

СРАВНИТЕЛЬНОЕ АНАТОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ПОЛОСТИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА У ЖИВОТНЫХ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА НА ОСНОВАНИИ КОНЦЕПЦИИ СМЕРЧЕОБРАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

© 2020 г. М.М. Тхагапсова, Е.А. Талыгин, Ш.Т. Жоржолиани, А.В. Агафонов, А.В. Дорофеев, А.Ю. Городков, Г.И. Кикнадзе, Л.А. Бокерия

Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева Минздрава России, 121552, Москва, Рублевское шоссе, 135

E-mail: mthagapsova@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2018 г.

После доработки 10.05.2019 г.

Принята к публикации 21.08.2019 г.

Целью работы являлось обоснование единого механизма обтекания проточного канала левого желудочка сердца независимо от принадлежности виду на основании анатомического исследования принципов ориентации трабекул в полости левого желудочка экспериментальных животных разного размера (крыс, кроликов, собак) и человека. Измерение внутрисердечного трабекулярного рельефа производили на слепках полости левого желудочка животных разного размера и человека. Слепки каждого вида животных и человека выбирали примерно одинакового размера, что позволило повысить достоверность измерений. В качестве гидродинамической модели для количественной оценки параметров внутрисердечного кровотока были использованы точные решения нестационарных уравнений гидродинамики для класса смерчеобразных закрученных потоков вязкой жидкости. Построение графической зависимости степени закрутки от объемного показателя струи показало непрерывность гиперболической функции на всех слепках с высокой точностью аппроксимации полученных данных (R^2 варьирует от 0.7963 до 0.9081), то есть все точки, принадлежащие этим зависимостям, соответствуют условию сходимости $Z_i R_i^2 = \text{const}$ и могут принадлежать сингулярной закрученной струе, образуя ограничивающую ее поверхность. Графическое отображение зависимости объемного показателя струи от продольной координаты при различных углах фиксации слепков во всех случаях носит линейный характер. Высокая точность аппроксимации массива полученных данных (R^2 варьирует от 0.7882 до 0.8853) позволяет судить об идентичном принципе закрутки и аккумуляции энергии движения доминантной струи как у животных, так и у человека. Таким образом, доказано, что ориентация и координированное сокращение группы трабекул играют определяющую роль в формировании закрученного внутрисердечного потока крови и соответствуют общему механизму транспорта крови у животных и человека, независимо от размеров проточного канала сердца.

Ключевые слова: левый желудочек, трабекулы, смерчеобразные потоки.

DOI: 10.31857/S0006302920010184

Анализ гидродинамической структуры потока крови в сердце и магистральных сосудах с точки зрения традиционной гидродинамики, основанной на анализе ламинарно-турбулентного перехода, содержит ряд имманентных противоречий. Эти противоречия заключаются в том, что при увеличении калибра сосудов от мелких к крупным животным или в результате роста, в определенных участках русла ламинарное течение должно становиться турбулентным при той же скорости течения. Однако из соображений физиологического единообразия трудно себе представить, что движение крови осуществляется по-

разному у особей разного размера. Кроме того, изменение структуры течения по мере увеличения просветов проточного канала сердца и сосудов в результате роста животного или человека должно быть связано со скачкообразным ростом энергозатрат и гидродинамического сопротивления [1–3].

Многочисленные исследования, в которых структура внутрисердечного потока крови была описана с помощью методов вычислительной гидродинамики, позволяют воспроизвести картину течения в узком диапазоне состояний и не раскрывают механизмов регуляции или компен-

сации кровообращения. Попытки учета этих факторов в подобных моделях, как правило, приводили к потере устойчивости модели или к неоправданному усложнению соотношений и структуры результирующего течения [4].

Многими авторами, начиная с 30-х годов XX века, показано, что движение крови в камерах сердца и в магистральных сосудах осуществляется вдоль определенных закрученных линий тока [1, 5, 6]. Такой механизм движения крови должен способствовать минимизации возмущений в потоке, которые неизбежно связаны с риском активации биологически активных компонентов крови и сосудистой стенки. Однако вплоть до последнего времени отсутствовала подходящая гидродинамическая модель для анализа закрученного ламинаризованного течения, что делало невозможным выбор адекватных экспериментальных подходов к исследованию потока крови.

В ранее опубликованных работах [6–8] в качестве такой гидродинамической модели были предложены течения, описываемые точными решениями нестационарных уравнений гидродинамики для класса самоорганизующихся смерчеобразных потоков вязкой жидкости [2]. Эти решения были успешно использованы для описания геометрической конфигурации левого желудочка сердца и аорты и позволили доказать, что продольно-радиальный профиль проточного канала в этом сегменте системы кровообращения соответствует направлениям линий тока смерчеобразного течения. Также анализ архитектоники трабекулярного слоя в полости левого желудочка позволил из общей массы трабекул и папиллярных мышц выделить две спирально ориентированные группы, играющие роль направляющих лопаток при обтекании кровью внутреннего рельефа левого желудочка. Их пространственное расположение также соответствует направлениям линий тока течения, описываемого точными решениями. При этом в фазу диастолического наполнения левого желудочка основную роль играют трабекулы свободной стенки, формирующие структуру наполняющего потока, а поток, изгоняемый во время систолы, формируется вдоль направлений папиллярных мышц и трабекул пердне-перегородочного угла [6–8].

Координированная экспрессия указанных мышечных структур в полости левого желудочка сердца в зависимости от фазы сокращения обеспечивает условия структурной организации внутрижелудочкового закрученного потока крови в течение всего сердечного цикла и может быть проанализирована с помощью указанных точных решений.

Цель данного исследования заключалась в обосновании единого механизма обтекания проточного канала левого желудочка сердца на осно-

вании анатомического исследования принципов ориентации трабекул в полости левого желудочка экспериментальных животных разного размера и человека.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНУТРИСЕРДЕЧНОГО КРОВОТОКА

Для количественной оценки параметров внутрисердечного кровотока в рамках исследования были использованы точные решения нестационарных уравнений гидродинамики для класса смерчеобразных закрученных потоков вязкой жидкости. После ряда преобразований точные решения для смерчеобразной струи с единственной циркуляцией [2] имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} V_r &= -C_0(t)r \\ V_z &= 2C_0(t)z \\ V_\varphi &= \frac{\Gamma_0(t)}{2\pi r} \left(1 - e^{-\frac{C_0(t)r^2}{2\nu}} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где V_z – продольная, V_r – радиальная, а V_φ – азимутальная компоненты скорости; $C_0(t)$ – произвольная функция времени, соответствующая по физическому смыслу радиальному градиенту скорости, с^{-1} ; $\Gamma_0(t)$ – произвольная функция времени, соответствующая по физическому смыслу циркуляции среды, $\text{м}^2/\text{с}$; r – расстояние по нормали от продольной оси Z до радиальной границы потока; ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$. $C_0(t)$ и $\Gamma_0(t)$ зависят от времени в силу нестационарности потока и в случае сердца циклически изменяются в соответствии с пульсационными изменениями поля скоростей.

Точные решения выражены в цилиндрической системе координат, положение которой зависит от мгновенного состояния и расположения закрученной струи. При этом точка начала координат соответствует точке, в которой все составляющие скорости равны нулю и может перемещаться вместе со струей [2, 8]. Тогда в соответствии с точными решениями, начиная от этой точки, в каждый момент времени вдоль канала должно выполняться соотношение:

$$Z_i R_i^2 = \text{const}, \quad (2)$$

где Z_i и R_i – текущие значения продольной и радиальной координаты. На бьющемся сердце положение начала координат и величина const , пропорциональная мгновенному значению объема закрученной струи, являются время-зависимыми функциями и циклически меняются в соответствии с динамикой сердечного сокращения.

Преимущественная спиральная ориентация внутрижелудочковых анатомических структур,

несмотря на сложности их идентификации и измерения, позволяет восстановить оси симметрии отдельно для диастолической и систолической групп трабекул, измерить радиус круглых каналов, ограниченных соответствующим семейством спирально ориентированных трабекул, и определить расстояние любой точки на каждой оси относительно неподвижного топографического ориентира. Зная хотя бы два значения радиуса вдоль оси симметрии проточного канала, можно вычислить положение точки начала координат в соответствии с соотношением $Z_i R_i^2 = \text{const}$. При этом значение продольной координаты для каждой точки будет равно величине $Z_i + Z_0$, где Z_i – измеренное расстояние до выбранного анатомического ориентира, а Z_0 – вычисленное расстояние от этого анатомического ориентира до начала цилиндрической системы координат, в которой может быть описана смерчеобразная струя, формируемая под действием рассматриваемого сегмента рельефа.

Для минимизации ошибок, неизбежных при исследовании посмертных слепков, были введены следующие условия, вытекающие из точных решений и ограничивающие выбор данных:

1. Вдоль выбранной оси с увеличением величины Z_i по направлению течения величина R_i всегда уменьшается.

2. Угол наклона отдельной трабекулы (α_i) к оси симметрии, построенной относительно группы трабекул вдоль направления течения крови в определенную фазу сердечного цикла, всегда уменьшается.

Введение этих условий позволяет вычислить значения следующих структурных параметров потока, формируемого вдоль исследуемого трабекулярного профиля [8]:

$$Q(t) = (Z_i + Z_0)R_i^2, \quad (3)$$

$$\frac{C_0(t)}{\Gamma_0(t)} = \frac{\text{ctg}\alpha_i R_i}{4\pi Q(t)}. \quad (4)$$

Эти параметры имеют конкретный физиологический смысл. Величина $Z_i + Z_0$ соответствует значению полной продольной координаты вдоль потока и определяет мгновенное положение начала цилиндрической системы координат при каждом состоянии струи. Величина $Q(t)$ соответствует константе в соотношении (2) и пропорциональна объему закрученной струи на отрезке от начала координат до соответствующего значения $Z_i + Z_0$.

В соответствии с точными решениями (1) величина $[C_0/\Gamma_0](t)$ пропорциональна отношению продольной и азимутальной составляющих скорости и отражает степень закрученности потока.

Как видно из соотношений (3) и (4), величины $(Z_i + Z_0)$, $Q(t)$ и $[C_0/\Gamma_0](t)$ функционально связаны друг с другом. Величина $[C_0/\Gamma_0](t)$ обратно пропорциональна величине $Q(t)$, а величина $Z_i + Z_0$ прямо пропорциональна величине $Q(t)$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из большого количества изготовленных слепков полости левого желудочка сердца были выбраны шесть слепков левого желудочка сердца человека, пять слепков левого желудочка сердца собак, четыре слепка левого желудочка сердца кроликов и шесть слепков левого желудочка сердца крыс. Этот выбор был обусловлен возможностью идентифицировать трабекулы диастолической и систолической групп на одном слепке. Слепки каждого вида животных и человека выбирали примерно одинакового размера. Это позволило объединить все данные в единый массив, чтобы повысить статистическую достоверность полученных результатов.

Для получения слепков подопытных животных полость левого желудочка до извлечения из трупа заполняли жидкой протакриловой массой и оставляли затвердевать на сутки. Далее выделяли сердце вместе с окружающими тканями и помещали в концентрированный раствор соляной кислоты или едкого калия на двое суток до полного растворения биологических тканей. Готовые слепки промывали под проточной водой, высушивали и измеряли. Слепки левого желудочка сердца человека были получены по аналогичной методике с соблюдением правил патологоанатомического исследования у лиц, умерших от причин, не связанных с сердечно-сосудистой патологией.

По данным предыдущих исследований трабекулы левого желудочка сердца были разделены на две группы. Диастолические трабекулы, отвечающие за наполнение полости левого желудочка, расположены преимущественно на свободной и передней стенках полости левого желудочка и образуют осесимметричную спиральную структуру, ось которой проходит между центром митрального клапана и верхушкой левого желудочка. Расположенные в передне-перегородочной части систолические трабекулы и папиллярные мышцы образуют семейство кривых, составляющих спиральную систему линий вокруг оси, соединяющей условную точку, расположенную в нижней трети свободной стенки левого желудочка, и центр аортального клапана [6–8]. Относительно этой оси полость левого желудочка вместе с аортальным конусом легко представляется в виде сходящегося канала, основанием которого является свободная стенка левого желудочка сердца, а сужающаяся часть соответствует выходу в аорту.

Учитывая, что выбранные посмертные слепки левого желудочка позволяют визуализировать как систолические, так и диастолические трабекулы, независимо от фазы сердечного цикла, восстановление преимущественных направлений ориентации трабекул обеих групп относительно соответствующего начала координат позволяет проследить весь процесс эволюции смерчеобразной струи в полости сердца. Для каждой группы спирально ориентированных трабекул были измерены значения продольной координаты от указанных анатомических ориентиров, соответствующие им значения радиуса и углы наклона трабекулярных линий к соответствующей оси (рис. 1а).

Морфометрические измерения крупных слепков (человек, собака) проводили с помощью специально разработанного устройства, позволяющего закреплять слепки в определенном положении, и координаты каждой точки на поверхности фиксировали в цилиндрической системе координат. Измерения мелких слепков (кролик, крыса) производили по фотографическим изображениям, сделанным при фиксированном угле поворота (рис. 1б). Трабекулы маркировали.

Исходя из предполагаемых направлений движения крови, выбирали две группы спирально ориентированных трабекулярных линий, соответствующие наполнению или изгнанию из левого желудочка. Затем для обеих групп трабекул выбирали направление оси с учетом возможности ее проецирования на поверхности при любом положении слепка в поворотном устройстве. Положение оси должно удовлетворять условиям симметрии каждой группы трабекул. Правильность выбора оси проверяли по углу наклона параллельных трабекулярных линий в каждой проекции слепка при его повороте вокруг соответствующей оси. При этом измеряли следующие величины: расстояние от выбранного начала оси (центр митрального клапана для диастолических трабекул и точка в нижней трети свободной стенки левого желудочка для систолических трабекул), расстояние от оси до трабекулы (это расстояние соответствует радиусу проточного канала в соответствующей проекции полости) и угол наклона трабекулы относительно оси. В зависимости от визуальной доступности трабекулярных структур, слепок поворачивали вокруг оси с шагом от 30° до 60° и фотографировали для получения плоского изображения. Затем с помощью транспортира и линейки (рис. 1в) измеряли углы наклона доступных пар трабекул при фиксированных значениях Z вдоль выбранной оси в точке пересечения трабекулярных линий и проекции оси на поверхность слепка, а также радиусы полости в этих точках. После обнаружения такого по-

ложения оси, при котором выполнялись условия равенства угла наклона трабекул при одном и том же значении продольной координаты и условие уменьшения радиуса вдоль продольной координаты, результаты измерений использовали для расчета значений структурных параметров потока крови C_0/Γ_0 , Q и Z по соотношениям (2)–(4). Измерения проводили в максимально возможном количестве точек на каждом слепке и объединяли в один массив для каждого вида, считая, что для слепков примерно одинакового размера положение трабекул изменяется мало. Обработка полученных данных была выполнена в программе MS Excel.

Статистический анализ. Экспериментально полученные данные $[C_0/\Gamma_0](Q)$ аппроксимировали к степенной функции с показателем степени -1 , а $Q(Z)$ – к линейной функции. Точность полученной аппроксимации оценивали по величине достоверности R^2 ($R^2 > 0.7$ свидетельствует о высокой точности аппроксимации).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках рассматриваемой гипотезы поток крови в полости левого желудочка должен формироваться под действием координированного движения стенок левого желудочка и экспрессии трабекулярного рельефа. При этом поток не может быть направлен поперек трабекул, т.е. положение трабекул в каждой фазе сердечного цикла должно соответствовать направлениям линий тока и, в случае соответствия структуры потока течению, описываемому точными решениями, эти направления должны соответствовать зависимостям, вытекающим из точных решений.

В соответствии с точными решениями движение среды в смерчеобразных потоках происходит вдоль линий тока, направленных по конвергентной спирали относительно оси потока. Если движение жидкости осуществляется в канале, имеющем подвижные стенки и направляющий профиль, повторяющий структуру закрученной струи, то точные решения могут быть использованы для установления связи пространственной конфигурации канала с полем скоростей струи [6–8].

Для оценки соответствия анатомического строения полости левого желудочка сердца условиям самоорганизации и эволюции смерчеобразной струи были построены графические зависимости $[C_0/\Gamma_0](Q)$ и $Q(Z)$ для слепков левых желудочков крыс, кроликов, собак и человека. Построение этих зависимостей отдельно для диастолических и систолических трабекул не позволило выявить какую-либо определенную законо-

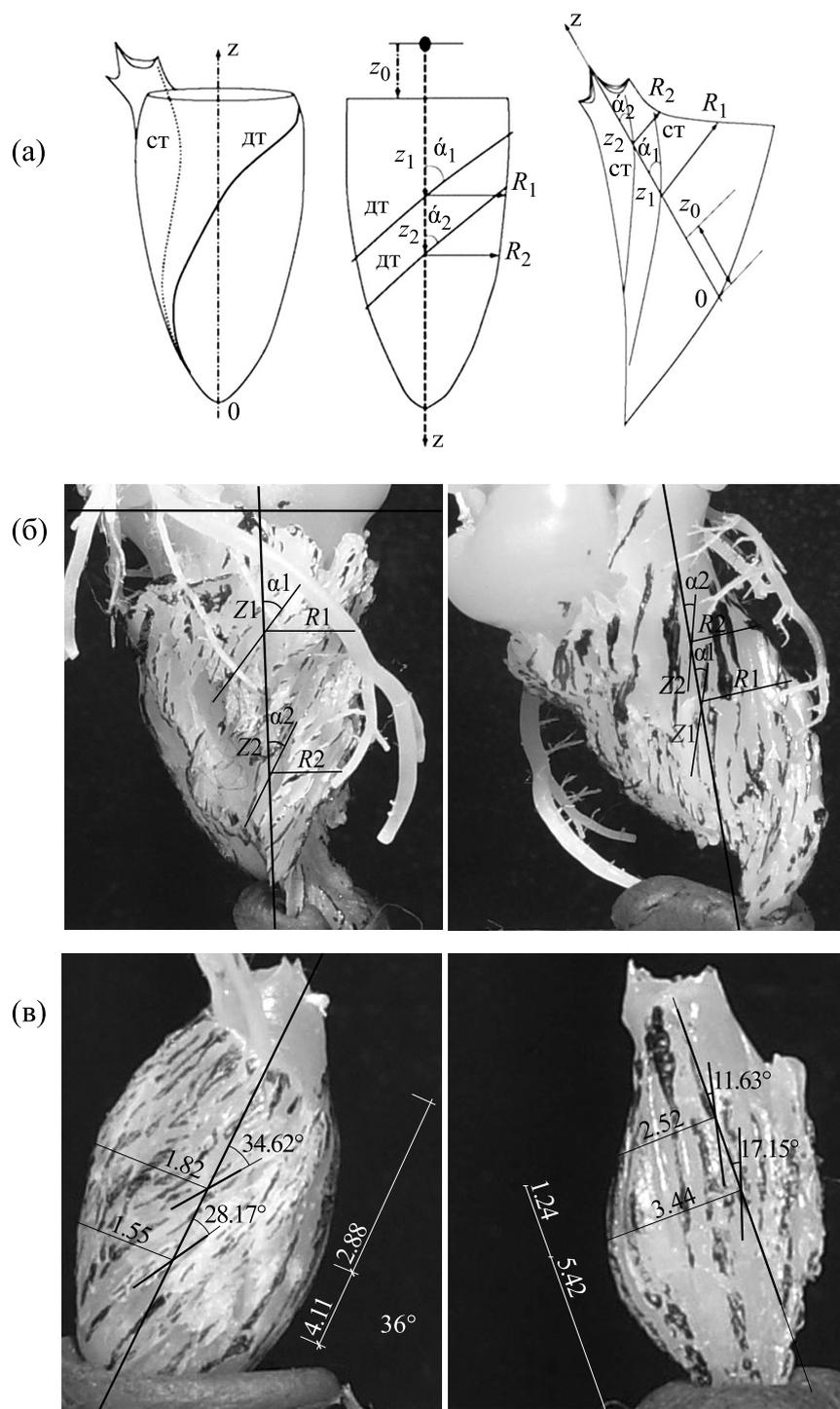


Рис. 1. (а) — Слева показаны линии преимущественного направления трабекул левого желудочка сердца («дт» — диастолические, «ст» — систолические трабекулы); в центре — показан принцип измерения продольной координаты, соответствующего этой координате радиуса вихря — расстояния от продольной оси по нормали к ближайшей трабекуле, а также угол наклона касательной для расчета структурных параметров внутрисердечного потока крови для диастолической системы трабекул; справа — показан принцип измерения тех же параметров для систолической системы трабекул. (б) — Принцип маркировки и расчета параметров для диастолических (слева) и систолических (справа) трабекул слепка левого желудочка кролика, фиксированного в вертикальном положении. (в) — Расчет параметров маркированных диастолических (слева) и систолических (справа) трабекул по фотографическому изображению слепка левого желудочка сердца крысы.

мерность. Однако построение данных зависимостей в виде объединенного массива данных, полученных как с диастолических, так и с систолических трабекул, однозначно указывает на наличие тесной функциональной связи между параметрами, причем зависимость $[C_0/\Gamma_0](Q)$ по внешнему виду более всего напоминает гиперболу, а зависимость $Q(Z)$ — близка к линейной. Однако следует отметить увеличение степени погрешности измерений геометрических характеристик и положения трабекул на слепках левых желудочков кроликов и крыс. Это связано с невозможностью избежать перерастяжения полости сердца в базальных отделах при заполнении протакриловой массой вследствие малой толщины стенок левого желудочка. Для коррекции погрешности в исходные данные были внесены поправки, необходимые для вычисления вышеуказанных параметров, что позволило получить такой же внешний вид зависимостей, как для человека и собаки.

Проведение корреляционного анализа позволило подтвердить это наблюдение. Построение графической зависимости степени закрутки струи от ее объемного показателя ($[C_0/\Gamma_0](Q)$) показало непрерывность гиперболической функции на всех слепках с высокой точностью аппроксимации полученных данных (R^2 варьирует от 0.7963 до 0.9081). Иными словами, все точки, принадлежащие зависимостям на рис. 2, соответствуют мгновенному значению радиуса полости левого желудочка сердца и степени сходимости при условии, что $Z_i R_i^2 = \text{const}$. Значит, эти точки могут принадлежать сингулярной доминантной струе, образуя ограничивающую ее поверхность.

Графическое отображение зависимости объемного показателя струи от продольной координаты при различных углах фиксации слепков во всех случаях носит линейный характер (рис. 3). Высокая точность аппроксимации массива полученных данных (R^2 варьирует от 0.7882 до 0.8853) позволяет судить об идентичном принципе закрутки и аккумуляции энергии движения доминантной струи как у животных, так и у человека.

Данные, представленные на рис. 2 и 3, согласуются с точными решениями нестационарных гидродинамических уравнений для класса смерчеобразных закрученных потоков вязкой жидкости и свидетельствуют об идентичном принципе организации потока с наличием одного доминантного вихря в полости левого желудочка независимо от размеров слепков и фазы сердечного сокращения. Полученные графические отображения зависимостей $Q(Z)$ и $[C_0/\Gamma_0](Q)$ во всех случаях имеют тождественный вид и отражают общий механизм транспорта крови у животных и

человека, независимо от пространственной конфигурации проточного канала сердца. Таким образом, несмотря на различные размеры полости левого желудочка, принцип организации внутрисердечного потока одинаков как у животных — крыс, кроликов, собак, так и у человека.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки роли трабекул во внутрисердечном кровотоке авторами работы [9] были созданы эллипсоидные математические модели левого желудочка с гладкой и «трабекулярной» внутренней поверхностью (в эпикардальном слое трабекулы располагались по углом -80° , в толще миокарда — под углом 0° и в эндокардиальном слое за счет вращения — под углом $+80^\circ$). Сравнительный анализ этих моделей продемонстрировал важное функциональное значение трабекул в транспорте крови, поскольку их наличие увеличивает величину ударного объема на 21.8% при идентичных значениях давления в левом предсердии, массы миокарда и объема левого желудочка.

Также на количественные параметры внутрисердечного кровотока влияют углы наклона миокардиальных волокон. В работе [10] с помощью математического анализа цилиндрической модели было показано, что при обычном сжатии исключительно в продольном направлении или по окружности фракция выброса составит 15 и 28% соответственно, тогда как при ориентации мышечных волокон под углом 60° фракция выброса может составлять $> 60\%$.

В работе [11] с помощью магнитно-резонансного внутрисердечного 4D-картирования у здоровых лиц авторы продемонстрировали мгновенные закрученные линии тока с разными скоростными показателями в зависимости от фазы диастолического наполнения или систолического изгнания. Кроме того, ниже митрального и трикуспидального клапанов были зафиксированы кольцевидные линии тока крови в конечную фазу диастолического наполнения, что доказывает стабильность циркуляции и может обеспечивать дальнейшую эволюцию течения в виде смерчеобразной струи.

Точные решения нестационарных гидродинамических уравнений для класса смерчеобразных закрученных потоков вязкой жидкости устанавливают однозначную связь между полем скоростей потока крови и геометрией проточного канала, что позволяет судить о структуре потока по геометрии канала. Направляющее действие трабекул левого желудочка определяет структуру формирующегося потока. Смерчеобразная струя

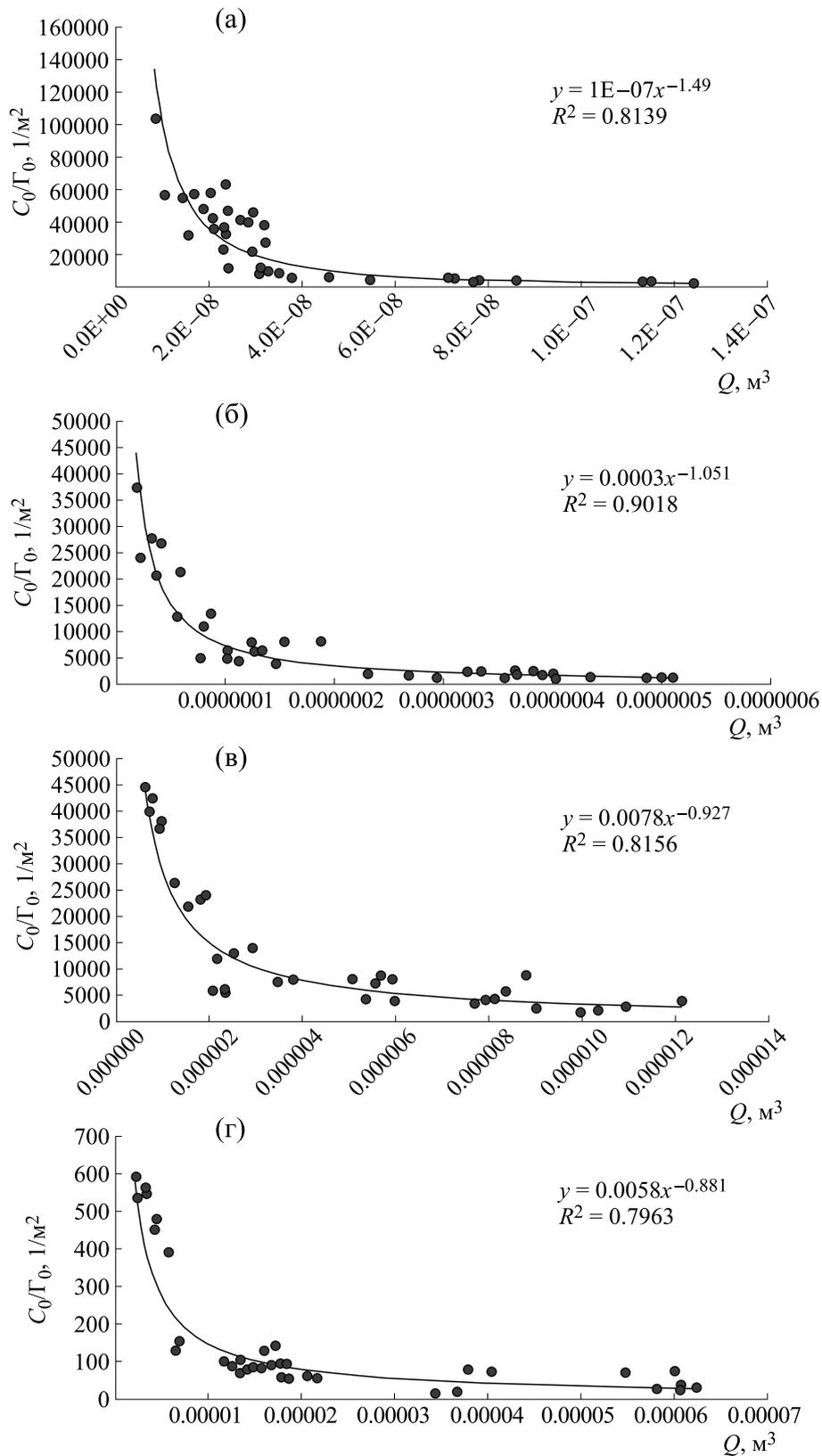


Рис. 2. Зависимости C_0/Γ_0 ($1/m^2$) от Q (m^3) и аппроксимирующие множество точек гиперболы для слепков левых желудочков сердца: (а) – крыс (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.8139$); (б) – кроликов (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.9018$); (в) – собак (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.8156$); (г) – человека (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.7963$).

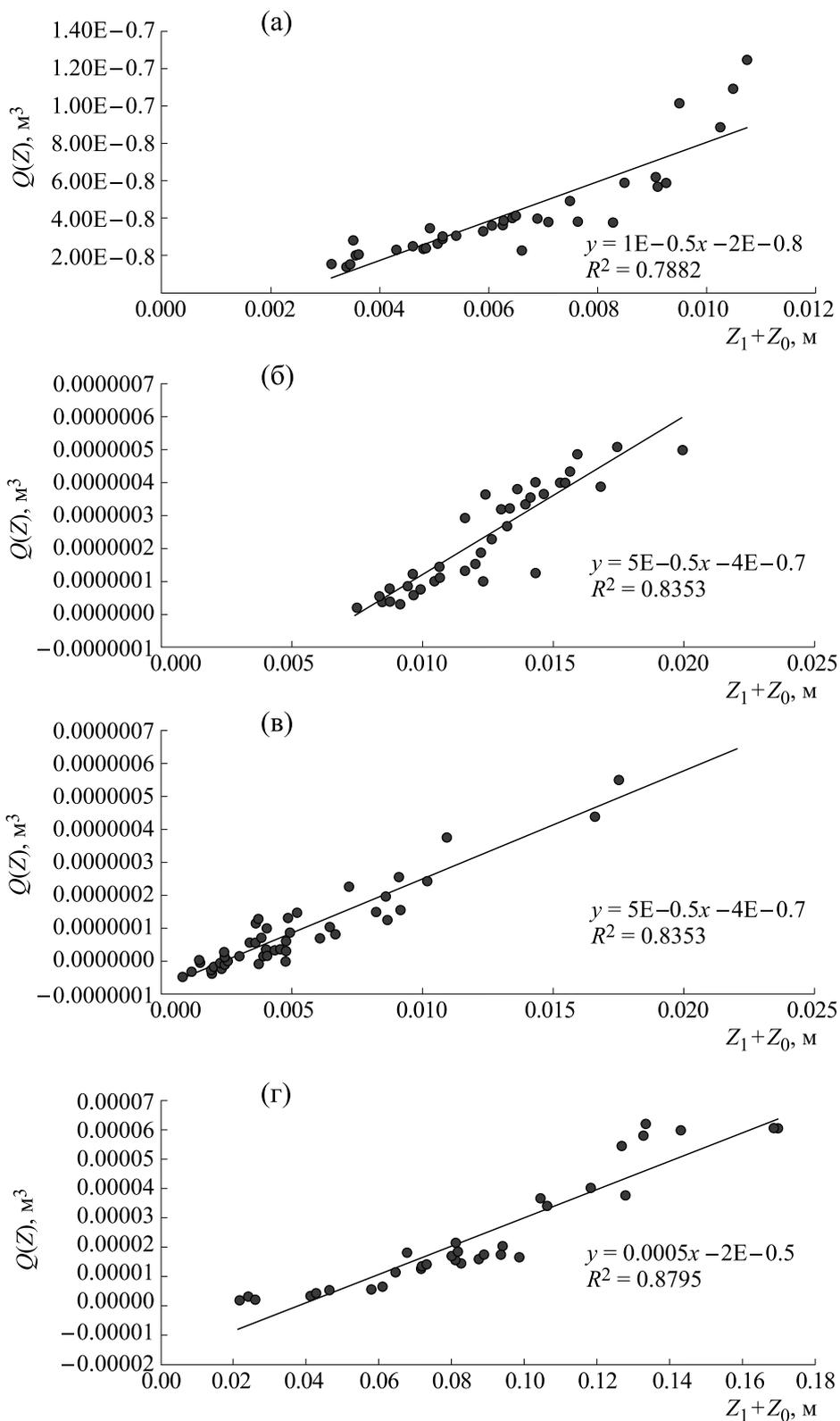


Рис. 3. Зависимости Q (м^3) от Z (м) и аппроксимирующие множество точек прямые для слепков левых желудочков сердца: (а) – крысы (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.7882$); (б) – кроликов (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.8353$); (в) – собак (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.8853$); (г) – человека (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.8795$).

в процессе эволюции преодолевает митральный и аортальный клапаны сердца, с соответствующим перемещением точки начала координат. Благодаря этому радиус кривизны оси закрученного потока неизменно больше величины радиуса самой струи при сохранении условия осевой симметрии на всем протяжении проточного канала [7, 8].

В нашем исследовании показана достоверная близость зависимостей структурных параметров потока, отражающих объемный показатель струи $Q(Z)$ и степень закрутки $[C_0/\Gamma_0](Z)$, с теоретическим видом этих зависимостей, вытекающих из точных решений. Непрерывность гиперболической функции для всех видов исследованных слепков свидетельствует об общем принципе ориентации систолических и диастолических трабекул и позволяет говорить о едином механизме формирования и эволюции внутрисердечной сингулярной доминантной струи у животных и человека.

Доминантная струя относится к классу смерчеобразных течений и по своей конфигурации соответствует мгновенной анатомии полости левого желудочка сердца, представленной внутренним трабекулярным рельефом. Однако это не исключает наличие внутрижелудочковых возвратных и вторичных течений, обусловленных участками локальной асимметрии проточного канала. Гипотетически эти течения имеют сходную с доминантным вихрем структуру, а вязкие взаимодействия между ними неизбежно приводят к дополнительным потерям энергии. Соотношение мощности доминантной сердечной струи и мощности возвратных и вторичных течений определяет эффективность процесса самоорганизации потока в сердце, что важно для накопления момента движения в этой струе и последующего изгнания в аорту [6–8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют об идентичном принципе организации внутрисердечного кровотока независимо от размера полости левого желудочка и фазы сердечного цикла. Применение точных решений нестационарных уравнений гидродинамики для класса смерчеобразных закрученных потоков вязкой жидкости продемонстрировало наличие одного доминантного вихря в полости левого желудочка независимо от видовой принадлежности слепков. Результаты исследования согласуются с современными представлениями об анатомии и функции сердца и в перспективе могут стать новым шагом в оптимизации индивидуального подхода при выборе

тактики лечения пациентов, планировании хирургического вмешательства и динамическом послеоперационном наблюдении, так как открывают возможности количественной оценки состояния внутрисердечной гемодинамики при патологических состояниях, сопровождаемых снижением сердечного выброса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №16-15-00109).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все применимые международные, национальные и институциональные принципы ухода и использования животных при выполнении работы были соблюдены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Бураковский, Н. Б. Доброва, Н. Б. Кузьмина и др., Эксперим. хирургия и анестезиология **3**, 13 (1976).
2. G. I. Kiknadze and Yu. K. Krasnov, Sov. Phys. Dokl. **10**, 799 (1986).
3. L. H. Back, D. W. Crawford, and R. Barndt, J. Appl. Physiol. **41** (6), 910 (1976).
4. Е. А. Талыгин и А. Ю. Городков, Бюл. НЦССХ им. А. Н. Бакулева **19** (4), 416 (2018).
5. J. Bremer, Am. J. Anatomy **49**, 409 (1932).
6. L. A. Bockeria, G. I. Kiknadze, I. A. Gachechiladze, et al., Cardiometry **3**, 5 (2013).
7. Л. А. Бокерия, А. Ю. Городков, Г. И. Кикнадзе и М. В. Соколов, Бюл. НЦССХ им. А. Н. Бакулева **3** (7), 99 (2002).
8. Е. А. Талыгин, Н. А. Зазыбо, Ш. Т. Жоржолиани и др., Успехи физиол. наук **47** (1), 48 (2016).
9. M. Serrani, M. L. Costantino, and R. Fumero, Computing in Cardiology **40**, 811 (2013).
10. E. A. Sallin, Biophys. J. **9**, 954 (1969).
11. M. Markl, P. J. Kilner, and T. Ebbers, J. Cardiovasc. Magn. Reson. **13**, 7 (2011).

Comparative Anatomical Study of the Parameters for Swirling Flow in the Left Ventricular Cavity in Animals of Different Size Based on the Concept of Tornado-Like Flows of Viscous Liquids

M.M. Tkhagapsova, E.A. Talygin, Sh.T. Zhorzholiani, A.V. Agafonov, A.V. Dorofeev, A.Yu. Gorodkov, G.I. Kiknadze, and L.A. Bockeria

*A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery,
Roublyevskoe Shosse 135, Moscow, 121552 Russia*

The aim of the study was to substantiate a single mechanism of the flow around the flow channel of the heart left ventricle regardless of the species based on anatomical study of orientation of trabeculae in the left ventricular cavity in man and study animals of different size like rats, rabbits, dogs. The relief parameters of the intracardiac trabecular complexes were measured using the cavity casts of the left ventricle of the heart of man and animals of different size. The casts of the left ventricle of the heart of man and each animal species of approximately the same size were selected that helped increase the reliability of measurements. For quantitative evaluation of the parameters of the intracardiac blood flow, the exact solutions of the nonstationary hydrodynamics equations for the class of Tornado-like swirling flows of viscous fluids were used as a hydrodynamic model. Graphical dependencies of the degree of twisting on the volumetric index of the intracardiac Tornado-like jet have shown the continuity of the hyperbolic functions in all casts with high accuracy of data fitting (R^2 varies from 0.7963 to 0.9081). Therefore, all dependency points correspond to the condition of convergence $Z_i R_i^2 = \text{const}$ and may belong to a singular swirling jet, which form the boundary layer. Graphs of the volumetric change of the jet vs. the longitudinal coordinate at different angles of cast fixation are linear in all cases. Due to high accuracy approximation to an array of data obtained (R^2 varies from 0.7882 to 0.8853) it might be supposed that the pattern of twisting and accumulation of the energy of moving dominant flow are similar in man and animals. Therefore, our results demonstrate that the orientation and coordinated contractility of trabecular meshwork play a crucial role in the formation of intracardiac blood swirling and mechanisms that ensure adequate blood flow in man and animals, regardless of the size of the heart's cavity are similar.

Keywords: left ventricle, trabeculae, swirling flow