

ОТЗЫВ

научного руководителя

на диссертационную работу Пиля Никиты Евгеньевича

«Методические основы расчета связанной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики аортального клапана»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по научной специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия»

Диссертационная работа Пиля Никиты Евгеньевича посвящена разработке методических основ математического моделирования гемодинамики аортального клапана с учётом взаимодействия крови и деформируемых створок. Актуальность исследования обусловлена распространённостью заболеваний аортального клапана, необходимостью количественной оценки его функционирования и отсутствием единой методики математического моделирования, объединяющей выбор расчётной постановки, построение геометрии, задание и идентификацию моделей материала створок, формирование физиологически обоснованных граничных условий и оценку гемодинамических характеристик клапана. В работе сформирована последовательная вычислительная методология, объединяющая указанные этапы в единую схему.

В основе предложенной методологии лежит параметризованное описание геометрии аортального клапана и левого желудочка, позволяющее формировать воспроизводимые варианты расчётных областей и исследовать различные состояния клапана в сопоставимых условиях. Для описания взаимодействия крови и створок разработана трёхмерная связанная FSI-модель, включающая уравнения движения жидкости, механику деформируемого твёрдого тела и условия согласования на границе раздела сред. Численная реализация выполнена методом конечных элементов с применением ALE-подхода для жидкостной области.

Методическое обоснование выбора расчётной постановки выполнено путём сопоставления полной связанной задачи с четырьмя вариантами структурной конечно-элементной модели, различающимися способом задания гидродинамической нагрузки. Показано, что пространственно-неоднородное распределение давления по поверхности створок и его зависимость от текущей конфигурации клапана существенно влияют на перемещения, деформации, напряжения и динамику створок. Полученные результаты позволили определить ограничения упрощённых структурных постановок и обосновать

применение полной FSI-модели для согласованного описания кинематики створок и гемодинамики.

В рамках единой расчётной схемы исследовано влияние механических свойств створок на работу аортального клапана в физиологическом состоянии, при кальцификации и после неокуспидизации аутологичным перикардом по методике Озаки. Для каждого сценария использованы определяющие соотношения, соответствующие типу ткани и характеру её механического отклика. Установлено влияние жёсткости, нелинейности и анизотропии материала на степень раскрытия клапана, структуру потока, перепад давления, пристеночные касательные напряжения и деформации створок. Тем самым выбор модели материала включён в методологию как самостоятельный и обязательный этап расчёта.

Разработана методика идентификации параметров модели материала по видеоданным эхокардиографии. Методика основана на отслеживании движения створок, восстановлении траекторий контрольных точек и сопоставлении наблюдаемых траекторий с результатами численного моделирования. Такой подход связывает параметры конститутивной модели с данными о реальной кинематике клапана и дополняет разработанную методологию средствами индивидуализации механических свойств.

Отдельным этапом методологии является формирование физиологически обоснованных входных граничных условий. Соискателем разработана связанная механо-электрофизиологическая модель левого желудочка, объединяющая распространение электрического возбуждения, формирование активных напряжений, деформирование миокарда и движение крови. Полученное пространственно распределённое поле скорости в выходном тракте используется как входное условие для модели аортального клапана. Проведённое сопоставление показало влияние структуры входного потока на течение в области клапана, характер раскрытия створок и распределение механических напряжений.

Работоспособность сформированной методологии продемонстрирована также на модели биопротезного аортального клапана. В расчётах использованы параметры материала, определённые по результатам двухосных испытаний свиного перикарда, и сопоставлены анизотропные гиперупругие модели с двумя и четырьмя семействами волокон. Выполненный FSI-анализ показал влияние выбранного конститутивного закона на кинематику створок, структуру течения, геометрическую и эффективную площади открытия. Этот этап подтверждает применимость разработанного подхода к моделированию биопротезных конструкций с экспериментально определёнными свойствами материала.

Научная новизна работы определяется формированием единой методологии моделирования гемодинамики аортального клапана и результатами, полученными при обосновании её отдельных этапов. К ним относятся выбор связанной FSI-постановки, методический подход к выбору моделей материала для различных состояний клапана, идентификация параметров по данным эхокардиографии, формирование пространственно распределённых граничных условий на основе модели левого желудочка и применение общей расчётной схемы к биопротезному клапану. Обоснованность результатов обеспечивается использованием уравнений механики сплошной среды и апробированных численных методов, сопоставлением расчётных постановок, данными эхокардиографии, экспериментально определёнными параметрами материалов и сравнением с опубликованными численными и экспериментальными исследованиями.

Практическая значимость работы связана с возможностью применения разработанной методологии в пациент-ориентированном моделировании, анализе патологических изменений, реконструктивных вмешательств и биопротезных клапанов. С участием соискателя разработаны зарегистрированные программные модули для отслеживания траекторий движения створок по данным эхокардиографии и генерации геометрии модели аортального клапана. Результаты диссертации использованы при выполнении проектов № FSNM-2023-0003, № FSNM-2025-0001, № FSNM-2024-0009, а также проекта по развитию технологий моделирования и аддитивного производства сетчатых конструкций для транскатетерной имплантации аортального клапана.

Личный вклад Н.Е. Пиля включает разработку основных элементов методологии, построение параметризованных геометрических моделей, постановку и реализацию связанных FSI-задач, численные исследования нативного, патологически изменённого, реконструированного и биопротезного клапана, разработку методики идентификации параметров материала и механо-электрофизиологической модели левого желудочка. Основная часть численных расчётов, обработка, анализ и интерпретация результатов выполнены соискателем лично. В ходе работы Н.Е. Пиль проявил научную самостоятельность, способность формулировать и решать комплексные задачи вычислительной биомеханики, объединять модели различной физической природы и обобщать результаты в рамках единого методического подхода.

Результаты исследования апробированы на российских и международных научных мероприятиях по биомеханике, механике сплошных сред, биомедицинским материалам и математическому моделированию в

медицине. Диссертационная работа имеет последовательную структуру, в которой анализ расчётных подходов переходит в разработку и обоснование элементов методологии и их применение для моделирования различных состояний и конструкций аортального клапана. По тематике, содержанию и использованным методам работа соответствует научной специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия».

Считаю, что диссертация Пилия Никиты Евгеньевича «Методические основы расчета связанной задачи взаимодействия жидкости и твердого тела для оценки гемодинамики аортального клапана» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научной задачи по разработке методологии математического моделирования гемодинамики аортального клапана, может быть рекомендована к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия», а её автор заслуживает присуждения указанной учёной степени.

Научный руководитель:

Кучумов Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент,

заведующий научно-исследовательской лаборатории, лаборатория биожидкостей,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»,

адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект 29

e-mail: kychymov@inbox.ru

телефон: +7(342)239-17-02

руководитель научной группы, Научный центр генетики и наук о жизни, АНОО ВО
«Научно-технологический университет «Сириус»

адрес: 354340, Федеральная территория Сириус, Олимпийский проспект 1

e-mail: kuchumov.ag@talantiuspeh.ru

телефон: +79028086327

27 сентября 2026 г.

Кучумов Алексей Геннадьевич

Ученый секретарь
Ученого совета ПНИПУ, доцент
кандидат исторических наук

Макаревич Владимир Иванович

