

УДК 612.171:004.9

## ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИОКАРДА НОВОЙ ТОПОЛОГИИ

<sup>1</sup>Арутюнов Ю.А., <sup>2</sup>Чащин Е.А., <sup>3</sup>Шашок П.А.

<sup>1</sup>Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации  
Федерального медико-биологического агентства, Москва, e-mail: double-spiral@yandex.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,  
Ковров, e-mail: kanircha@list.ru;

<sup>3</sup>ООО «Двойная спираль», Москва, e-mail: Mstr.spa@gmail.com

В статье проведен анализ существующих в настоящее время моделей работы сердца и сердечно-сосудистой системы, сложившихся в ходе становления существующих систем и методов диагностики патологий, основанных на постулате об однородности миокарда. Подробно рассмотрены кинетическая, гемодинамическая и электрическая модели, описывающие работу сердечно-сосудистой системы, а также отдельное внимание уделено анализу возможности использования пакетов прикладных программ типа ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ELCUT и т.д., позволяющих описывать гемодинамические процессы в приближении неньютоновской биологической жидкости. Интерес к ревизии и дальнейшему развитию классических теорий, используемых для описания электро-, био-, механических процессов в сердечно-сосудистой системе, вызван тем, что большинство из используемых в настоящее время методов математического моделирования не учитывают влияния топологии миокарда на работу сердца и сердечно-сосудистой системы. Поэтому, принимая во внимание тот факт, что физиологическая и патофизиологическая значимость феномена топологии миокарда изучена в настоящее время недостаточно полно, показано, что существует необходимость системно-синергетического подхода к принципиальному переосмыслению и пересмотру существующих математических моделей, описывающих работу сердца и сердечно-сосудистой системы, с точки зрения учета новых, критически значимых качественных свойств и особенностей миокарда сердца.

**Ключевые слова:** моделирование, сердечно-сосудистая система, топология Мебиуса, миокард, информационные технологии

## A SOFTWARE SIMULATION OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM TO HEMODYNAMIC STUDIES, PHYSICAL-MECHANICAL AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MYOCARDIUM THE NEW TOPOLOGY

<sup>1</sup>Arutyunov Yu.A., <sup>2</sup>Chaschin E.A., <sup>3</sup>Shashok P.A.

<sup>1</sup>Scientific-Clinical Center of Sports Medicine Federal Medical-Biological Agency of Russia,  
Moscow, e-mail: double-spiral@yandex.ru;

<sup>2</sup>Kovrov State Technological Academy, Kovrov, e-mail: kanircha@list.ru;

<sup>3</sup>LLC «Double spiral», Moscow, e-mail: Mstr.spa@gmail.com

The article analyzes the currently existing models of the heart and cardiovascular system, formed in the course of the formation of existing systems and methods of diagnosis of pathologies based on the postulate of myocardial homogeneity. The kinetic, hemodynamic and electrical models describing the work of the cardiovascular system are considered in detail, as well as special attention is paid to the analysis of the possibility of using software packages such as ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ELCUT, etc., to describe hemodynamic processes in the approximation of non-Newtonian biological fluid. Interest in the revision and further development of classical mathematical models used to describe electro-, bio-, mechanical processes in the cardiovascular system is caused by the fact that most of the currently used methods of mathematical modeling do not take into account the influence of myocardial topology on the heart and cardiovascular system. Therefore, taking into account the fact that the physiological and pathophysiological significance of the phenomenon of myocardial topology is currently insufficiently studied, it is shown that there is a need for a system-synergetic approach to the fundamental rethinking and revision of existing mathematical models describing the work of the heart and cardiovascular system, from the point of view of taking into account new, critically important, topological features of the heart myocardium.

**Keywords:** modeling, cardiovascular system, Mobius topology, myocardium, information technologies

Известно, что для всех направлений медицинских исследований, как прикладного так и фундаментального характера, моделирование гемодинамических, физико-механических и электрофизических характеристик биологических объектов является неотъемлемым [1]. При этом развитие мо-

делирования применительно к спортивной медицине во многом связано и зависит от аппаратно-приборной базы существующих систем и методов диагностики, внедрение которых позволило значительно облегчить диагностику патологий сердца и сердечно-сосудистой системы на ранних этапах [2, 3].

На текущий момент разработано достаточно большое количество моделей сердца и сердечно-сосудистой системы (ССС). Из них в медицинской практике, в силу высокого уровня визуализации исследуемых структур, как правило, применяются геометрические и физические модели СССР [4, 5], однако вследствие большого количества возможных состояний, вызванных как морфологическими так и функциональными особенностями, подобные модели не позволяют учесть накопленный к настоящему времени обширный экспериментальный материал. Большой интерес представляют модели, позволяющие описать существенные для оригинального объекта факторы и параметры. Такие модели биологических объектов предполагают наличие трех основных подклассов, а именно гемодинамические, кинетические и электрические математические модели. Однако классические математические модели, описывающие происходящие в СССР процессы, имеют ограниченное практическое применение, так как теоретические предпосылки основываются на постулате об однородности миокарда и ограничены построением упрощенных моделей, не учитывающих физиологическое и патофизиологическое влияние феномена топологии миокарда. В то же время в работе [5, 6] излагалось теоретическое описание СССР и формулировалась задача о математическом моделировании СССР, основанной на недавнем открытии ученых [4] показавшем, что миокард сердца имеет топологию Мебиуса. При этом утверждается, что построение математической модели, воспроизводящей основные функции СССР с учетом такой анатомии миокарда, обеспечивает физиологически реальные, близкие к результатам клинических наблюдений, характеристики гемодинамики, физико-механики и электрофизики СССР.

Цель исследования: анализ существующих в настоящее время моделей работы сердца и сердечно-сосудистой системы, сложившихся в ходе становления существующих систем и методов диагностики патологий, основанных на постулате об однородности миокарда.

#### Материалы и методы исследования

В работе на основании практического подхода к исследованию электрической и механической функций в сравнении однородного и неоднородного миокарда сердца выполнен анализ существующих математических моделей, описывающих работу СССР. Отличительной особенностью такого подхода является возможность выявления, в приближении миокарда как объекта с топологией Мебиуса, необходимости учета физиологической и патофизиологической значимости неоднородности миокарда.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Одной из наиболее известных в настоящее время моделей СССР является гемодинамическая модель [7, 8]. Рассмотрим особенности моделирования СССР в рамках концепции «миокард новой топологии». Известно [9], что математическое описание течения кровотока основано на использовании системы уравнений, в которой формальная запись общего вида на каждом ребре графа имеет вид

$$\begin{aligned} \partial s / \partial t + \partial u s / \partial x &= 0, \\ \partial u / \partial t + \partial (u^2 / 2 + p / \rho) / \partial t &= F_t + F_{mp}, \\ S &= S(p), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения кровеносного сосуда;  $u$  – линейная скорость движения крови;  $p$  – давление крови;  $t$  – время;  $x$  – длина, вдоль оси каждого сосуда;  $\rho$  – плотность крови  $\rho = \text{const}$ ;  $F_t$  – внешняя сила, например, земного притяжения;  $F_{mp} = -8pnu/s$  – сила вязкого трения потока крови о стенки сосуда;  $n$  – коэффициент вязкости крови.

Из системы уравнений гемодинамики (1), состоящей из нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, видно, что наиболее удобным способом ее решения является численный метод. В настоящее время для реализации численных методов решения систем дифференциальных уравнений удобно использовать пакеты прикладных программ математического моделирования объектов, например пакеты аппаратного обеспечения вычислительных систем типа ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ELCUT и т.д. Следует отметить, что перечисленные пакеты аппаратного обеспечения позволяют так же рассчитывать, например, неньютоновские биологические жидкости, такие как кровь, учитывать анизотропность среды, в частности физико-механические свойства миокарда, характеристики электромагнитопроводящих сред для учета электрофизических свойств миокарда. Применительно для обеспечения работы высокоперспективного медоборудования, такого как, например, многофункциональный ультразвуковой аппарат для проведения сердечно-сосудистых исследований, а также других медицинских приборов предполагающих использование микро- и нано- электромеханических устройств, применение пакетов аппаратного обеспечения типа ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ELCUT делает многообещающим разработку и дальнейшее усложнение теоретической модели и системы уравне-

ний (1), описывающих гемодинамические процессы. Однако видно, что математическая модель (1) не позволяет учесть изменение кинетической вязкости крови во время сердечного цикла, а также различность и неодинаковость в режимах течения крови в том числе, например, спурт-эффект течения неньютоновской жидкости. Таким образом, модель гемодинамики в настоящее время не может быть использована для решения задач, связанных с оптимизацией режима течения крови в ССС. Для решения задач оптимизации в систему уравнений гемодинамики необходимо дополнительно включить учет гидромеханических свойств и особенностей ССС. В этом случае описание режима течения крови, например, на основе программ ANSYS и NASTRAN/PATRAN потребует создания вычислительного комплекса, описывающего гемодинамику ССС в рамках концепции «миокарда новой топологии» в виде 3D-конечноразностной сетки русла кровотока сердца. Следует отметить, что создание программой модели гемодинамики ССС возможно на основе информации, получаемой с помощью современных комплексов ультразвуковой диагностики. Это позволит улучшить механизм работы электронных датчиков и других составляющих диагностического оборудования, что дает основания полагать, что созданная модель изменит основополагающие представления в данной области.

Другой известной и не менее распространенной в настоящее время классической теоретической моделью, описывающей деятельность ССС, является кинетическая модель [10, 11], математический аппарат которой рассматривает сердце как некий однородный объект, который создает давление и сообщает крови кинетическую энергию [12]. Рассмотрим особенности теоретической основы кинетической модели. Известно, что основным параметром моделирования в такой физико-механической модели является сердечный ритм, тогда в интервале одного сокращения работа любого из желудочков сердца может быть определена из выражения

$$W = QR + 0,5Qv^2/g, \quad (2)$$

где  $Q$  – выброс крови из желудочка;  $R$  – сопротивление кровотоку;  $g$  – ускорение свободного падения.

Видно, что в кинетической модели (2) работа сердца за одно сердечное сокращение в общем случае зависит не только от переноса некоторого количества крови в артериях, а также связана с формированием упругого напряжения в сердечной мышце.

В рамках концепции «миокард новой топологии» это делает актуальным разработку функциональной модели сердца, описывающей физико-механические процессы для многочастотных широкополосных электронных датчиков при формировании луча на прием/передачу в многофункциональных диагностических медицинских аппаратах для проведения ультразвуковых исследований ССС.

Как было показано выше, одно из новых направлений в моделировании процессов и построении имитационной модели работы ССС основано на представлении миокарда сердца как фигуры с топологией Мебиуса [13]. Учет критически значимых качественных свойств и особенностей миокарда сердца в описании работы ССС позволяет рассмотреть миокард как комбинацию сочетания набора магнитных доменов, что в свою очередь позволяет связывать биомеханику сокращений мышц сердца и гемодинамику течения крови в эластичных сосудах в тесном взаимодействии с электропроводящими процессами, обеспечивающими регулирование ССС в целом:

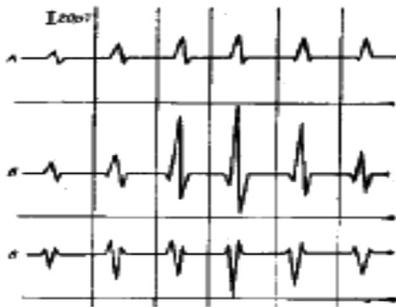
$$U = -0,5 \iiint_V \vec{J}_s \vec{H}_m dV, \quad (3)$$

где  $V$  – объем магнетика;  $J_s$  – намагниченность;  $H_m$  – напряженность магнитного поля.

Представления о строении миокарда в виде листа, свернутого в соответствии с топологией Мебиуса, ставят вопрос о дальнейшем изучении влияния связанности и ориентированности всей кровеносной системы и ее сопряжения с сердцем, поскольку Мебиусово трансформирование представляет из себя композицию конечного числа инверсий относительно сфер в евклидовом пространстве  $\bar{R}^n = R^n \cup \{\infty\}$ . Причем множество всех Мебиусных преобразований пространства  $\bar{R}^n$  конечномерно, а его подгруппа, составленная из отображений, сохраняющих ориентацию, изоморфна  $SO(n+1,1)$  [14]. Изоморфность подгруппы, составленной из отображений, представляет особую важность при математическом моделировании в рамках трансформаторной модели сердца, согласно которой распространение магнитного поля, создаваемого миокардом сердца, описывается в приближении, согласно которому миокард сердца представлен как магнитопровод, образуемый материалами с ориентированной доменной структурой. Действительно, из (3) видно, что для пространства, заполненного магнитным материалом с намагниченностью  $J_s$  магнитостатическое взаимодействие обособленных элементов

объема внутри намагниченного тела приводит к наличию собственной магнитостатической энергии этого тела, и величина поля рассеяния  $H_m$  ведет к образованию областей спонтанного намагничивания, т.е. доменной структуры. Это позволяет считать миокард сердца за магнитную доменную структуру – совокупность областей в магнитной подсистеме магнитных материалов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с их макроскопическими свойствами. Таким образом, при математическом описании процессов формирования в миокарде магнитного поля принимаем, что намагничивание и перемагничивание определяется свойствами доменной структуры.

При трансформации топологии магнитопровода, в частности его изменение из тороидальной формы в форму в виде петли Мебиуса, наблюдается изменение напряженности магнитного поля, вызванное влиянием изменения ориентации доменов. Это позволяет, по результатам анализа напряженности магнитного поля, решить задачу «визуализации» внутренней структуры миокарда сердца, так как амплитудные значения напряженности магнитного поля различаются для нормального (скрученного миокарда) и патологий на величину до 2 раз. Достоверность сделанных предположений (3) качественно подтверждается как результатами физического эксперимента, проводимого в формате клинических наблюдений [15], так и результатами вычислительного эксперимента [13].



*Усредненные показатели QRS комплекса МКГ здоровых людей (А) с гипертрофией левого желудочка (Б) и с инфарктом миокарда (В) [15]*

Новый подход к моделированию ССС человека, позволяет связать воедино электро-биомеханические процессы что дает возможность ранней диагностики развития патологий на основе оценки изменения характеристик функционирования ССС. В этом случае модель

ССС может быть представлена в виде 3D-конечноэлементной модели, описывающей физико-механические процессы, происходящие в сердце, включающей комплекс, базирующийся на изучения и доказательстве результатов следующих гипотез: спиральная мода колебаний – значимая характеристика здорового сердца (это основа для ранней диагностики патологий); энергетика здорового сердца в 4 раза меньше, чем энергетика больного сердца (конфигурация цилиндрического кольца основа для прогнозирования омертвения волокон миокарда); мышечная стимуляция миокарда распространяется в виде уединенной волны «сжатия – растяжения».

### Заключение

Выполненный анализ существующих в настоящее время моделей работы сердца и сердечно-сосудистой системы, сложившихся в ходе становления существующих систем и методов диагностики патологий, основанных на постулате об однородности миокарда, показал интерес к ревизии и дальнейшему развитию классических теорий, используемых для описания электро-, био-, механических процессов в сердечно-сосудистой системе. Принимая во внимание тот факт, что физиологическая и патофизиологическая значимость феномена топологии миокарда изучена в настоящее время недостаточно полно, существует высокая потребность в системно-синергетическом подходе к принципиальному переосмыслению и пересмотру существующих математических моделей, описывающих работу сердца и сердечно-сосудистой системы с точки зрения учета новых, критически значимых качественных свойств и особенностей миокарда сердца.

Применение системно-синергетического подхода к моделированию ССС, учитывающего синхронизацию между различными процессами, формирующими электро-биомеханику функционирования ССС, позволит в большей степени обеспечить соответствие локальных и нелокальных характеристик результатам физиологических экспериментов и клинических наблюдений. Это будет способствовать росту эффективности и ускорит адаптацию новых средств моделирования в клинических приложениях, как для диагностики сердечной деятельности, так и для разработки электромеханических стимуляторов ССС и целевых тренажеров для кардиохирургов, что позволит увеличить надежность и повысить вероятность эффективного проведения хирургических операций на ССС.

## Список литературы

1. Немирко А.П., Манило Л.А., Калининченко А.Н. Математический анализ биомедицинских сигналов и данных. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 245 с.
2. Фролов С.В., Маковеев С.Н., Газизова Д.Ш., Лищук В.А. Модель сердечно-сосудистой системы, ориентированная на современную интенсивную терапию // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 2. № 4. С. 892–901.
3. Лищук В.А. Математическая теория кровообращения. М.: Медицина, 1991. 256 с.
4. Buckberg G.D. Basic science review: The helix and the heart. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2002. Vol. 124. № 5. P. 376–386.
5. Самойлов А.С., Арутюнов Ю.А. Математическое моделирование сердечно-сосудистой системы для исследования гемодинамики, физико-механики и электрофизиологии миокарда новой топологии // Биомедицина. 2014. Т. 1. № 3. 104 с.
6. Ключников М.С., Самойлов А.С., Арутюнов Ю.А. Научное и инновационное развитие центра лечебной физкультуры и спортивной медицины ФМБА России // Спортивная медицина: наука и практика. 2014. № 3. С. 72–79.
7. Свиридова Н.В., Власенко В.Д. Моделирование гемодинамических процессов сердечно-сосудистой системы на основе данных периферической артериальной пульсации // Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т. 9. № 1. С. 195–205.
8. Арутюнов Ю.А., Иванов М.Г., Симаков С.С., Чедрик В.Ч. Компьютерная модель упругогидромеханических характеристик сердечно-сосудистой системы человека // Свидетельство на ПО для ЭВМ № 2012610668, 2012.
9. Кошелев В.Б., Мухин С.И., Соснин Н.В., Фаворский А.П. Математические модели квазиодномерной гемодинамики. М.: МАКС Пресс, 2010. 114 с.
10. Гаранин А.А., Рябов А.Е. Новое в биомеханике большого круга кровообращения // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 3. С. 345–360.
11. Симаков С.С., Чедрик В.В., Интерфейс визуализации сердечно-сосудистой деятельности // Свидетельство на ПО для ЭВМ № 2012610779, 2012.
12. Попов Г.И., Самсонова А.В. Биомеханика двигательной деятельности: учеб. для студ. Учреждений высш. проф. образования / 3-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 320 с.
13. Arutyunov Yu.A., Chaschin Ye. A., Vozovikov I.N., Drobnyazko A.A., Shashok P.A. The influence of the cardiomyocardial topology on the magnetizing force measured by magnetocardiograph. *International research journal*. 2017. Vol. 4. № 58. P. 6–12.
14. Альфорс Л. Преобразования Мебиуса в многомерном пространстве / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 112 с.
15. Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М. Магнитные поля биологических объектов. М.: Наука, 1987. 145 с.