Topographic Anatomy and Operative Surgery, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “N.I. Pirogov Russian National Research Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-8552-6727

*Bryukhanov Valery A.*, student, International School “Medicine of the Future” of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “I.M. Sechenov First Moscow State Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-8445-3688

*Sharifova Heyala Murshud kyzy*, PhD, Senior Lecturer at the Department of Human Anatomy, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “I.M. Sechenov First Moscow State Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-3966-0738

*Nguyen Cao Cuong*, PhD, Dean of the Faculty of Pharmacy and Nursing, Yersin University of Da Lat of Vietnam, Da Lat, Vietnam; **ORCID** 0000-0003-2190-6648

## Вклад авторов в статью

*МВЕ* – вклад в концепцию исследования, написание и корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*БВА* – получение и интерпретация данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*ШХМ* – интерпретация данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*НKK* – получение и интерпретация данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

## Author Contribution Statement

*MVE* – contribution to the concept of the study, manuscript writing, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

*BVA* – data collection and interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*ShKhM* – data interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

*NKK* – data collection and interpretation, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Hindricks, Gerhard et al. “2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): The Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC.” *European heart journal* vol. 42,5 (2021): 373-498. doi:10.1093/eurheartj/ehaa612
- Best, J. G., Bell, R., Haque, M., Chandratheva, A., & Werring, D. J. (2019). Atrial fibrillation and stroke: a practical guide. *Practical Neurology*, practneurol-2018-002089. doi:10.1136/practneurol-2018-002089
- Jame, S., & Barnes, G. (2019). Stroke and thromboembolism prevention in atrial fibrillation. *Heart*, heartjnl-2019-314898. doi:10.1136/heartjnl-2019-314898
- Yiin, Gabriel S C et al. “Time Trends in Atrial Fibrillation-Associated Stroke and Premorbid Anticoagulation.” *Stroke*, vol. 50,1 STROKEAHA118022249. 29 Nov. 2018, doi:10.1161/STROKEAHA.118.022249
- Di Biase, Luigi et al. “Thrombogenic and Arrhythmogenic Roles of the Left Atrial Appendage in Atrial Fibrillation.” *Circulation* vol. 138,18 (2018): 2036-2050. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034187
- Cresti, Alberto et al. “Prevalence of extra-appendage thrombosis in non-valvular atrial fibrillation and atrial flutter in patients undergoing cardioversion: a large transoesophageal echo study.” *EuroIntervention : journal of EuroPCR in collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology* vol. 15,3 e225-e230. 12 Jun. 2019, doi:10.4244/EIJ-D-19-00128
- Peter J. Bazira, *Clinically applied anatomy of the heart, Surgery (Oxford), Volume 39, Issue 3, 2021, Pages 117-125, ISSN 0263-9319, doi.org:10.1016/j.jmps.2021.01.004*
- Ueda, Akiko et al. “Right atrial appendage and vestibule: further anatomical insights with implications for invasive electrophysiology.” *Europace : European pacing, arrhythmias, and cardiac electrophysiology : journal of the working groups on cardiac pacing, arrhythmias, and cardiac cellular electrophysiology of the European Society of Cardiology* vol. 15,5 (2013): 728-34. doi:10.1093/europace/eus382
- Hensley, Mark et al. “A Review of the Anatomical and Histological Attributes of the Left Atrial Appendage with Descriptive Pathological Examination of Morphology and Histology.” *Journal of atrial fibrillation* vol. 10,6 1650. 30 Apr. 2018, doi:10.4022/jafib.1650
- The Left Atrial Appendage: Anatomy, Function, and Noninvasive Evaluation. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 7(12), 1251–1265. doi:10.1016/j.jcmg.2014.08.009
- Morphofunctional purpose of human atrial auricles / A. P. Stepanchuk, N. V. Royko, B. M. Fylenko, A. M. Pryshlyak // *Світ медицини та біології*. – 2018. – Vol. 14. – No 3(65). – P. 185-189. – DOI 10.26724/2079-8334-2018-3-65-185-189.
- Ding, W. Y., Gupta, D., & Lip, G. Y. H. (2020). Atrial fibrillation and the prothrombotic state: revisiting Virchow’s triad in 2020. *Heart*, heartjnl-2020-316977. doi:10.1136/heartjnl-2020-316977
- Ding, Wern Yew et al. “Atrial fibrillation and the prothrombotic state: revisiting Virchow’s triad in 2020.” *Heart (British Cardiac Society)* vol. 106,19 (2020): 1463-1468. doi:10.1136/heartjnl-2020-316977
- 4D MR flowmetry of vortical fluid flows in elastic tubes / A. Khe, V. Vanina, A. Cherevko [et al.] // *AIP Conference Proceedings, Novosibirsk, 13–19 августа 2018 года. – Novosibirsk: American Institute of Physics Inc., 2018. – P. 030123. – DOI 10.1063/1.5065217.*
- Thomas, B., & Sumam, K. S. (2016). Blood Flow in Human Arterial System-A Review. *Procedia Technology*, 24, 339–346. doi:10.1016/j.protecy.2016.05.045
- Advances in echocardiography: global longitudinal strain, intra-cardiac multidirectional flow imaging and automated 3d volume analysis / O. Baysan, E. P. Ocakli, Ya. Saglam, T. K. Altuner // *Heart, Vessels and Transplantation. – 2018. – Vol. 2. – No 4. – P. 113-122. – DOI 10.24969/hvt.2018.83.*
- Li, Yu et al. “Analysis and preparation of rotational flow mechanism of artificial blood vessel with spiral folds on inner wall.” *Biomechanics and modeling in mechanobiology* vol. 18,2 (2019): 411-423. doi:10.1007/s10237-018-1092-x
- Demirkiran, Ahmet et al. “Left ventricular four-dimensional blood flow distribution, energetics, and vorticity in chronic myocardial infarction patients with/without left ventricular thrombus.” *European journal of radiology* vol. 150 (2022): 110233. doi:10.1016/j.ejrad.2022.110233
- Kilner, P. J., Yang, G.-Z., Wilkes, A. J., Mohiaddin, R. H., Firmin, D. N., & Yacoub, M. H. (2000). Asymmetric redirection of flow through the heart. *Nature*, 404(6779), 759–761. doi:10.1038/35008075
- Callaghan, F. M., Arnott, C., Figtree, G. A., Kutty, S., Celermajer, D. S., & Grieve, S. M. (2016). Quantifying right atrial filling and emptying: A 4D-flow MRI study. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 45(4), 1046–1054. doi:10.1002/jmri.25457
- Gaeta, S., Dyverfeldt, P., Eriksson, J., Carlhäll, C.-J., Ebbers, T., & Bolger, A. F. (2018). Fixed volume particle trace emission for the analysis of left atrial blood flow using 4D Flow MRI. *Magnetic Resonance Imaging*, 47, 83–88. doi:10.1016/j.mri.2017.12.008
- Suwa, Kenichiro et al. “Characteristics of intra-left atrial flow dynamics and factors affecting formation of the vortex flow – analysis with phase-resolved 3-dimensional cine phase contrast magnetic resonance imaging.” *Circulation journal : official journal of the Japanese Circulation Society* vol. 79,1 (2015): 144-52. doi:10.1253/circj.CJ-14-0562
- Beigel, R., Wunderlich, N. C., Ho, S. Y., Arsanjani, R., & Siegel, R. J. (2014). The Left Atrial Appendage: Anatomy, Function, and Noninvasive Evaluation. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 7(12), 1251–1265. doi:10.1016/j.jcmg.2014.08.009
- Kim, Y. G., Shim, J., Oh, S.-K., Lee, K.-N., Choi, J.-I., & Kim, Y.-H. (2018). Electrical isolation of the left atrial appendage increases the risk of ischemic stroke and transient ischemic attack regardless of postisolation flow velocity. *Heart Rhythm*, 15(12),

1746–1753. doi:10.1016/j.hrthm.2018.09.012

25. Domínguez, H., Madsen, C. V., Westh, O. N. H., Pallesen, P. A., Carranza, C. L., Irmukhamedov, A., & Park-Hansen, J. (2018). Does Left Atrial Appendage Amputation During Routine Cardiac Surgery Reduce Future Atrial Fibrillation and Stroke? *Current Cardiology Reports*, 20(10). doi:10.1007/s11886-018-1033-4

26. Patti, Giuseppe et al. “The left atrial appendage: from embryology to prevention of thromboembolism.” *European heart journal* vol. 38,12 (2017): 877-887. doi:10.1093/eurheartj/ehw159

27. Zhang, L. T., & Gay, M. (2008). Characterizing left atrial appendage functions in sinus rhythm and atrial fibrillation using computational models. *Journal of Biomechanics*, 41(11), 2515–2523. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.05.01

28. Agafonov, A V et al. “The Hydrodynamics of a Swirling Blood Flow in the Left Heart and Aorta.” *Actanaturae* vol. 13,4 (2021): 4-16. doi:10.32607/actanaturae.11439

29. Ptaszynska-Kopczynska, Katarzyna et al. “Atrial Fibrillation in Patients with Acute Pulmonary Embolism: Clinical Significance and Impact on Prognosis.” *BioMed research international* vol. 2019 7846291. 19 Aug. 2019, doi:10.1155/2019/7846291

30. Naksuk, N., Padmanabhan, D., Yogeswaran, V., & Asirvatham, S. J. (2016). Left Atrial Appendage. *JACC: Clinical Electrophysiology*, 2(4), 403–412. doi:10.1016/j.jacep.2016.06.006

31. Richardson, Aaron C et al. “Right Atrial Appendage Thrombus in Atrial Fibrillation: A Case Report and Review of the Literature.” *Journal of investigative medicine high impact case reports* vol. 9 (2021): 23247096211010048. doi:10.1177/23247096211010048

32. Yamamoto, Masayoshi et al. “Complex left atrial appendage morphology and left atrial appendage thrombus formation in patients with atrial fibrillation.” *Circulation. Cardiovascular imaging* vol. 7,2 (2014): 337-43. doi:10.1161/CIRCIMAGING.113.001317

33. Shinoda, Koichi et al. “Structural Comparison between the Right and Left Atrial Appendages Using Multidetector Computed Tomography.” *BioMed research international* vol. 2016 (2016): 6492183. doi:10.1155/2016/6492183

34. Koizumi, R., Funamoto, K., Hayase, T., Kanke, Y., Shibata, M., Shiraishi, Y., & Yambe, T. (2015). Numerical analysis of hemodynamic changes in the left atrium due to atrial fibrillation. *Journal of Biomechanics*, 48(3), 472–478. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.12.02

35. Yildirim, T., Akin, F., Avci, E., Altun, I., Yildirim, S. E., & Soyly, M. O. (2018). Paroxysmal Atrial Fibrillation and Stroke. *The American Journal of Cardiology*, 121(8), e42. doi:10.1016/j.amjcard.2018.03.119

36. Whiteman, S., Saker, E., Courant, V., Salandy, S., Gielecki, J., Zurada, A., & Loukas, M. (2019). An anatomical review of the left atrium. *Translational Research in Anatomy*, 17, 100052. doi:10.1016/j.tria.2019.100052.

37. Garcia, Julio et al. “Left atrial vortex size and velocity distributions by 4D flow MRI in patients with paroxysmal atrial fibrillation: Associations with age and CHA2 DS2 -VASc risk score.” *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI* vol. 51,3 (2020): 871-884. doi:10.1002/jmri.26876

38. Di Biase, Luigi et al. “Does the left atrial appendage morphology correlate with the risk of stroke in patients with atrial fibrillation? Results from a multicenter study.” *Journal of the American College of Cardiology* vol. 60,6 (2012): 531-8. doi:10.1016/j.jacc.2012.04.032

39. He, Jionghong et al. “The predictive value of a concise classification of left atrial appendage morphology to thrombosis in non-valvular atrial fibrillation patients.” *Clinical cardiology* vol. 43,7 (2020): 789-795. doi:10.1002/clc.23381

40. Bosi, Giorgia Maria et al. “Computational Fluid Dynamic Analysis of the Left Atrial Appendage to Predict Thrombosis Risk.” *Frontiers in cardiovascular medicine* vol. 5 34. 4 Apr. 2018, doi:10.3389/fcvm.2018.00034

41. Khurram, Irfan M et al. “Relationship between left atrial appendage morphology and stroke in patients with atrial fibrillation.” *Heart rhythm* vol. 10,12 (2013): 1843-9. doi:10.1016/j.hrthm.2013.09.065

42. Masci, Alessandro et al. “The Impact of Left Atrium Appendage Morphology on Stroke Risk Assessment in Atrial Fibrillation: A Computational Fluid Dynamics Study.” *Frontiers in physiology* vol. 9 1938. 22 Jan. 2019, doi:10.3389/fphys.2018.01938

43. Kim, In-Cheol, and Geu-Ru Hong. “Intraventricular Flow: More than Pretty Pictures.” *Heartfailureclinics* vol. 15,2 (2019): 257-265. doi:10.1016/j.hfc.2018.12.005

**Для цитирования:** Милуков В.Е., Брюханов В.А., Шарифова Х.М., Нгуен К.К. Роль гребенчатых мышц в формировании условий гемодинамики в полостях сердца человека. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2024;13(3): 111-117. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-3-111-117

**To cite:** Milyukov V.E., Bryukhanov V.A., Sharifova K.M., Nguyen C.C. Role of pectinate muscles in hemodynamics in the cavities of the human heart. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2024;13(3): 111-117. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-3-111-117