

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Шардакова Игоря Николаевича  
на диссертационную работу Правдина Сергея Федоровича  
«Математическое моделирование структуры и функции  
левого желудочка сердца»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
05.13.18 Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

### **Актуальность.**

Основная цель данной работы — создание математической модели, описывающей особенности пространственного распределения мышечных волокон миокарда левого желудочка (ЛЖ) сердца, а также позволяющей осуществлять численное решение начально-краевой задачи об электродинамике сердечной мышцы. Данная цель имеет непосредственное отношение к реализации всемирного проекта «Виртуальный человек». На выполнение этого амбициозного проекта в настоящее время направлены усилия многочисленных исследовательских групп (очень часто международных), объединяющих ведущих ученых из различных стран.

Достижение поставленной цели позволит разработать математические средства, и в том числе комплексы компьютерных программ для моделирования электродинамических процессов в миокарде с учетом анизотропии электрофизиологических свойств, которая определяется пространственной морфологией мышечных волокон. Создание таких средств расширят возможности моделирования и анализа электродинамики миокарда в зависимости от реалистичного распределения волокон мышц. В связи с этим тема диссертационной работы и поставленная цель **являются актуальными.**

**Диссертационная работа** выполнена в объеме 100 стр. машинописного текста, содержит введение, три главы, заключение, 2 таблицы, 43 рисунка. Библиография включает 133 наименования.

Во **Введении** на основе анализа обзора научной литературы по исследуемой проблеме обосновывается актуальность темы диссертационной работы, а также формулируются цель и задачи для ее достижения. Представленный обзор точно определяет уровень, научную и практическую значимость предлагаемой работы.

В **Первой главе** строится математическая модель левого желудочка сердца в осесимметричном приближении. Эта модель аналитически описывает пространственное положение осевых линий волокон мышц ЛЖ. Аналитичность описания удалось осуществить благодаря введению

специальной трехмерной системы координат, для которой были установлены однозначные соответствия с декартовой и цилиндрической системами. Отправной точкой для построения такой системы явились экспериментальные результаты Д. Стритера по анализу пространственного расположения волокон мышц миокарда. Параметрические зависимости полученных аналитических выражений позволяют достаточно легко осуществлять подгонку их под реальную конфигурацию положения осевых линий волокон.

**Во Второй главе** приведена постановка начально-краевой задачи о динамике распространения трансмембранного потенциала по мышечным тканям ЛЖ в осесимметричном приближении. Очень важно, что эта постановка учитывает анизотропию проводимости, которая однозначно определяется пространственным распределением осей волокон мышц миокарда. Таким образом аналитические зависимости, полученные в первой главе, позволили корректно учесть влияние реального пространственного распределения волокон на анизотропию тензора проводимости миокарда. В этой же главе последовательно и подробно приведены выражения для слагаемых дифференциального оператора, описывающего динамику трансмембранного потенциала в специальной системе координат, полученной в первой главе. Далее также приведены разностные выражения, необходимые для построения численных решений.

В главе приведены многочисленные интересные результаты пространственно-временного распределения трансмембранного потенциала по миокарду для различных условий начального возбуждения. Следует отметить, что эти результаты получены с использованием разработанного автором комплекса вычислительных программ. Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд интересных и значимых выводов об особенностях распространения трансмембранного потенциала в зависимости от реального распределения волокон мышц миокарда ЛЖ.

**В третьей главе** результаты первой главы обобщены на описание неосесимметричного пространственного распределения осей волокон мышц миокарда ЛЖ. В специальной системе координат получены аналитические выражения, описывающие положения осей волокон мышц для достаточно произвольного неосесимметричного случая. Это достигается за счет введения автором параметрических функций, которые позволяют осуществлять подгонку пространственного распределения волокон под экспериментально полученные результаты. Безусловно, приведенные в этой главе результаты существенно расширяют возможности предлагаемого в диссертации подхода для описания пространственного распределения волокон. Представленное здесь аналитическое описание геометрии сердца может быть использовано при построении новых численных методов для изучения электрофизиологической и механической активности ЛЖ.

**Научная новизна** рассматриваемой диссертационной работы заключается в следующем:

1. В специальной системе координат предложены новые аналитические зависимости, позволяющие в осесимметричном и неосесимметричном приближении корректно описывать реальное пространственное распределение осей волокон мышц ЛЖ сердца человека.

2. Впервые на основе анализа результатов решения начально-краевой задачи о пространственно-временном распределении трансмембранного потенциала установлено, что по мере увеличения угла вращения волокон в миокарде увеличивается скорость распространения волны электрического возбуждения, а роль анизотропии проводимости снижается.

3. В предложенной криволинейной системе координат разработан рациональный подход численного решения начально-краевой задачи о пространственно-временном распределении трансмембранного потенциала в рамках разностного метода.

4. Разработан новый комплекс вычислительных программ на языке Си, который позволяет осуществлять компьютерное моделирование в осесимметричном и неосесимметричном приближении реального пространственного распределения осей волокон мышц ЛЖ сердца, а также получать численное решение начально-краевой задачи о пространственно-временном распределении трансмембранного потенциала в рамках разностного метода.

### **Практическая значимость**

Разработанный вариант моделирования в осесимметричном и неосесимметричном приближении пространственного распределения волокон мышц миокарда левого желудочка сердца, в силу своего универсализма, может быть эффективно использован в физиологических исследованиях сердца.

Разработанный программный комплекс (на языке СИ), адаптированный для обычных и параллельных технологий вычислений, может быть использован для исследования особенностей пространственного распределения электрической и механической анизотропии миокарда, а также для установления характерных закономерностей влияния анизотропии электрических и механических свойств миокарда на его электродинамическое и деформационное поведение.

### **Достоверность исследований**

Проведённое сравнение углов наклона волокон в обеих построенных моделях анатомии сердца (осесимметричной и неосесимметричной) с экспериментальными данными показало, что данные модели воспроизводят

углы наклона и ход волокон в целом достаточно близко к результатам экспериментов.

Достоверность результатов расчётов электродинамических процессов в миокарде подтверждается результатами сравнения с данными литературы, полученными на простейших трёхмерных моделях ткани сердца.

Сходимость численных методов подтверждается выполнением критерия устойчивости Куранта–Фридрихса–Леви.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, **достаточно обоснованы.**

**Диссертация написана ясным языком**, с использованием принятой терминологии, оформление диссертации замечаний не вызывает.

**Содержание диссертации** в достаточной степени отражено в публикациях автора, было представлено на научных конференциях и известно научной общественности, а ее основные положения обстоятельно изложены в автореферате.

**Автореферат диссертации** соответствует ее содержанию.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания и вопросы:**

1. Насколько оправдано рассматривать электродинамику ЛЖ сердца в отрыве от всех остальных частей сердца?

2. В диссертации недостаточно четко прописана математическая постановка задачи об электродинамике миокарда, представленная в п. 2.3 (стр. 40, соотношения 2.2-2.3). Отсутствуют соотношения, позволяющие определить вид ионных токов, например, в зависимости от трансмембранного потенциала и от потенциала реполяризации (в случае однодоменной модели). При отсутствии этих соотношений начально-краевая задача недоопределена. Отсутствует четкая математическая формулировка начально-краевых условий. Для всех соотношений отсутствует область определения искомых функций.

3. Отсутствует обоснование выбора шага по пространственным координатам. Было бы целесообразно хотя бы представить результаты численных экспериментов, демонстрирующих сходимость решения от шага по пространственным координатам. Этот вопрос становится особенно актуальным для существенно нелинейных задач, к которым относится данная задача.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Приведенные замечания в целом не меняют общего положительного впечатления о выполненной диссертационной работе, которая выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой и удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Её автор Правдин Сергей Федорович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,  
Заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института механики сплошных сред  
Уральского отделения Российской академии наук

Игорь Николаевич Шардаков

“ 01 ” февраля 2015 г.

Адрес организации:

ул. Академика Королева, 1, Пермь, Пермский край, 614013

Телефон: (342) 237-83-18.

Адрес электронной почты: [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru)

Подпись И.Н.Шардакова заверяю.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,

к.ф.-м.н.

Н.А.Юрлова