

Отзыв научного руководителя на диссертационную работу  
Сергея Федоровича Правдина  
«Математическое моделирование структуры и функции левого желудочка сердца»

Проблема изучения и моделирования структуры сердца, его функционирования, причин возникновения патологий и особенностей его работы при наличии патологий чрезвычайно важна. Она требует использования по крайней мере трёх разделов науки: геометрии, электрофизиологии и биомеханики. Применение математических методов позволяет создавать модели, всё более точно отражающие работу сердца и изучать закономерности его функционирования, а современная многопроцессорная вычислительная техника обеспечивает возможность многократно тестировать разрабатываемые модели, сверяя результаты с экспериментальными данными.

Анатомия сердца исследуется более 300 лет. Получила известность модель сердца (Ф. Торрент-Гуасп, 1973) в виде скрученной уплощённой мышечной ленты. Важный шаг в изучении анатомии сердца сделал Д. Стритер (1979), детально исследовавший макро- и микроструктуру мышечных волокон и получивший численные экспериментальные данные.

В данной работе С.Ф. Правдин представил созданные им математические модели левого желудочка (ЛЖ) сердца: осесимметричную анатомическую модель (гл. 1) с исследованием её электрофизиологической активности (гл. 2) и неосесимметричную модель ЛЖ (гл. 3).

Осесимметричная модель отражает основные особенности мышечного массива ЛЖ. Базируясь на простейшей конической поверхности, он строит поверхность, закрученную в виде спиральной пружины с эллипсоидальными образующими. Эти образующие постепенно, по мере закрутки, смещаются в толще стенки от эпи- до эндокарда, чтобы в итоге получить ненулевую толщину стенки желудочка. На таких поверхностях, вложенных одна в другую, строится семейство линий, изображающих мышечные волокна. В идеале эти линии должны быть геодезическими (что предотвращало бы их расползание в процессе сокращений сердца), а поведение касательных к ним прямых согласовывалось бы с закономерностями, установленными Д. Стритером. На этом этапе работы геодезичности добиться не удалось, однако кривые удовлетворяют требованиям Стритера (основное из которых — вращение касательных к волокнам) и равномерно заполняют указанные поверхности.

Все поверхности и лежащие на них волокна записаны в аналитическом виде, разработано программное обеспечение для вычисления значений параметров семейства волокон. Важную роль играет так называемая специальная система координат ( $\gamma$ ,  $\psi$ ,  $\phi$ ). Расчёты показали соответствие этих параметров с экспериментальными данными Д. Стритера, которые, естественно, сами содержат ошибки измерений.

Следующим этапом работы диссертанта явилось исследование электрофизиологических процессов предложенной модели (гл. 2). Для этого С.Ф. Правдин воспользовался так называемой ионной моделью кардиомиоцитов (K.H.W.J. ten Tusscher, D. Noble, P.J. Noble, A.V. Panfilov. A model for human ventricular tissue. American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology, 2004) (К. тэн Туссхэр, Д. Нобл, П. Нобл, А.В. Панфилов, 2004), основанной на системе дифференциальных уравнений реакции-диффузии. С помощью матрицы диффузии моделируется анизотропия миокарда. В качестве меры анизотропности выбран, в частности, угол между эпи- и эндокардиальными волокнами на экваторе ЛЖ. Лапласиан системы приходится вычислять в специальной системе координат, в которой форма ЛЖ — прямоугольная область. Равномерная прямоугольная сетка в специальных координатах порождает неравномерную сетку в Декартовых координатах, в связи с этим автор предложил способ её разрежения. Граничным условием в этой задаче является отсутствие потока потенциала через границу. Для численного решения задачи на языке Си разработан программный комплекс, позволяющий распараллеливать счёт и выдающий данные в готовом для визуализации виде. На суперЭВМ «Уран» диссертантом проведён обширный численный эксперимент по изучению влияния анизотропии на

распространение возбуждения из разных участков ЛЖ для разных соотношений коэффициентов диффузии вдоль и поперёк волокон.

Осесимметричная модель, несмотря на её достаточно совершенную конструкцию, позволяет легко менять анизотропные свойства (угол вращения волокон в толще стенки) и даже, в определённых пределах, её форму и с помощью программного комплекса оперативно получать результаты. Оказалось, увеличение угла вращения волокон приводит к ускорению распространения волны возбуждения (компенсирует анизотропию).

Имеется возможность также изучать спиральные волны.

Влияние формы ЛЖ на его электрофизиологические свойства — важный вопрос, заслуживающий дальнейшего изучения. Перенос данной методики на бидоменные модели позволит в будущем исследовать явление дефибрилляции.

В главе 3 строится асимметричная модель ЛЖ, ограниченного свободной стенкой с одной стороны и межжелудочковой перегородкой — с другой. Модель состоит из системы вложенных одна в другую спиральных поверхностей (СП) сложной формы. Для их определения строятся эндо- и эпикардальные границы желудочка в семействе меридиональных полуплоскостей, на их основе — специальная система координат, а искомые СП имеют простые линейные уравнения в этих координатах. На СП волокна определяются как образы хорд полуокружности, параллельных её диаметру, по аналогии с главой 1. Проведено сравнение угловых характеристик поля направлений построенных волокон с данными эксперимента (диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии) для разных зон ЛЖ сердца собаки и человека в норме. Так, в верхней и средней по высоте части свободной стенки и в верхней и нижней частях межжелудочковой перегородки наблюдается качественное и количественное согласие данных. Автор проводит детальное сравнение своей модели с ленточной концепцией Ф. Торрента-Гуаспа и моделью Байера (2012).

Представленная С.Ф. Правдиным работа представляет собой существенный шаг в области моделирования сердца: автор, опираясь на теоретические и экспериментальные работы предшественников, создал новую (осесимметричную) модель ЛЖ, которая уже сейчас является средством исследования функционирования сердца, изучил её электрофизиологические свойства, приступил к разработке асимметричной модели ЛЖ. Предложенная им асимметричная модель по полю направлений волокон во многих зонах близка к реальности. Созданный автором программный комплекс позволяет эффективно использовать современные вычислительные средства. Данная работа является успешным стартом для обширного исследования по созданию виртуального сердца тонкой структуры с реализацией электрической и механической функций, которое будет основой принятия решений в профилактике и лечении сердечных болезней.

Автор работы Сергей Федорович Правдин заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель  
д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

В.И. Бердышев

28.05.14г.

Подпись заверяю  
Ученый секретарь  
ИММ УРО РАН



Ульянов О.Н.