

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Шестакова Алексея Петровича
**«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
МИОКАРДА И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЕЕ
РЕЖИМЫ»**

по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Математическое моделирование живых объектов, для которых постановка экспериментов затруднительна или невозможна, в последние годы открывает широкие возможности для изучения закономерностей их функционирования в различных режимах. Одним из таких объектов является сердечная мышца-миокард, для которого, в первую очередь актуально исследование электрического поля и факторов, влияющих на его динамику в нормальном режиме и при наличии различных патологий. Несмотря на достаточно большое количество научных изысканий в этом направлении различными категориями исследователей, **актуальность** диссертационной работы А. П. Шестакова представляется несомненной.

Диссертация Шестакова Алексея Петровича посвящена моделированию электрического поля в миокарде, созданию алгоритмов и программ для численной реализации, проведению масштабных вычислительных экспериментов и формулировке выводов относительно возможностей использованной модели.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении кратко описан объект моделирования – сердечная мышца человека, освещены основные аспекты функционирования, сформулирована цель исследования и задачи диссертационного исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена формулировке математической модели, описывающей пространственно-временные электродинамические процессы в миокарде, приведен обзор исследований электрических процессов в живых организмах и описан современный подход к построению математических моделей электродинамических процессов в мышечных тканях.

Вторая глава посвящена математической постановке и алгоритмам численной реализации задачи моделирования электродинамических процессов в миокарде. В диссертационной работе использован вариант монодоменной феноменологической модели Алиева-Панфилова, в которой ионные токи аппроксимированы кубической зависимостью, зависящей от трансмембранного потенциала и переменной восстановления. Используемая модель приводит к нестационарной нелинейной краевой задаче в частных производных второго порядка. Предложен вариант исследования, в котором процесс решения исходной задачи сводится к решению двух задач:

- 1) решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений для узловых неизвестных строится на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка,
- 2) решение нестационарной линейной краевой задачи в частных производных строится на основе сочетания методов конечных разностей и конечных элементов.

Важной частью второй главы является обсуждение исследования сходимости последовательности получаемых численных решений в зависимости от временной и пространственной дискретизации, что дает уверенность как в адекватности модели, так и в эффективности используемого вычислительного инструментария.

Третья глава посвящена анализу пространственно-временных закономерностей электродинамических режимов возбуждения миокарда на основе созданной модели и вычислительной схемы. Рассмотрен ряд задач, иллюстрирующих особенности возбуждения, распространения и взаимодействия волн потенциала действия. Изучено влияние размера очага

возбуждения на процесс развития волны потенциала действия, определен размер начальной области возбуждения, необходимый для развития волны потенциала действия, исследована зависимость ширины волны потенциала действия от расстояния между волнами, следующими друг за другом.

В результате серии расчетов продемонстрирован механизм возбуждения спиральной волны при дополнительном возбуждении в зоне относительной рефрактерности; выявлено, что в результате такого возбуждения образующиеся спиральные волны являются самоподдерживающимися волновыми структурами. Изучено влияние различных типов неоднородности и анизотропии на характер распространения волны потенциала действия.

Четвертая глава посвящена описанию алгоритма создания трехмерного геометрического образа сердца по результатам компьютерной томографии. Дан обзор методов построения геометрии внутренних органов, разработана программа, позволяющая загружать данные, полученные в результате сканирования объекта на томографе, и осуществлять их визуализацию в трех взаимно ортогональных сечениях, осуществлять фильтрацию. Приведены многочисленные примеры, иллюстрирующие работу программы.

В заключении сформулированы основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, обсуждены перспективы дальнейшего развития созданных программных комплексов.

Научную новизну работы составляют следующие результаты

1. Предложена математическая модель электродинамики миокарда человека в трехмерной постановке, представлены алгоритмы численной реализации и создан новый программный комплекс, позволяющий осуществлять вычислительные эксперименты.

2. На основе математического моделирования и анализа результатов вычислительных экспериментов:

–установлены параметры структуры проводящей среды, содержащей непроводящее препятствие, при которых в масштабах реального сердца реализуется образование циркулирующей волны потенциала действия;

– выявлено однонаправленное блокирование распространения волны на границе областей с различной длительностью потенциала действия, и на основе этого механизма сконструирована новая модельная неоднородность, приводящая к самовозбуждению волны потенциала действия.

3. Разработан новый программный комплекс для построения трехмерных конечно-элементных образов сердца по данным компьютерной томографии, который дает возможность использовать алгоритм фильтрации томографического образа, что позволяет увеличивать характерный размер конечного элемента и сократить время расчетов при численном моделировании.

Практическая значимость и рекомендации по использованию

1. Разработанные алгоритмы и комплексы программ для решения нестационарных задач электродинамики миокарда на произвольных двумерных и трехмерных конечно-элементных образах расширяют арсенал численных средств, используемых для исследования закономерностей и особенностей пространственно-временных характеристик потенциала действия в миокарде.

2. Предложенные подходы для построения трехмерных конечно-элементных образов сердца по данным компьютерной томографии могут быть использованы для решения широкого круга задач, в частности для анализа деформационных процессов в различных системах живого организма; для анализа взаимодействия деформационных, гидродинамических и электродинамических процессов в миокарде; для построения пространственных КЭ- образов различных фрагментов костно-мышечной системы в медицинской и исследовательской практике.

Методы исследования

При осуществлении моделирования электродинамических процессов в миокарде использована апробированная феноменологическая модель Алиева – Панфилова, которая представляет собой нелинейную начально-краевую задачу в частных производных. Численный анализ этой задачи основан на построении решений последовательности более простых задач: обыкновенных дифференциальных уравнений и линейных краевых задач в частных производных. При нахождении решений этих задач использованы метод Рунге-Кутты 4-го порядка, сочетание разностных схем по времени с КЭ-аппроксимациями по пространственным координатам, объединенных разработанной автором программой.

При построении геометрического образа внутренних органов человека на базе данных компьютерной томографии использована авторская программа, в которой реализованы следующие алгоритмы: морфологический фильтр, устраняющий шумы при съеме информации и структуры заданного масштаба; алгоритм роста, формирующий объемную конфигурацию органа; алгоритмы, создающие поверхностную треугольную сетку, ограничивающую орган.

Степень достоверности научных результатов диссертации

Достоверность результатов, полученных в диссертации по моделированию электродинамики миокарда, основана на использовании апробированной модели Алиева-Панфилова, на сочетании метода Рунге-Кутты для решения нелинейного дифференциального уравнения и метода конечных разностей и КЭ-технологий для решения линейных начально-краевых задач.

Кроме того, достоверность результатов и выводов подтверждается: удовлетворительным соответствием полученных в работе численных результатов с результатами, имеющимися в публикациях других авторов;

вычислительными экспериментами по проверке сходимости используемых схем при изменении степени дискретизации по пространственным и временным переменным.

Оппонент отмечает весомую апробацию научных результатов работы на конференциях и семинарах различного уровня, основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 7 научных статьях, 6 из которых – представлены в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 6 – в изданиях, включенных в реферативную базу данных Scopus.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертации

По содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1. Автор исследует в работе электродинамику миокарда, абстрагируясь от деформационных процессов, находит некоторые закономерности формирования особых структур. На взгляд рецензента, учет деформационных и гемодинамических процессов в миокарде позволил бы придать этим выводам более весомый и аргументированный характер.
2. На с.12 автореферата имеется вывод «В результате такого возбуждения образуются спиральные волны, которые являются самоподдерживающимися волновыми структурами и могут существовать неограниченное время». Неясно, чем аргументирована последняя часть такого утверждения, поскольку расчеты в диссертации проведены для ограниченных времен (наибольшие времена, для которых оппонент увидел данные расчетов-2000мс)
3. Для практического использования созданного вычислительного инструментария его необходимо дополнить блоком идентификации параметров модели для конкретного пациента.
4. Имеются замечания по стилю и оформлению работы.
 - а) на с.88 имеется текст: «является куб и его радиус составляет 10 элементов». О каких элементах идет речь?

б) в списке литературы имеется опечатка №16. Кринский В.И., Медвинский А.Б., Панфилов А.В. Эволюция автоволновых вихрей (волны в сердце). – М.: Знание. – 1986. (должно быть М.: Знание)

Изложенные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертации и носят характер пожеланий.

Заключение

На основе вышеизложенного считаю, что, диссертационная работа «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МИОКАРДА И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЕЕ РЕЖИМЫ» является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту специальности, требованиям ВАК РФ и «Положению о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шестаков Алексей Петрович безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент

доктор физ.-мат. наук (01.02.04),
профессор, заведующий кафедрой
теории упругости Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Южный федер.
университет»

А. О. Ватульян

Дата 23 мая 2019г

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Милычакова 8а, тел.: +7 (918) 58-96075,
e-mail: vatulyan@math.rsu.ru

Подпись Ватульяна Александра Ованесовича заверяю:


г. Ростов-на-Дону
государственного университета
Мирошников О.С.