

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.455.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМЕНИ Г. И. МАРЧУКА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____.

решение диссертационного совета от 08.09.2025 г. № 45

о присуждении Легкому Алексею Андреевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Вычислительная биомеханика сердца: сократительная активность миокарда и диастолическое состояние аортального клапана» по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите «26» июня 2025 г., протокол № 43, диссертационным советом 24.1.455.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики имени Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН), расположенного по адресу 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, приказ о создании диссертационного совета № 1356/нк от 15.12.2021, изменение состава согласно приказу Минобрнауки России № 1215/нк от 12.10.2022.

Соискатель Легкий Алексей Андреевич, 1998 года рождения, в 2021 году окончил магистратуру Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

С 01.10.2021 по 30.09.2024 гг. обучался по программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 02.06.01 «Компьютерные и информационные науки», соответствующему научной специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», по которой подготовлена диссертация в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук.

В настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника (основное место работы).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук **Данилов Александр Анатольевич**, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук.

Научный консультант – кандидат физико-математических наук **Саламатова Виктория Юрьевна**, доцент кафедры высшей математики, механики и математического моделирования ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

Необходимость привлечения в качестве научного консультанта специалиста по моделям нелинейной теории упругости была вызвана тем, что научный руководитель Данилов А.А. не является специалистом по нелинейной теории упругости, в то время как диссертация включает не только применение численных методов для уже сформулированных моделей упругости, но и разработку новой технологии расчёта диастолического состояния аортального клапана, для построения которой требовалось глубокое понимание особенностей поведения нелинейных и анизотропных биологических тканей. Консультации Саламатовой В.Ю. дополнили консультации по численному моделированию научного руководителя Данилова А.А. и позволили соискателю выполнить диссертационную работу на более высоком научном уровне и обеспечить её практическую значимость. В соавторстве с научным консультантом было опубликовано 7 научных статей и сделано 11 устных докладов на российских и международных конференциях.

Официальные оппоненты:

Вершинин Анатолий Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

Кучумов Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной математики, механики и

биомеханики, заведующий лаборатории биожидкостей Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук, в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории математической физиологии ФГБУН ИИФ УрО РАН **Кацнельсоном Леонидом Борисовичем** и кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории математической физиологии ФГБУН ИИФ УрО РАН **Курсановым Александром Геннадьевичем**, указала, что работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор Легкий Алексей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ по теме диссертации:

1. Liogky A. A., Chernyshenko A. Yu., Danilov A. A., Syomin F. A., CarNum: parallel numerical framework for computational cardiac electromechanics // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2023. – Т. 38, № 3. – С. 127-144.
2. Liogky A. A., Danilov A. A., Syomin F. A., Temporally and spatially segregated discretization for a coupled electromechanical myocardium model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2024. – Т. 39, № 5. – С. 243-258.
3. Salamatova V. Yu., Liogky A. A., Method of Hyperelastic Nodal Forces for Deformation of Nonlinear Membranes // Differential Equations. – 2020. – Т. 56, № 7. – С. 950-958.

4. Vassilevski Yu. V., Liogky A. A., Salamatova V. Yu., Application of Hyperelastic Nodal Force Method to Evaluation of Aortic Valve Cusps Coaptation: Thin Shell vs. Membrane Formulations // *Mathematics*. – 2021. – Т. 9, № 12. – С. 1450.
5. Danilov A. A., Liogky A. A., Pryamonosov R. A., Salamatova V. Yu., Patient-Specific Geometric Modeling of an Aortic Valve // *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. – Springer International Publishing, 2019. – С. 217-227. – ISBN 978-3-030-23435-5.
6. Salamatova V. Yu., Liogky A. A., Karavaikin P. A., Danilov A. A., Kopylov Ph. Yu., Kopytov G. V., Kosukhin O. N., Pryamonosov R. A., Shipilov A. A., Yurova A. S., Vassilevski Yu. V., Numerical assessment of coaptation for auto-pericardium based aortic valve cusps // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. – 2019. – Т. 34, № 5. – С. 277-287.
7. Vassilevski Yu. V., Salamatova V. Yu., Liogky A. A. How material and geometrical nonlinearity influences diastolic function of an idealized aortic valve // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2022. – Т. 35, № 4. – С. 1581-1594.
8. Salamatova V. Yu., Liogky A. A., Karavaikin P. A., Impact of Material Stiffness and Anisotropy on Coaptation Characteristics for Aortic Valve Cusps Reconstructed from Pericardium // *Mathematics*. – 2021. – Т. 9, № 18. – С. 2193.
9. Liogky A. A., Computational mimicking of surgical leaflet suturing for virtual aortic valve neocuspidization // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. – 2022. – Т. 37, № 5. – С. 263-277.
10. Liogky A. A., Numerical Issues of Patient-specific Assessment of Reconstructed Aortic Valve // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2025. – Т. 46, № 2. – С. 736-749.
11. Karavaikin P. A., Liogky A. A., Danilov A. A., Salamatova V. Yu., Kulichkin A. S., Numerical assessment of aortic valve coaptation after neo-cuspidation procedure // *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 369-376.

Все из этих работ опубликованы в рецензируемых изданиях, которые индексируются в международных базах данных Scopus или Web of Science и удовлетворяют требованиям ВАК.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тематикой исследований, проведенных в диссертации. **Вершинин Анатолий Викторович** является известным специалистом в области численного моделирования механических конструкций, в том числе биологического

происхождения. **Кучумов Алексей Геннадьевич** имеет опыт моделирования биомеханики ряда отдельных органов и тканей и, в частности, является специалистом в области моделирования аортального клапана. Тематика диссертации соответствует области экспертизы ведущей организации.

На автореферат диссертационной работы поступил следующий отзыв:

1) отзыв от доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» Иванова Дмитрия Валерьевича и кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» Доль Александра Викторовича

Отзыв на автореферат положительный.

Диссертация посвящена вопросам построения численных моделей и программных комплексов в задачах биомеханики сердца и включает развитие новой программной платформы для проведения численных экспериментов с сопряжённой моделью электромеханики сердца, а также разработку численной технологии для предоперационной оценки функциональности дизайна реконструированного аортального клапана в операции Озаки. В работе сформулирована обобщённая структура моделей сопряжённой электромеханики тканей сердца и на её основе предложена, реализована и численно исследована полностью разделённая численная схема дискретизации таких моделей. Реализована программная библиотека для построения конечно-элементных дискретизаций общего вида на тетраэдральных сетках. Реализована программа для расчёта движения оболочек и мембран с учётом их контактных взаимодействий. Сформулирована и реализована численная модель для оценки закрытого диастолического состояния реконструированного аортального клапана, а также предложен ряд алгоритмов для непосредственного учёта в модели персонализированной геометрии корня аорты и особенностей процедуры хирургического размещения створок. Формализован ряд медицинских понятий, используемых для оценки состоятельности аортального клапана.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и численном исследовании полностью разделённой численной схемы для моделирования сопряжённой электромеханики сердца, а также в разработке

новой численной модели для оценки замыкательной способности реконструированного аортального клапана. Для персонализации модели аортального клапана были предложены алгоритмы виртуального размещения реконструированных створок в полости корня аорты, причём идеи алгоритмов являются довольно общими, и поэтому они могут служить основой для разработки аналогичных алгоритмов в приложении к моделированию реконструкции других клапанов (например, митрального клапана).

Практическая значимость определяется тем, что решаемые в диссертации задачи отвечают на потребности современной кардиологии. Разработанная программная платформа упрощает процесс подготовки новых сопряжённых моделей миокарда и позволяет проводить фундаментальные исследования развития болезней сердца и методов терапии. Также программная платформа для расчёта сопряжённых моделей миокарда может быть использована для генерации синтетических данных с целью калибровки моделей под конкретные клинические задачи. Разработанную модель оценки функциональности реконструированного аортального клапана можно применить для персонализированного подбора оптимального дизайна створок на предоперационном этапе, что снижает стоимость процедуры замены клапана и сокращает время пребывания пациента на аппарате искусственного кровообращения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена и реализована новая численная схема расщепления по процессам для расчёта сопряжённой модели электромеханики сердца, где распространение электрической активации и деформация сплошной среды описываются на несогласованных тетраэдральных сетках и связаны друг с другом посредством систем обыкновенных дифференциальных уравнений для клеточных уравнений, решаемых независимо в точках интегрирования.

2. Подготовлен и впервые осуществлён трёхмерный расчёт сопряжённой модели электромеханики сердца, использующей уравнения сопряжения, предложенные Ф.А. Сёминым, А.К. Цатуряном и А.Ш. Осепян.

3. Реализована новая численная схема для расчёта деформирования тонкостенных конструкций с учётом контактных взаимодействий, применяемая для рассмотрения не только динамических, но и квазистатических задач, и

позволяющая использовать неявные схемы с большими шагами по (квази-) времени.

4. Предложена автоматическая технология виртуального размещения плоских створок реконструированного аортального клапана внутри полости аорты пациента вдоль заданных линий крепления с учётом особенностей процедуры хирургического размещения створок.

5. Разработана новая модель отыскания диастолического состояния реконструированного аортального клапана (АК), учитывающая особенности крепления створок в операции Озаки, и предложена формализация параметров коаптации для оценки функциональности АК по результатам моделирования.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается тем, что разработанные программные комплексы были верифицированы с помощью решения ряда тестовых задач и сравнения результатов с известными аналитическими решениями или опубликованными в литературе результатами расчётов. Результаты расчётов диастолического состояния аортального клапана показали удовлетворительную согласованность с результатами выполненных в медицинских исследованиях натурных экспериментов по замене створок аортального клапана в 20 свиных корнях аорты.

Личный вклад соискателя. Соискатель принимал активное участие в разработке программной платформы для моделирования электромеханики миокарда CarNum, а также самостоятельно подготовил программную реализацию модели для оценки замыкательной способности аортального клапана. В работе [1] соискателем была предложена программная архитектура платформы CarNum, реализована общая конечно-элементная библиотека AniFem++, подготовлен блок для моделирования пассивной трёхмерной механики в составе платформы и проведена его верификация. В работе [2] соискателем предложена новая численная схема для дискретизации сопряжённой модели электромеханики миокарда и произведено её численное исследование посредством рассмотрения предложенной соавторами сопряжённой модели простой геометрии. В работах [3—8; 11] вклад диссертанта заключался в программной реализации описанных моделей упругости и модели закрытия аортального клапана, запуске расчётов и сборе результатов счёта для дальнейшего анализа. Используемые постановки тестовых задач, геометрии пациентов и линии крепления подготавливались

соавторами. Работы [9-10] подготовлены диссертантом самостоятельно, обобщают накопленный им опыт моделирования аортального клапана и посвящены таким вопросам как разработка алгоритма виртуального размещения створок внутри просвета корня аорты, выбор метода учёта контактного взаимодействия, формулировка критерия останова для расчётов и математическая формализация для величин коаптации.

На заседании **08 сентября 2025 г.** диссертационный совет принял решение: за вклад в развитие новой программной платформы для проведения численных экспериментов с сопряжённой моделью электромеханики сердца, а также за разработку персонализированной численной технологии для оценки замыкательной способности реконструированного аортального клапана присудить **Легкому Алексею Андреевичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 17 докторов наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

д. ф.–м. н.,

академик РАН

Тыртышников Евгений Евгеньевич

Ученый секретарь диссертационного совета

д. ф.–м. н.

Бочаров Геннадий Алексеевич

08.09.2025 г.