УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и инновациям
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета
доктор физ.-мат. наук, доцент
_____ А.И. Швейкин
«15» октября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

по диссертации Пиля Никиты Евгеньевича «Методические основы расчета связной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики аортального клапана» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.10 – Биомеханика и биоинженерия, выполненной на кафедре вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Соискатель Пиль Никита Евгеньевич в 2021 год с отличием окончил магистратуру в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» с присуждением квалификации «Магистр» (диплом №105931 0500027 от 01 июля 2021 года)

В период с 2021 по 2025 г. соискатель обучался в очной аспирантуре в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.06.01 Математика и механика, направленности «Биомеханика» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Диплом об окончании аспирантуры №105931 0929529, выданный 16 июля 2025 года.

С 2023 года по настоящее время соискатель Пиль Никита Евгеньевич работает в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре вычислительной математики, механики и биомеханики и лаборатории биожидкостей, занимая должность младшего научного сотрудника.

Тема диссертации «Методические основы расчета связной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики

аортального клапана» утверждена приказом № 33 от 03.03.2025 проректора по науке и инновациям ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», д.ф.-м.н., Швейкина А.И.

Научный руководитель – Кучумов Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией биожидкостей, профессор кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», утвержденный приказом 51-А от 17.04.2023 проректора по науке и инновациям ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», д.ф.-м.н., Швейкина А.И., предоставил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Кандидатские экзамены по истории и философии науки, иностранному языку и биомеханике и биоинженерии сданы в период обучения в аспирантуре диплом №105931 0929529, выданный 16 июля 2025 года ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

На заседании кафедры присутствовали:

1. заведующий кафедрой, д.т.н., профессор, Столбов В.Ю.,
2. профессор, д.ф.-м.н., доцент, Акулич Ю.В.,
3. профессор, д.ф.-м.н., доцент, Алексеев А.О.,
4. профессор, к.э.н., , доцент Антипова Т.В.,
5. профессор, д.т.н., профессор, Селянинов А.А.,
6. профессор, д.ф.-м.н., доцент, Малыгина В.В.,
7. профессор, д.т.н., Сметанников О.Ю.,
8. профессор, д.т.н., доцент, Федосеев С.А.,
9. доцент, к.ф.-м.н., Баландин А.С.,
10. доцент, к.т.н., доцент, Ильялов О.Р.,
11. доцент, к.ф.-м.н., Клюев А.В.,
12. доцент, к.ф.-м.н., Кузнецова Ю.С.,
13. доцент, к.т.н., Лесникова Ю.И.,
14. доцент, к.ф.-м.н., Лохов В.А.,
15. доцент, к.ф.-м.н., Никитин В.Н.,
16. доцент, к.т.н., доцент, Онискив В.Д.,
17. доцент, к.ф.-м.н., доцент, Осипенко М.А.,
18. доцент, к.ф.-м.н., Сабатулина Т.Л.,
19. заведующий учебной лабораторией, к.т.н., доцент, Сотин А.В.,
20. доцент, к.ф.-м.н., Чудинов К.М.,
21. доцент, к.ф.-м.н., Шабрыкина Н.С.,

22. старший преподаватель, к.т.н., Носов Ю.О.,
23. доцент, к.т.н., Шитоев И.Д.,
24. старший преподаватель, Горохов А.Ю.,
25. старший преподаватель, Киченко А.А.,
26. ассистент, Фасхутдинова Ю.Б.,
27. ведущий инженер, Ильиных Г.В.,
28. ведущий инженер, Якимова О.С.
29. ведущий инженер, Неплюева А.А.,
30. ведущий инженер, Лекомцева А.А..

Приглашенные специалисты по теме диссертации:

Брацун Дмитрий Анатольевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедры Прикладной физики факультета прикладной математики и механики ФГАОУ ВО ПНИПУ.

Красняков Иван Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедры Прикладной физики факультета прикладной математики и механики ФГАОУ ВО ПНИПУ.

Доль Александр Викторович, д.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского».

Рецензенты диссертации:

Брацун Дмитрий Анатольевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедры Прикладной физики факультета прикладной математики и механики ФГАОУ ВО ПНИПУ.

Доль Александр Викторович, д.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского».

Рецензенты предоставили положительные отзывы о диссертации.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

Актуальность и общая характеристика исследования. Работа посвящена разработке методических основ численного исследования гемодинамики аортального клапана с учётом взаимодействия кровотока с деформируемыми створками. При аортальном стенозе, после реконструктивных вмешательств и при имплантации биопротезов изменяются динамика раскрытия клапана, распределение гидродинамических нагрузок и структура потока. При этом локальные механические и гемодинамические характеристики, необходимые для подробного анализа клапана, не могут быть в полном объёме установлены непосредственно по клиническим измерениям.

Актуальность исследования определяется необходимостью согласованно рассматривать свойства ткани створок, их пространственное движение, течение крови и условия формирования входного потока. Использование полной связанной постановки взаимодействия жидкости и твёрдого тела (fluid–structureinteraction, FSI) позволяет анализировать конфигурационно зависимую нагрузку на створки и её влияние на гемодинамические характеристики. Существенное прикладное значение имеет разработка методов, допускающих использование медицинских данных для задания геометрии и идентификации параметров материалов.

В диссертационной работе исследованы нативный клапан в норме и при патологических изменениях, клапан после реконструкции створок, а также биопротезный аортальный клапан. Рассмотрены различные конститутивные модели материала, методика обработки данных эхокардиографии, подход к построению физиологически обоснованных входных условий на основе модели левого желудочка и сопоставление полной FSI-постановки с упрощённой структурной моделью.

Личный вклад автора. Соискателем разработаны расчетные модели аортального клапана в постановке взаимодействия жидкости и твердого тела (FSI), предназначенные для анализа гемодинамики клапана в норме, при патологических изменениях и после реконструктивных вмешательств. Автором проведен сравнительный анализ конститутивных моделей материала створок, определено их влияние на кинематику клапана, напряженно-деформированное состояние тканей и локальные характеристики кровотока. Автор участвовал в формировании методического подхода к выбору моделей материала в зависимости от клинического состояния клапана.

Автором разработана методика идентификации параметров моделей материала створок по видеоданным эхокардиографии на основе отслеживания траекторий движения контрольных точек и сопоставления экспериментальных и численно рассчитанных данных. Выполнены постановка и проведение вычислительных экспериментов для различных состояний аортального клапана, анализ результатов и сопоставление расчетных характеристик с данными медицинской визуализации и опубликованными результатами других исследователей.

В рамках исследования автором реализованы и исследованы подходы к получению физиологически обоснованных входных граничных условий для модели аортального клапана с использованием модели левого желудочка, учитывающей распространение электрического возбуждения, активное сокращение миокарда и формирование пространственно неоднородного

потока. Проведено сравнение полной FSI-постановки со структурной конечно-элементной постановкой и выявлено влияние характера гидродинамического нагружения на движение створок.

В части исследования биопротезного аортального клапана автором выполнено численное моделирование с использованием анизотропных гиперупругих моделей материала перикарда, параметры которых определялись с привлечением данных двухосных механических испытаний. Оценено влияние конститутивных соотношений на геометрическую и эффективную площади открытия, структуру потока и механический отклик створок. Автор принимал участие в подготовке научных публикаций по теме диссертации и разработке программных модулей для обработки эхокардиографических данных и параметризованного формирования геометрии клапана.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием математических моделей механики сплошной среды и гидродинамики, численной реализацией методом конечных элементов, сопоставлением результатов для различных расчетных постановок, анализом соответствия полученных характеристик опубликованным экспериментальным и численным данным, а также использованием эхокардиографических данных при оценке движения створок. Для биопротезного клапана применены параметры моделей материала, полученные на основе механических испытаний перикарда.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных мероприятиях, в том числе:

– Всероссийская конференция молодых ученых «Фундаментальная и прикладная медицина “BioMeeting”» (Саратов, 2022 г.);

– XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2023 г.);

– Всероссийский симпозиум «Биомеханика» (2023, 2024, 2025 гг.);

– VII Съезд биофизиков России (Краснодар, 2023 г.);

– XVII и XX Всероссийские школы «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (Дивноморское, 2023, 2026 гг.);

– Международная конференция «Механика биомедицинских материалов и устройств» (Пермь, 2023, 2025 гг.);

– 1st и 2nd International Online Conference on Functional Biomaterials (2024, 2026 гг.);

– Всероссийские конференции молодых учёных-механиков YSM-2024 и YSM-2025 (Сочи, 2024, 2025 гг.);

– 17th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (Шанхай, 2024 г.);

– V и VI Всероссийские конференции с международным участием «Математика в медицине» (2025, 2026 гг.).

– 9-я летняя школа по биореологии и симпозиум по микро- и наномеханике и механобиологии клеток, биологических тканей и систем «Биорео 2026» (дистанционный формат, 2026 г).

– Конференция Математическое моделирование в медицине и биомедицинском инжиниринге (ФТ Сириус, 2026 г).

Научная новизна исследования

1. Разработана связанная математическая модель гемодинамики аортального клапана в постановке взаимодействия жидкости и твердого тела; сформирован единый расчетный подход к моделированию клапана в норме, при патологических изменениях створок и после реконструктивных вмешательств с выбором соответствующих моделей материала.

2. Разработана методика идентификации параметров моделей материала створок по видеоданным эхокардиографии, основанная на согласовании измеряемых траекторий движения створок с результатами численного моделирования.

3. Предложен подход к заданию физиологически обоснованных граничных условий на входе в расчетную область аортального клапана с использованием модели левого желудочка, позволяющий учесть пространственную неоднородность скоростного поля, формируемого сердечным выбросом.

4. На основе сопоставления полной FSI-постановки со структурной конечно-элементной постановкой установлено влияние пространственно неоднородного гидродинамического нагружения на движение створок и их напряженно-деформированное состояние.

5. Проведено моделирование гемодинамики биопротезного аортального клапана с использованием двух анизотропных гиперупругих моделей материала створок, параметры которых определены по данным двухосных испытаний, и установлено влияние выбранной модели материала на интегральные и локальные характеристики течения.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии методических основ численного описания гемодинамики аортального клапана, обеспечивающих согласованное рассмотрение течения крови, механики створок и физиологически обоснованных граничных условий. Сопоставление различных моделей материала, вариантов входных условий и

расчетных постановок позволяет определить факторы, существенно влияющие на точность воспроизведения механических и гемодинамических характеристик клапана.

Практическая значимость определяется возможностью использования разработанной вычислительной схемы для количественного исследования аортального клапана в норме, при стенозе, после реконструкции и при моделировании биопротезных конструкций. Методика обработки данных эхокардиографии дает возможность оценивать наблюдаемую кинематику створок и использовать ее при идентификации параметров материала для пациент-ориентированных моделей. Подход к построению параметризованной геометрии создает основу для систематических вычислительных исследований и подготовки синтетических данных.

По теме исследования зарегистрированы программные модули: «Программный модуль для отслеживания траекторий движения створок аортального клапана по данным эхокардиографии» (свидетельство № 2024689649 от 09.12.2024) и «Программный модуль для генерации геометрии модели аортального клапана» (свидетельство № 2024691708 от 24.12.2024).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении проектов № FSNM-2023-0003 «Математические модели и новые материалы для высокотехнологичной медицины», № FSNM-2025-0001 «Численное моделирование течения биожидкостей в каналах сложной геометрии», № FSNM-2024-0009 в рамках проекта по созданию молодежных лабораторий, а также проекта «Развитие технологии для проектирования численного моделирования и аддитивного производства сетчатых конструкций для транскатетерной имплантации аортального клапана» (соглашение № 27-03 от 07.07.2025).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационного исследования было опубликовано 23 научных работы, в том числе 9 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus, из них 2 в журналах из перечня ВАК по специальности. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. 15 прочих публикаций, в том числе тезисы докладов на российских и международных конференциях.

1. Pil N., Alex G. Kuchumov, Kadyraliev B., Arutunyan V. Influence of Aortic Valve Leaflet Material Model on Hemodynamic Features in Healthy and Pathological States // Mathematics. MDPI, – 2023. – Vol. 11, No 2. – P. 428. (авторский вклад 70%)

Соискателем разработаны и реализованы связанные численные модели взаимодействия крови и створок аортального клапана для физиологического и патологического состояний. Проведены численные расчёты и анализ влияния выбора модели материала на кинематику и раскрытие створок, структуру потока и гемодинамические показатели. Выполнены обработка и интерпретация результатов сопоставления нормального и патологического состояний клапана.

2. Пиль Н.Е., Кучумов А.Г. Отслеживание траекторий движения створок аортального клапана с использованием данных эхокардиографии // Российский журнал биомеханики. – 2024. – Т. 28, № 4. – С. 159–168 (авторский вклад 85%)

Соискателем разработана методика отслеживания движения створок по видеоданным эхокардиографии, включающая сегментацию изображений и восстановление траекторий контрольных точек на протяжении сердечного цикла. Полученные траектории использованы для сопоставления наблюдаемой кинематики створок с результатами численного моделирования и последующей идентификации параметров модели материала.

3. Pil N., Kuchumov A.G. Algorithmic Generation of Parameterized Geometric Models of the Aortic Valve and Left Ventricle // Sensors. – 2024. – Vol. 25, No 1. – P. 11. (авторский вклад 80%)

Соискателем разработаны параметризованные геометрические модели аортального клапана и левого желудочка и алгоритмы генерации их вариантов. Выполнена реализация геометрического компонента вычислительной методологии, обеспечивающего построение расчётных областей и подготовку геометрических моделей для последующих биомеханических и гемодинамических расчётов.

4. Pil N., Kuchumov A.G. Aortic Valve Leaflets Motion Trajectories Tracking by Using Echocardiography Data // Proceedings – 2024 17th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, CISP-BMEI 2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., – 2024. (авторский вклад 70%)

Соискателем разработаны и применены алгоритмы обработки эхокардиографических видеоданных для определения траекторий движения створок аортального клапана. Выполнены восстановление движения контрольных точек и подготовка количественных данных о кинематике створок для их сопоставления с результатами численного моделирования и решения задачи идентификации параметров материала.

5. Pil N., Kuchumov A.G. Algorithmic Generation of Parameterized Geometric Models of the Aortic Valve and Left Ventricle // Proceedings –

2024 17th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, CISP-BMEI 2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., – 2024. (авторский вклад 70%)

Соискателем разработаны алгоритмы параметризованного построения геометрии аортального клапана и левого желудочка и формирования вариантов геометрических моделей. Результаты использованы при создании единой вычислительной схемы, связывающей геометрическое описание клапана и прилегающих областей с постановкой последующих задач гемодинамики и механики.

6. Fedotova P., Pil N., Kuchumov A.G., Barbashina E., Tsilibin V., Nemavhola F., Pandelani T., Kadyraliev B., Ha T.S. Numerical Simulation of Aortic Valve Leaflets Calcification Influence on Hemodynamic Performance Using Fluid–Structure Interaction Approach // Processes. – 2025. – Vol. 13, No 11. (авторский вклад 55%)

Соискателем разработаны и реализованы элементы связанной FSI-модели аортального клапана, применённой к исследованию кальцификации створок. Выполнены численные расчёты и анализ изменения подвижности и раскрытия створок, структуры струи, скорости кровотока, градиента давления и пристеночных касательных напряжений при патологическом изменении механических свойств ткани.

7. Pil N., Alex G. Kuchumov, Nemavhola F., Pandelani T., Sang Ha T. Mechano-electrical-fluid interaction left-ventricle model for numerical evaluation of aortic valve hemodynamics // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology – 2026. – Vol. 13, – P. 1–29. (авторский вклад 70%)

Соискателем разработана механо-электрофизиологическая модель левого желудочка, объединяющая описание электрического возбуждения миокарда, формирования активных напряжений, сокращения стенки и течения крови. На основе расчётов получено пространственно и во времени распределённое поле скорости в выходном тракте левого желудочка; исследовано его влияние как входного граничного условия на гемодинамику аортального клапана по сравнению с упрощённым равномерным профилем скорости.

8. Matjeka E., Pil N., Alex G. Kuchumov, Ngwangwa H., Pandelani T., Nemavhola F. Anisotropic Hyperelastic Properties of Porcine Pericardium Under Equi-Biaxial Load: Implications for Aortic Valve Design // Frontiers – 2026. – Vol. 14 (авторский вклад 50%)

В части исследования биопротезного аортального клапана соискателем выполнены FSI-моделирование и анализ влияния выбора анизотропной гиперупругой модели материала створок на их механическое поведение и

гемодинамические характеристики. В расчётах использованы параметры моделей материала, полученные по результатам двухосных испытаний свиного перикарда; оценено влияние модели материала на формирование кровотока и показатели раскрытия биопротеза.

9. Пиль Н.Е. Методические основы расчета связной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики аортального клапана // Российский журнал биомеханики. – 2026. – Т. 30, № 2. – С. 11–38. (авторский вклад 100 %)

В единоличной публикации автором обобщены результаты проведённых исследований и сформирована методология расчёта гемодинамики аортального клапана. Она объединяет выбор расчётной постановки, построение параметризованной геометрии, выбор и идентификацию моделей материала створок, формирование физиологически обоснованных граничных условий и оценку локальных и интегральных гемодинамических характеристик. Систематизированы область применения и ограничения рассмотренных подходов.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. № 2024689649 «Программный модуль для отслеживания траекторий движения створок аортального клапана по данным эхокардиографии» /Н.Е. Пиль, Д.Г. Бастраков, А.Г. Кучумов. Дата регистрации 09.12.2024.

2. № 2024691708 «Программный модуль для генерации геометрии модели аортального клапана» / В.Г. Цилибин, А.Г. Кучумов, Н.Е. Пиль. Дата регистрации 24.12.2024.

Ценность научных работ соискателя состоит в разработке и обосновании единой методологии численного моделирования гемодинамики аортального клапана, объединяющей построение параметризованной геометрии, выбор и идентификацию моделей материала створок, формирование физиологически обоснованных граничных условий и решение связанной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела. В опубликованных работах показано влияние расчетной постановки и механических свойств створок на кинематику клапана и гемодинамические характеристики, а также продемонстрирована применимость разработанного подхода для моделирования нативного, патологически измененного, реконструированного и биопротезного аортального клапана.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1, 2, 5, 6:

изучение физико-механических свойств и структуры биологических жидкостей, мягких тканей, отдельных органов и систем; изучение закономерностей движения биологических жидкостей, напряжений и деформаций в тканях и органах; изучение механических, гидравлических и электрических основ и проявлений регуляции в биологических объектах; разработка на основе методов механики средств для исследования свойств и явлений в живых системах.

Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении учёных степеней»

Выполненная Н.Е. Пилем диссертационная работа полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

Диссертация «Методические основы расчета связной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики аортального клапана» Пиля Никиты Евгеньевич рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия».

На заседании присутствовали 32 человека, из них имели право голоса 25. По профилю диссертационного исследования докторов наук – 4, кандидатов наук – 10. Результаты голосования: «за» – 25, «против» – 0, «воздержались» – 0. Протокол № 3 от 30 сентября 2026 года.

Заведующий кафедрой
вычислительной математики,
механики и биомеханики ФГАОУ
ВО «Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет»,
доктор технических наук,
профессор Столбов Валерий Юрьевич

Подпись д.т.н., профессора В.Ю. Столбова заверяю:

Ученый секретарь
Ученого совета ПНИПУ,
доцент, кандидат
исторических наук Макаревич Владимир Иванович