

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.188.08,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25 июня 2019 г. № 15
о присуждении Шестакову Алексею Петровичу, гражданину России,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Математическое моделирование электродинамики миокарда и анализ факторов, влияющих на ее режимы», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 23 апреля 2019 года (протокол заседания №10) диссертационным советом Д 212.188.08, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (614990, г.Пермь, ул.Комсомольский проспект, 29) в соответствии с приказом № 937-664 от 23.05.2008.

Соискатель Шестаков Алексей Петрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет», в 2013 году окончил аспирантуру очной формы обучения Института механики сплошных сред УрО РАН (период обучения 01.07.2010-30.06.2013), работает младшим научным сотрудником лаборатории Интеллектуального мониторинга Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории Интеллектуального мониторинга Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Шардаков Игорь Николаевич, заведующий лабораторией Интеллектуального мониторинга Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Ватульян Александр Ованесович – д-р физ.-мат. наук (01.02.04), профессор, заведующий кафедрой теории упругости Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»,
 2. Правдин Сергей Федорович – канд. физ.-мат. наук (05.13.18), ведущий научный сотрудник отдела теории приближения функций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук,
- дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанном ведущим научным сотрудником лаборатории математической физиологии, д-ром физ.-мат. наук Леонидом Борисовичем Кацнельсоном, младшим научным сотрудником лаборатории математической физиологии, канд. физ.-мат. наук Александром Геннадьевичем Курсановым и утвержденным директором, д-ром физ.-мат. наук Ольгой Эдуардовной Соловьевой, заключила, что диссертационная работа Шестакова Алексея Петровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача разработки и численной реализации математической модели, а также создания комплексов программ, позволяющих исследовать электродинамику миокарда на реальных трехмерных образах сердца. На основании изложенного можно заключить, что диссертация Шестакова Алексея Петровича соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор – Шестаков Алексей Петрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 7 работ по теме диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе 4 работы – в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об

опубликованных соискателем работах. Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Алгоритм создания трехмерных образов органов человека по томографическим данным // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 4. – С. 20-32. (**перечень ВАК**) – 13 стр. / 6 стр.

В работе описан эффективный алгоритм, позволяющий создавать геометрический образ органов человека на основе томограммы. Дается описание программной реализации алгоритма фронтального роста. Приведены примеры построения трехмерных образов костей таза, черепа и мышц сердца.

2. Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Создание конечно-элементных моделей частей скелета человека с приложениями к задаче о собственных колебаниях // Вычислительная механика сплошных сред - Computational continuum mechanics. – 2012. – Т.5, №3. – С. 308-312. (**перечень ВАК**) – 5 стр. / 3 стр.

Продемонстрированы возможности разработанного ранее алгоритма создания конечно-элементных образов органов реального человека по результатам томографических измерений. Приведено описание созданных конечно-элементных образов костей голени, черепа и таза, которые были использованы при решении задач нахождения собственных форм и частот колебаний этих органов с помощью метода конечных элементов.

3. Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Конечноэлементное моделирование электрического возбуждения миокарда // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – №1. – С. 76-83 == Vasserman I.N., Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Finite-element simulation of myocardial electrical excitation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2014. – V.55, № 1. – P. 61-67. (**Scopus**) – 7 стр. / 3 стр.

Представлены построенные на основе монодоменной модели сердечной мышцы изотропные и анизотропные конечно-элементные модели миокарда, позволяющие исследовать распространение волны возбуждения. Рассмотрено взаимодействие дополнительного очага возбуждения с прошедшей волной возбуждения. Численное решение получено с использованием алгоритма метода расщепления, позволяющего свести нелинейную краевую задачу в частных производных к последовательности более простых задач: обыкновенных дифференциальных уравнений и линейных краевых задач в частных производных.

4. Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P., Wasserman I.N. Development of finite element models for studying the electrical excitation of myocardium // Acta Mechanica. – 2014. – V. 225, № 9. – P.1-17. (**Scopus**) – 17 стр. / 8 стр.

В статье представлены численные результаты исследования распространения волны электрического возбуждения в миокарде, полученные с использованием конечно-элементных моделей. Геометрическая модель сердца получена на основе данных томографии с помощью разработанного комплекса программ. Приведены результаты анализа влияния анизотропии электрических свойств на распространение волны электрического возбуждения в миокарде.

5. Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Численное моделирование распространения электрического возбуждения в сердечной стенке с учетом ее волокнисто-слоистой структуры // Биофизика. – 2015. – Т.60, №4. – С. 748-757. == Vasserman I.N., Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Numerical simulation of the propagation of electrical excitation in the heart wall taking its fibrous laminar structure into account // Biophysics. – 2015. – Т. 60, №4. – С. 613-621. (Scopus) 9 стр. / 4 стр.

В статье представлены результаты численного моделирования процесса распространения электрического возбуждения в сердечной стенке с учетом ее волокнисто-слоистой структуры. Показано, что структура сердечной ткани оказывает значительное влияние на форму фронта волны электрического возбуждения.

6. Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Построение четырехкамерного геометрического образа сердца человека на основе рентгеновской томографии. // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 4. – С.372–384. (**перечень ВАК**) – 13 стр. / 6 стр.

В работе рассматривается алгоритм построения конечно-элементного образа сердца человека. В качестве исходной информации использованы результаты мультисрезовой рентгеновской томографии, полученные in vivo. Исходная томограмма обрабатывалась специально разработанным морфологическим фильтром, который позволяет сглаживать границу области сердца, устранять шумовой сигнал томографа, а также задавать степень детализации.

7. Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Механизм зарождения аритмии сердца за счет патологического распределения проводимости миокарда // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 352-358. = Vasserman I.N., Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P. The mechanism of the initiation of cardiac arrhythmias due to a pathological distribution of myocardial conductivity // Biophysics. – 2016. – V. 61, №2. – P. 297-302. (**Scopus**) – 6 стр. / 3 стр.

В работе рассматривается математическая модель для описания механизма зарождения циркулирующих электродинамических волн в миокарде. Механизм основан на использовании однонаправленного блокирования проводимости среды. Блокирование

реализуется в узком зазоре между двумя непроводящими областями. Выполнена адаптация этого механизма к размерам сердца человека.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов, все отзывы положительные: д-ра физ.-мат. наук, профессора Н.В. Глушковой, главного научного сотрудника Института математики, механики и информатики Кубанского государственного университета; акад. РАН, д-ра мед. наук, проф. Н.В. Зайцевой, научного руководителя Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения; д-ра физ.-мат. наук, доцента М.Д. Кривилева, заведующего учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред» Удмуртского государственного университета; д-ра физ.-мат. наук, проф. С.В. Русакова, заведующего кафедрой прикладной математики и информатики Пермского государственного национального исследовательского университета; д-ра физ.-мат. наук М.Ю. Филимонова, ведущего научного сотрудника Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН.

В отзывах отмечено, что диссертационная работа посвящена актуальной проблеме математического моделирования электродинамических процессов в миокарде сердца человека. Подчеркивается актуальность исследования в связи с разработкой алгоритмов и их программной реализацией, позволяющих создавать трехмерную геометрию внутренних органов на основе томографических данных. Созданные программы позволяют решать задачи электродинамики миокарда для конкретного пациента, что способствует развитию персонифицированного подхода в лечении заболеваний сердечнососудистой системы.

В отзывах содержатся следующие пожелания, вопросы и замечания: для более эффективного использования результатов диссертационной работы хотелось бы пожелать автору более тесно сотрудничать с физиологами и медиками; сценарии образования самоподдерживающихся волновых структур рассмотрены на двумерных задачах и не продемонстрированы на трехмерном образе сердца, что было бы логичным и законченным элементом работы; величины длительности потенциала действия, используемые для построения неоднородной структуры приводящей к самовозбуждению, выходят за физиологические рамки, в связи с этим следовало бы определить границы применимости такой неоднородности и возможность ее существования в миокарде человека; в автореферате не приведено ни какой информации по исследованию численной модели на предмет влияния на точность расчетов параметров дискретизации по пространству и времени; в работе большое внимание уделено построению трехмерной геометрии сердца, а потенциал использования этой геометрии для моделирования электродинамических процессов

реализован не в полной мере.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются ведущими специалистами в области разработки и применения методов математического моделирования, эффективных численных методов, в том числе – для решения задач, связанных с анализом электродинамических процессов. Оппоненты имеют публикации, соответствующие тематике диссертации, в ведущих рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук, хорошо известна своими достижениями в области математического моделирования электрических и механических процессов, протекающих в сердце, а также в области построения его трехмерной геометрии. В ведущей организации активно и на высоком уровне осуществляются научные исследования по направлению, разрабатываемому в диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- предложена трехмерная математическая модель, описывающая электродинамические процессы в мышечной структуре сердца человека;
- разработаны алгоритмы и комплексы программ, позволяющие создавать трехмерные конечно-элементные образы внутренних органов (в частности человека) по данным томографии;
- создана трехмерная конечно-элементная модель миокарда сердца человека;
- разработан комплекс программ, реализующий алгоритмы численного решения математической модели электродинамики миокарда;
- на основе численных экспериментов на двумерных и трехмерных моделях, определены параметры сценариев, обеспечивающих образование циркулирующих электродинамических волн в мышечной структуре сердца человека.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- на основе результатов математического моделирования впервые на масштабе сердца человека определена новая совокупность параметров миокарда, обеспечивающих возможность образования циркулирующей волны при прохождении одной электродинамической волны возбуждения в условиях истмуса;

- определена новая совокупность параметров неоднородной структуры миокарда с кусочно-постоянными значениями длительности электрического потенциала действия, которая приводит к образованию спиральной волны;
- разработан новый алгоритм фильтрации томографических данных, позволяющий устранять шумы, обусловленные томографом, и задавать масштаб детализации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработанная математическая модель и реализующий ее комплекс программ позволяют проводить анализ электродинамических процессов в миокарде сердца конкретного пациента;
- разработанная программа построения геометрической модели сердца на основе томографических данных универсальна и может быть использована для построения трехмерных конечно-элементных моделей различных органов тела человека.

Результаты диссертационного исследования также могут быть использованы в исследовательских институтах, академических и учебных заведениях, занимающихся математическим моделированием процессов в биологии и физиологии, а также в медицинских учреждениях для развития персонифицированного подхода в лечении заболеваний сердечнососудистой системы и других органов тела человека.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- использованы корректная постановка задачи и современные математически обоснованные методы решения;
- проведен анализ сходимости численных решений начально-краевой задачи электродинамики миокарда в зависимости от изменения параметров временной и пространственной дискретизации;
- установлено хорошее качественное и количественное соответствие результатов решения тестовых задач, полученных с применением разработанной математической модели, с результатами других исследователей;
- выполнено сопоставление основных геометрических характеристик полученной трехмерной конечно-элементной модели сердца с анатомическими данными, приведенными в литературе и показано их удовлетворительное соответствие.

Личный вклад соискателя состоит в следующем: проведен аналитический обзор литературы по теоретическим и экспериментальным подходам к изучению объекта исследования; сформулированы (совместно с научным руководителем) концептуальная и математическая постановки задачи описания электродинамических процессов в миокарде сердца человека; разработан комплекс программ, позволяющий решать нестационарные, нелинейные, краевые задачи электродинамики миокарда на

произвольных двумерных и трехмерных конечно-элементных сетках; разработана и программно реализована процедура получения конечно-элементных моделей на основе томографических данных; проведена верификация математической модели; проведен анализ полученных результатов; подготовлены публикации по выполненной работе.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842: в ней решена актуальная задача разработки и программной реализации математической модели, позволяющей строить геометрические и конечно-элементные образы объемных объектов и анализировать электродинамику миокарда на реальных трехмерных образах сердца, имеющая важное значение для развития методов математического моделирования процессов и явлений в области исследования биологических и других сложных пространственных систем.

На заседании 25 июня 2019 года диссертационный совет принял решение присудить *Шестакову Алексею Петровичу* ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 15, против присуждения ученой степени – 1, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета Д212.188.08,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Трусов П.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.188.08,
канд. физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

«27» июня 2019 г.