

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-2-191-200>
УДК 616.126.3/5-77:004.4

Автоматическая оптимизация протеза клапана сердца – подход на основе генетического алгоритма

Е.А. Овчаренко, П.С. Онищенко, А.Е. Костюнин, Т.В. Глушкова,
Т.Н. Акентьева, Н.Н. Борисова, М.П. Фокеева, К.Ю. Клышников

Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний (НИИ КПССЗ), 650002, Российская Федерация, Кемерово, бульвар имени академика Л.С. Барбараша, стр. 6

Аннотация

Введение. Разработка новых и совершенствование существующих моделей биопротезов клапанов сердца представляет собой важную задачу современного инжиниринга медицинских изделий. Улучшение геометрии ключевого компонента протеза – створчатого аппарата – способно значительно улучшить его долговечность и, следовательно, клиническую результативность вмешательств на клапанах сердца.

Цель исследования: разработка метода автоматической оптимизации створчатого аппарата протеза клапана сердца с использованием генетического алгоритма NSGA-II. Основной задачей является снижение механических напряжений, повышение гидродинамической эффективности и биомеханической устойчивости протезов, что должно способствовать увеличению их срока службы и снижению вероятности осложнений.

Материал и методы. В работе использована интеграция параметрического моделирования, численного анализа и направленной оптимизации. Генерация геометрии створок осуществлялась с использованием языка Python и средств автоматизированного проектирования (САПР). Биомеханический анализ проводился методом конечных элементов (МКЭ) в среде Abaqus/CAE. Оптимизация осуществлялась с применением алгоритма NSGA-II, позволяющего автоматически подбирать сбалансированные решения по нескольким критериям: площади открытия и закрытия створок, уровню механических напряжений и степени их деформации. Всего было сформировано 250 поколений геометрий. Оптимизированная конструкция была прототипирована методом 3D-печати с использованием полимерных материалов.

Результаты. Оптимизация позволила существенно снизить напряжение в створчатом аппарате и улучшить его функциональные характеристики. В ходе работы алгоритма было установлено, что максимальные улучшения параметров наблюдаются к 42-му и 58-му поколениям, после чего эволюции показателей не отмечалось. Итоговая модель демонстрирует умеренную площадь открытия (66% от максимальной, 2,7 см²), минимальную площадь закрытия (1%), максимальное напряжение 0,89 МПа и отсутствие значительных искажений. Однако процесс 3D-прототипирования выявил технологические сложности, связанные с наличием дефектов из-за использования поддержек при печати.

Заключение. Разработанный алгоритм автоматической оптимизации створчатого аппарата клапана сердца продемонстрировал эффективность в повышении механической устойчивости и гидродинамической эффективности конструкции. Методика позволяет значительно сократить время проектирования и уменьшить субъективность инженерных решений. Тем не менее, выявленные технологические сложности прототипирования требуют дальнейшей доработки, включая альтернативные методы производства. Будущие исследования будут направлены на улучшение биосовместимости материалов и экспериментальную валидацию оптимизированных моделей.

Ключевые слова:

автоматическая оптимизация; протез клапана сердца; генетический алгоритм; метод конечных элементов; численное моделирование; 3D-прототипирование; механические напряжения; гидродинамическая эффективность; биомеханическая устойчивость; параметрическое моделирование.

Финансирование:

данная работа выполнена в рамках фундаментальной темы № 0419-2022-0001 «Молекулярные, клеточные и биомеханические механизмы патогенеза сердечно-сосудистых заболеваний в разработке новых методов лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы на основе персонализированной фармакотерапии, внедрения малоинвазивных медицинских изделий, биоматериалов и тканеинженерных имплантатов».

Для цитирования:

Овчаренко Е.А., Онищенко П.С., Костюнин А.Е., Глушкова Т.В., Акентьева Т.Н., Борисова Н.Н., Фокеева М.П., Клышников К.Ю. Автоматическая оптимизация протеза клапана сердца – подход на основе генетического алгоритма. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2025;40(2):191–200. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-2-191-200>

Automatic optimization of heart valve prosthesis – a genetic algorithm-based approach

Evgeny A. Ovcharenko, Pavel S. Onishchenko, Alexander E. Kostyunin, Tatyana V. Glushkova, Tatyana N. Akentyeva, Natalia N. Borisova, Marina P. Fokeeva, Kirill Yu. Klyshnikov

Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases (NII KPSSZ),
6, Sosnoviy blvd, Kemerovo, 650002, Russian Federation

Abstract

Introduction. The development of new and improvement of existing models of bioprosthetic heart valves is an important task of current engineering of medical devices. Developing the geometry of the key component of the prosthesis - the valve apparatus - can significantly improve its durability and, therefore, the clinical effectiveness of interventions on heart valves.

Aim: To develop a method for the automatic optimization of the leaflet apparatus of a heart valve prosthesis using the NSGA-II genetic algorithm. The primary goal is to reduce mechanical stress, enhance hydrodynamic efficiency, and improve biomechanical durability, ultimately increasing the lifespan of prosthetic valves and reducing the risk of complications.

Material and Methods. The study integrates parametric modeling, numerical analysis, and directed optimization. Leaflet geometry generation was performed using Python and computer-aided design (CAD) tools. Biomechanical analysis was conducted using the finite element method (FEM) in Abaqus/CAE. Optimization was implemented via the NSGA-II algorithm, which automatically selects balanced solutions based on multiple criteria: leaflet opening and closing area, mechanical stress levels, and deformation degree. A total of 250 generations of geometries were formed. The optimized design was prototyped using 3D printing with polymeric materials.

Results. The optimization process significantly reduced stress in the leaflet apparatus and improved its functional characteristics. The algorithm's performance showed that optimal parameter improvements occurred by the 42nd and 58th generations, after which the evolution of results stabilized. The final model demonstrated a moderate opening area (66% of the maximum, 2.7 cm²), minimal closing area (1%), maximum stress of 0.89 MPa, and no significant deformations. However, the 3D prototyping process revealed technical challenges, including defects caused by support structures during printing.

Conclusion. The developed automatic optimization algorithm for the leaflet apparatus of heart valve prostheses has proven effective in enhancing mechanical stability and hydrodynamic efficiency. This approach significantly reduces design time and minimizes subjective engineering decisions. However, the identified prototyping challenges necessitate further refinement, including alternative manufacturing methods. Future research will focus on improving material biocompatibility and experimental validation of the optimized models.

Keywords:

automatic optimization; heart valve prosthesis; genetic algorithm; finite element method; numerical modeling; 3D prototyping; mechanical stress; hydrodynamic efficiency; biomechanical stability; parametric modeling.

Funding:

this work was carried out within the framework of the fundamental topic No. 0419-2022-0001 "Molecular, cellular and biomechanical mechanisms of the pathogenesis of cardiovascular diseases in the development of new methods of treatment of cardiovascular diseases based on personalized pharmacotherapy, the implementation of minimally invasive medical devices, biomaterials and tissue-engineered grafts".

For citation:

Ovcharenko E.A., Onishchenko P.S., Kostyunin A.E., Glushkova T.V., Akentyeva T.N., Borisova N.N., Fokeeva M.P., Klyshnikov K.Yu. Automatic optimization of heart valve prosthesis – a genetic algorithm-based approach. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2025;40(2):191–200. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2025-40-2-191-200>

Введение

Биопротезирование клапанов остается одним из ключевых методов лечения пациентов с пороками сердца. За 2021 г. в Российской Федерации проведено более 2 000 подобных операций, что подчеркивает масштабы использования таких изделий в клинической практике [1]. Однако, несмотря на прогресс в разработке и внедрении материалов для их производства, риск осложнений, связанных с дисфункцией запирающих элементов – створок, остается высоким [2]. По данным исследований, через 10–15 лет после имплантации биопротезов до половины пациентов сталкиваются с дисфункцией створчатого аппарата, обусловленной накоплением кальциевых конгломератов и/или механической деградацией тканей [3, 4]. Данные эффекты приводят к необходимости проведения травматичной и высокорисковой процедуры хирургического репротезирования несостоятельного устройства [5]. Одним из ключевых факторов, которые определяют развитие дисфункций, являются механические напряжения в материале, накапливающиеся в результате длительных циклических нагрузок [6]. Поэтому важным подходом к оптимизации протезов является снижение напряжений за счет изменения геометрии створчатого аппарата, благодаря чему достигается прикладная клиническая цель – повышение свободы от дисфункции.

Существующие методы оптимизации геометрических параметров биопротезов характеризуются высокой трудоемкостью, особенно в случаях, когда процесс разработки основывается на ручных подходах. Инженер-проектировщик создает форму створки итеративно: формирует исходную модель, прототипирует, исследует в стендовых условиях, после чего дорабатывает модель [7]. При этом таких последовательностей может быть несколько (2–5). Такой подход носит чрезвычайно субъективный характер, основанный на личном опыте инженера, и он не всегда способен привести к оптимальному решению. Кроме того, такие методы длительны по времени и трудозатратны.

Кардинальной смены идеи ручного проектирования створчатого аппарата протеза удалось достичь с более широким применением численного моделирования и полупараметрических алгоритмов, которые демонстрируют значительный потенциал в улучшении механических характеристик клапанов. Подход позволяет создавать значительный набор геометрий створки (100–10 000), оценивать их численно методами конечных элементов (МКЭ, FEA) или мультифизического моделирования (FSI) и относительно быстро принимать решение об оптимальности геометрии, чтобы в дальнейшем прототипировать только успешные варианты [8–10]. Разработка и внедрение алгоритмов, способных объединить технологии автоматического проектирования, численного моделирования и направленной оптимизации, открывают новые горизонты в создании клапанных протезов.

Настоящая работа демонстрирует один из вариантов такого подхода, который является более продвинутым по сравнению с описанными в литературе [8–10]. Мы используем направленную оптимизацию благодаря применению генетического алгоритма NSGA II [11]. Более того, наш вариант рассматривает оптимизацию не только напряжения в створчатом аппарате, но и ряда его функциональных характеристик – интегральной производительности протеза, чего не показано в аналогичных работах.

Материал и методы

В настоящей работе авторы фокусировались на оптимизации створчатого аппарата протеза клапана аорты с наружным диаметром 25 мм. Такой выбор обусловлен большей востребованностью подобных устройств в клинической практике. Таким образом, аортальная позиция представляется нам более сложным и перспективным случаем для расчета и оптимизации.

Оптимизация

Разработка и исследование алгоритма автоматической оптимизации створчатого аппарата протезного клапана сердца основывались на интеграции методов параметрического моделирования, численного анализа и применения генетического алгоритма. Представленный подход предусматривал последовательное выполнение этапов генерации геометрии, численного анализа функциональных характеристик протеза с использованием МКЭ и оптимизации, что позволило обеспечить направленный поиск решений в пространстве признаков.

1. Генерацию трехмерной модели створчатого аппарата осуществляли с помощью программного обеспечения, использующего язык программирования Python и инструменты средств автоматизированного проектирования (САПР). Разработанная программа позволяла автоматически создавать геометрические конфигурации клапанов, варьируя ключевые параметры, такие как длина прямого участка створки (Lstr), диаметр (DIA) и высота (HGT) протеза, толщина материала (ТНК), угол отклонения свободного края створки (ANG), кривизна поверхности (CVT), размер центрального отверстия (LAS), а также сектор и конфигурация створок (SEC) (рис. 1). Для формирования сетки использовались STL-подобные элементы треугольной структуры, что обеспечивало высокую точность воссоздания сложной геометрии створок.

2. Численный анализ биомеханики протеза, направленный на исследование функциональных характеристик, проводили с использованием программного комплекса Abaqus/CAE (Dassault Systemes, Франция). Для моделирования использовали оболочечную структуру, состоящую из элементов S3, что позволило детализировать поведение материала под воздействием нагрузок (рис. 2А). В качестве материала модели был выбран полимер с характеристиками, соответствующими резиноподобному силикону FormLabs 50А, из которого в дальнейшем будет получен прототип, со следующими характеристиками: модуль упругости 2,22 МПа, коэффициент Пуассона 0,495. В ходе моделирования анализировали две ключевые фазы работы клапана: открытие и закрытие, которые формировали за счет придания давления к приточной и выводной зонам с амплитудами, согласно литературным данным [12]. Целевыми показателями – количественными характеристиками, которые оценивали при моделировании для каждой модели, выступали: площадь открытия и закрытия створок, уровень механических напряжений, а также степень их искажения под действием нагрузок (рис. 2Б).

3. Полученные количественные характеристики – целевые показатели передавали в генетический алгоритм NSGA-II, реализованный в программной библиотеке Python PyMoo. На первом шаге алгоритм NSGA II формировал перечень из 20 геометрий, которые передавали в расчет МКЭ. Полученные результаты моделирования

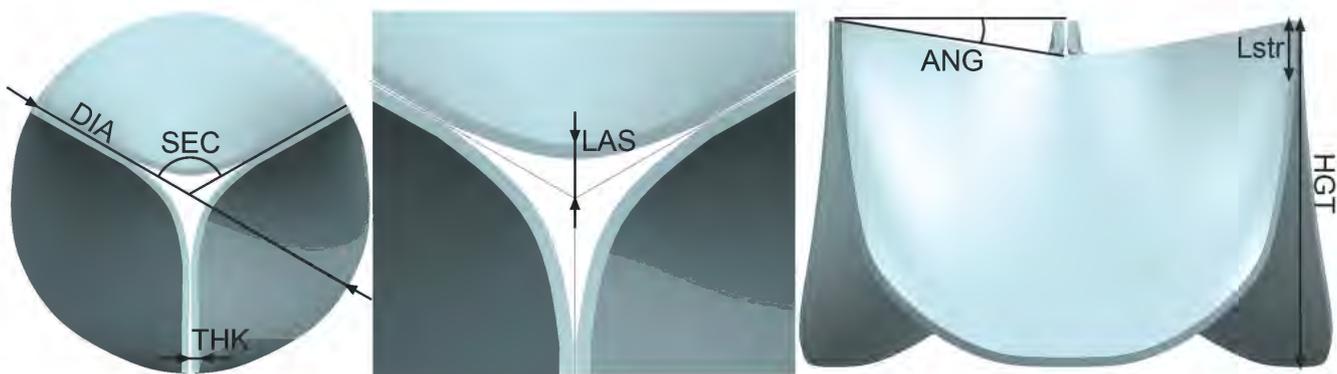


Рисунок 1. Визуализация основных геометрических параметров, которые использованы при генерации модели створки
 Figure 1. Visualization of the main geometric parameters used to generate the sash model

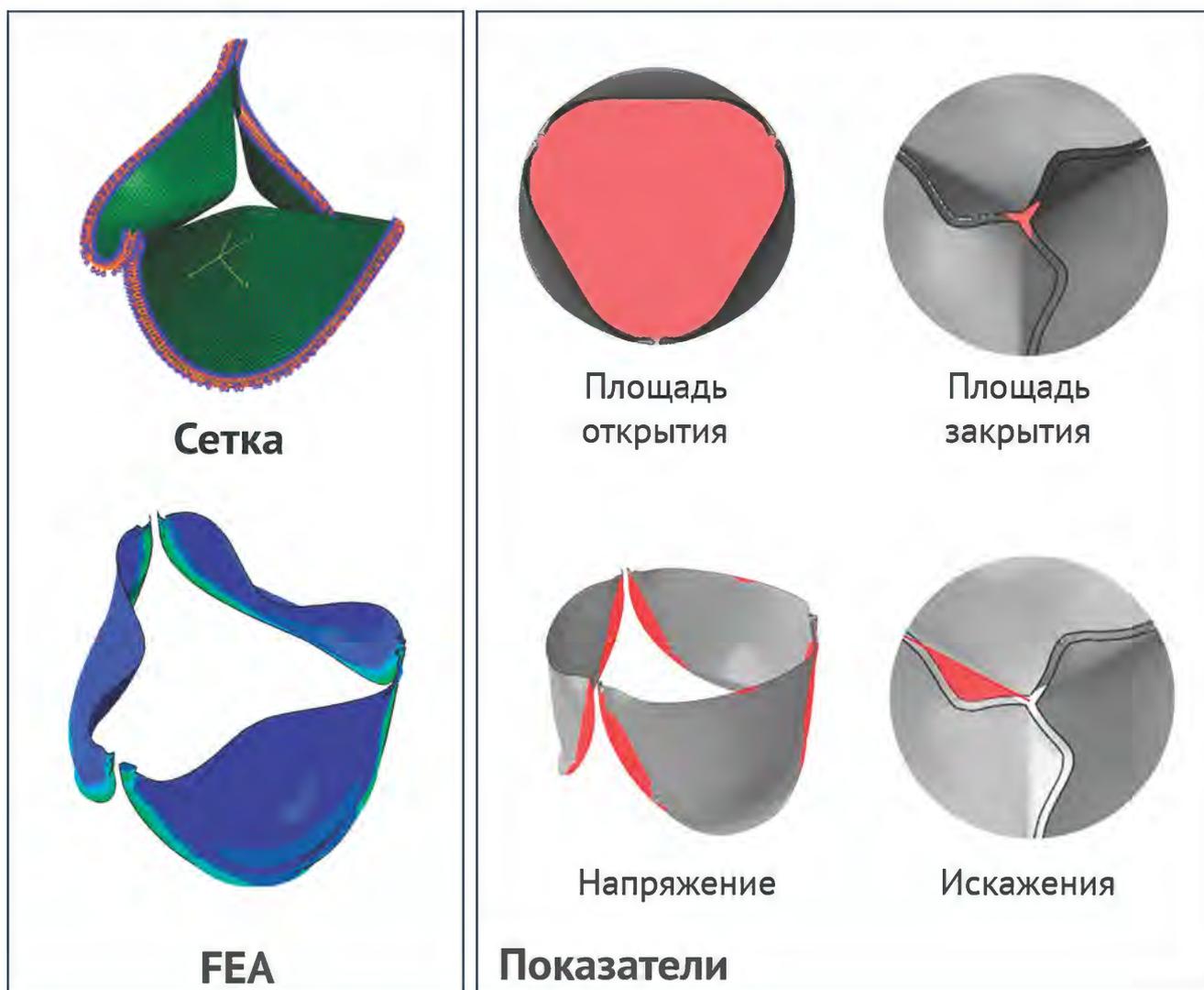


Рисунок 2. Визуализация работ по численному моделированию: А – постановка метода конечных элементов; Б – количественные показатели, получаемые в результате численного моделирования
 Figure 2. Visualization of numerical modeling work: A – formulation of the finite element method; B – quantitative indicators obtained as a result of numerical modeling

(целевые показатели) ранжировали количественно, выбирали 10 геометрий створки, обеспечивших наилучшие характеристики. На основе геометрических характеристик данных геометрий путем методов мутации и кроссингвера (инструменты NSGA II) формировали второе поколение створок, представленное 10 лучшими геоме-

триями и 10 новыми. Данное второе поколение геометрий оценивали численно МКЭ, ранжировали их целевые показатели, отбирали 10 наилучших и повторяли последовательность, формируя третье, четвертое и т. д. поколения. Всего в исследовании было сформировано 250 поколений геометрий.

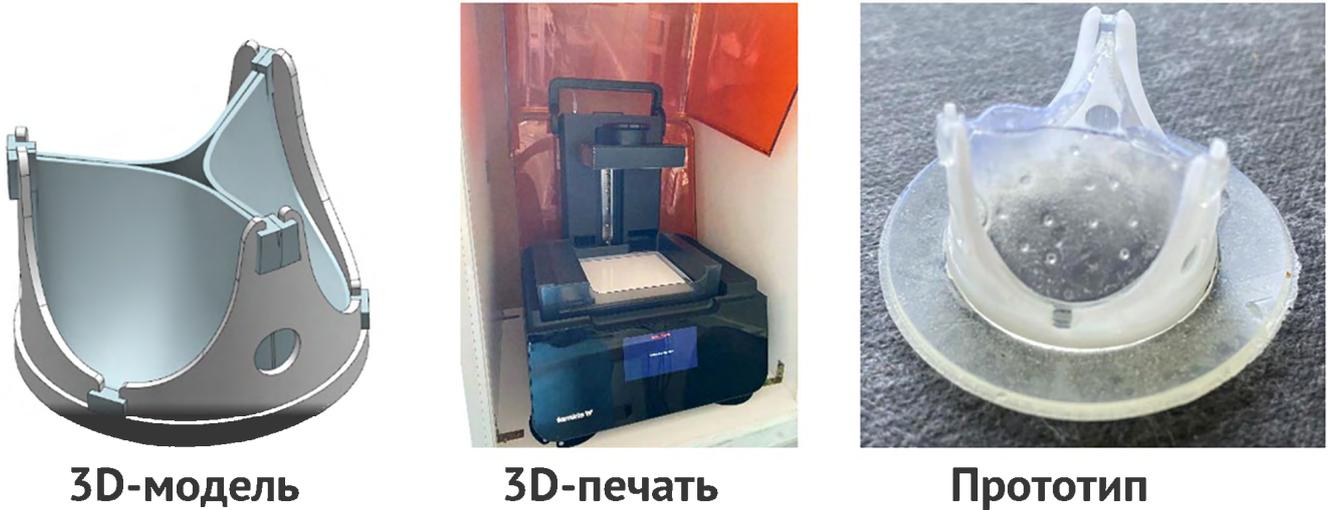


Рисунок 3. Упрощенная последовательность прототипирования опытного образца оптимальной геометрии створки, полученной в результате работы алгоритма
Figure 3. Simplified sequence of prototyping a test sample of the optimal sash geometry obtained as a result of the algorithm

Сам процесс оптимизации предполагает улучшение отдельных целевых показателей, однако оптимальное решение должно обладать наилучшими характеристиками по всем четырем характеристикам по результатам МКЭ: площади открытия и закрытия створок, уровню механических напряжений, а также по степени их искажения под действием нагрузок. NSGA II позволяет автоматически определять такую сбалансированную геометрию, что и было выполнено в настоящем проекте – выбирали одну единственную форму створчатого аппарата для дальнейшего прототипирования.

Прототипирование

Полученное в результате работы оптимизатора сбалансированное решение прототипировали с использованием 3D-принтера Form3 (FormLabs, США). В качестве материала для створки использовали резиноподобную смолу FormLabs 50A, которую применяли при расчете. Опорный каркас (второй основной компонент прототипа) формировали из фотополимерной смолы высокой прочности Tough 2000 также с использованием технологии 3D-печати. Объединение обоих компонентов осуществляли, склеивая створчатый аппарат и каркас с помощью фотополимерной смолы FormLabs 50A и последующего фотоотверждения (рис. 3).

Результаты

Оптимизация

В ходе работы алгоритма оптимизации показано, что все целевые показатели эффективно сходились к наилучшим результатам достаточно быстро. Так, максимизация площади открытия произошла к 42-му поколению и не эволюционировала далее. Аналогичный эффект наблюдали и для степени искажения при закрытом состоянии протеза – после 58-го поколения, данный показатель не изменялся. Другие параметры (площадь закрытия и напряжение в створке) сходились позже. После остановки решения задачи оптимизации алгоритм рекомендовал взвешенное решение расчета – сбалансированное решение, одновременно удовлетворяющее всем целевым

показателям в комплексе (компромиссная геометрия). Процесс выбора реализован автоматически и может быть представлен в пространстве признаков как график trade-off (график «торга»).

Данная модель демонстрирует умеренные показатели площади открытия 66% от максимальной (2,7 см²); минимальную площадь закрытия, равную 1%; максимум напряжения в створке 0,89 МПа; отсутствие искажения в створке (рис. 4).

Прототипирование

Данная модель створчатого аппарата была прототипирована из предполагаемого полимерного материала FormLabs 50A методом 3D-печати. Однако в ходе создания прототипа возникли технологические трудности. Так, вследствие значительного уклона створки потребовалось использовать поддержки печати, что сказалось на итоговом качестве образца. Даже после тщательного удаления поддержек на внутренней поверхности в областях контакте остались выпячивания, которые, безусловно, вносят коррективы в биомеханику створки (рис. 5).

Обсуждение

При обсуждении результатов настоящего исследования стоит рассмотреть идею автоматической оптимизации и быстрого прототипирования в комбинации, а также обе данные идеи отдельно.

Единая концепция

Применение разработанного алгоритма в процессе проектирования створчатого аппарата клапана сердца позволяет значительно повысить эффективность разработки, упростить создание створки за счет автоматизации процесса и потенциально достичь лучших результатов, чем способен человек-инженер. Сходимость показателей оптимизации, таких как площадь открытия створок, уровень механических напряжений и степень их искажения, была достигнута на относительно ранних поколениях алгоритма (42-е и 58-е поколения соответственно), что свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода. Кроме того, создание параметризованной моде-

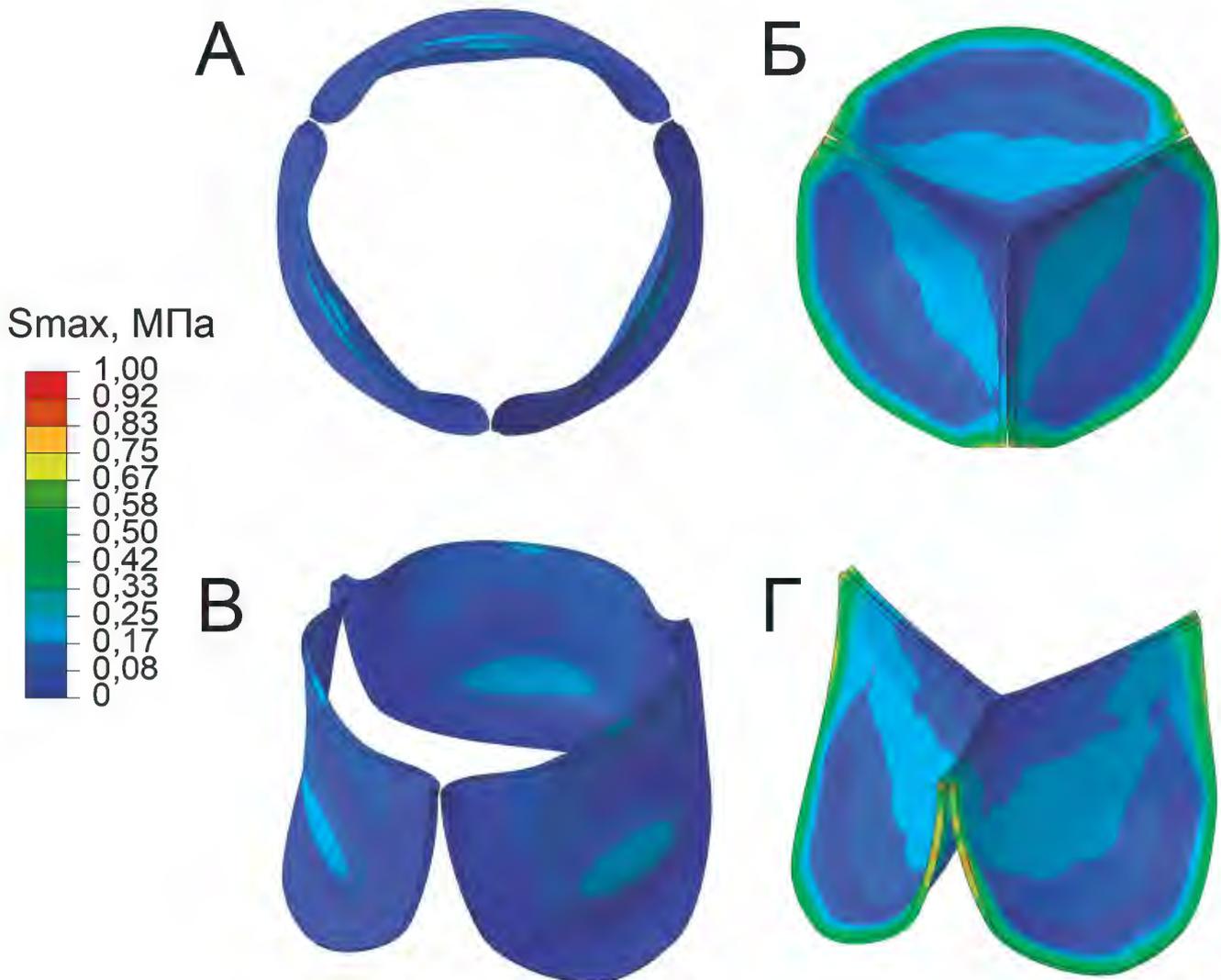


Рисунок 4. Результат численного моделирования оптимальной геометрии створки – распределение напряжения (S_{max}) и качественное представление полностью открытого и закрытого состояний

Figure 4. Result of numerical modeling of the optimal sash geometry – stress distribution (S_{max}) and qualitative representation of the fully open and closed states

ли на основе САПР, дальнейшее численное моделирование с использованием конечно-элементного анализа [13] и автоматическая оптимизация на основе математических алгоритмов обеспечивают комплексный подход к улучшению характеристик протезов клапанов сердца. При этом сочетание такой последовательности с аддитивными технологиями быстро прототипирования позволяет оперативно валидировать качество алгоритмов оптимизации, оценивать взаимосвязь и эффективность работы всех блоков. Автоматизация процесса проектирования, дополненная возможностями 3D-прототипирования, делает возможным быстрый переход от теоретических моделей к физическим изделиям. Прототипы, изготовленные с использованием современных полимерных материалов, дают возможность не только подтвердить точность расчетов, но и выявить дополнительные аспекты, требующие доработки. Таким образом, представленный подход, основанный на сочетании методов численного анализа и алгоритмов оптимизации, является перспективным направлением в разработке новых поколений медицинских изделий для сердечно-сосудистой хирургии.

Сравнивая полученные результаты с данными преды-

дущих исследований [8–10], можно отметить, что в ряде работ использовались методы численного моделирования без применения алгоритмов оптимизации. Например, Ф. Хи и соавт. [8] использовали метод сочетанного моделирования взаимодействия жидкости и конструкции (FSI), который позволял оценивать влияние различных геометрий клапанных протезов, но не включал процесс направленной оптимизации. Наше исследование демонстрирует более интегрированный подход, позволяющий не только оценивать, но и автоматически находить сбалансированную форму створчатого аппарата, минимизируя механические напряжения и повышая функциональность клапана. Именно способность к многофакторной оптимизации позволяет учитывать сразу несколько целевых показателей, в отличие от описанных подходов, ориентированных на улучшение одного параметра.

Кроме того, мы впервые демонстрируем комплексный подход. Существующие исследования [8–10] ограничиваются только численным моделированием, без оценки того, насколько полученные модели состоятельны технологически. Такие виртуальные результаты, безусловно, ценны, так как демонстрируют состоятельность алгорит-



Рисунок 5. Фотографии прототипа протеза, напечатанного на 3D-принтере, укрупненный вид демонстрирует наличие дефектов от поддержек на створчатом аппарате
 Figure 5. Photographs of a 3D-printed prosthesis prototype; a close-up view demonstrates the presence of defects from the supports on the valve apparatus

ма и численную эффективность оптимизируемой створки. Однако логичным представляется сделать следующий шаг – оценить возможность изготовления данного створчатого аппарата, валидировать результаты алгоритма, чего не делают в схожих работах.

В целом, исследование подтвердило высокую эффективность такого сочетания – автоматической оптимизации и 3D-печати. Автономная работа оптимизатора, с минимальным участием исследователя – только на этапе задания базовых ограничений вариативности геометрических параметров створки, автоматическая рекомендация взвешенного решения (компромиссной геометрии) и возможность напечатать створку на 3D-принтере – все это удалось осуществить в работе.

Оптимизация

Метод, основанный на сочетании генетических алгоритмов и конечно-элементного анализа, является перспективным подходом к поиску оптимальных параметров геометрии створок протезов клапанов сердца. Наиболее важная особенность представленного алгоритма – ис-

пользование математического алгоритма (оптимизатора NSGA-II), который направляет процесс формирования наилучшего решения [14–16]. Такой подход существенно ускоряет работы, так как вместо случайного перебора всех возможных комбинаций параметров геометрии используется квази-эволюционный подход, отбирающий лучшие модели для дальнейшей передачи из «генов» в следующие поколения.

Одним из ключевых преимуществ генетического алгоритма NSGA-II является его способность к многофакторной оптимизации. В отличие от традиционных методов, которые часто фокусируются на улучшении одного параметра, NSGA-II позволяет одновременно учитывать несколько целевых показателей, таких как площадь открытия и закрытия створок, уровень механических напряжений и степень их деформации. Это особенно важно в контексте разработки протезов клапанов сердца, для которых необходимо достичь баланса между гидродинамической эффективностью и механической прочностью (долговечностью).

Однако, несмотря на успехи, достигнутые в ходе опти-

мизации, стоит отметить, что использование NSGA-II не является единственным возможным вариантом. В литературе описаны и другие алгоритмы, такие как MOALO (Multi-Objective Ant Lion Optimizer) и MODA (Multi-Objective Dragonfly Algorithm), которые также демонстрируют высокую эффективность в задачах многоцелевой оптимизации [17]. В будущих исследованиях стоит рассмотреть возможность применения этих алгоритмов для сравнения их эффективности с NSGA-II в контексте оптимизации геометрии сердечных клапанов.

Кроме того, важно учитывать, что процесс оптимизации не ограничивается только выбором алгоритма. Важным аспектом является также настройка гиперпараметров алгоритма, таких как размер популяции, вероятность мутации и кроссинговера. В данном исследовании было сформировано 250 поколений геометрий, что позволило достичь сходимости по всем целевым показателям. Однако для более сложных задач, например, при оптимизации створки протеза для других позиций (митральной, трикуспидальной), может потребоваться увеличение числа поколений или более тонкая настройка параметров алгоритма.

Прототипирование

К сожалению, технологические сложности прототипирования взвешенного решения, приведшие к возникновению дефектов створки, не позволяют в текущем виде использовать технологию 3D-печати как полностью самостоятельный подход к валидации результатов работы предложенного оптимизатора. Очевидно, что показанные на рисунке 5 технологические выпячивания изменяют биомеханику и, следовательно, показатели работы створки, которые «предсказаны» оптимизатором. Поэтому высока вероятность, что результаты гидродинамической оценки, то есть валидации, будут значительно отличаться от расчетных.

Одной из основных проблем, с которой мы столкнулись в настоящем исследовании, стало использование поддержек при 3D-печати. Эти структуры необходимы для обеспечения стабильности печати сложных геометрий, но их удаление после завершения процесса может привести к повреждению поверхности створок. В данном случае даже после тщательного удаления поддержек на внутренней поверхности остались выпячивания, которые могут негативно сказаться на функциональности прототипа.

Для решения этой проблемы можно рассмотреть альтернативные методы производства, такие как послойное нанесение полимера погружным способом или напылением. Эти методы позволяют создавать более гладкие поверхности и минимизировать количество дефектов, связанных с использованием поддержек. Например, в работе L.R. Masheane и соавт. (2024) описывается метод послойного нанесения полиуретана, который позволяет достичь высокой точности воспроизведения сложных геометрических форм без необходимости использования поддержек [18]. Кроме того, для валидации результатов исследования можно использовать более традиционные материалы, такие как ксеноперикард, который широко применяется в производстве биопротезов клапанов сердца. Этот материал обладает высокой биосовместимостью и уже хорошо изучен в контексте изготовления сердечных клапанов [19]. Однако для использования ксеноперикарда в рамках данного исследования необходимо будет

адаптировать алгоритм оптимизации под характеристики этого материала [20], что может потребовать дополнительных вычислительных ресурсов и времени. Еще одним перспективным направлением является использование комбинированных методов производства, например, сочетание 3D-печати с последующей обработкой поверхности с помощью лазерной абляции или механической полировки. Это позволит устранить дефекты, вызванные поддержками, и улучшить качество поверхности створок.

Таким образом, несмотря на выявленные технологические сложности, прототипирование остается важным этапом в процессе разработки и валидации оптимизированных моделей сердечных клапанов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск альтернативных методов производства, которые позволят минимизировать количество дефектов и повысить точность воспроизведения оптимизированных геометрий.

Ограничения

Настоящее исследование демонстрирует пример применения комплексного подхода к оптимизации протеза клапана сердца – цифрового алгоритма оптимизации и 3D-печати «идеального» варианта прототипа. Именно поэтому в работе представлен только один типоразмер протеза – 25 мм только для одной клапанной позиции – аортальной, что, безусловно, не отражает весь спектр сложности разработки линейки протезов. Мы предполагаем, что для текущей цели – отработки взаимосвязи всех элементов данной последовательности, такой ограниченный выбор достаточен. Однако, безусловно, расширение применимости алгоритма на другие размеры и клапаные позиции позволит продемонстрировать особенности алгоритма более полно.

Выявленные технологические трудности при 3D-печати прототипов ограничивают точность воспроизведения оптимизированной геометрии. Формирование опорных структур в процессе аддитивного производства привело к появлению артефактов на поверхности створок, что указывает на необходимость исследования альтернативных методов изготовления – например, технологии литья или послойного напыления полимеров, которые позволяют снизить количество поверхностных дефектов.

Таким образом, несмотря на положительные результаты оптимизации, дальнейшая работа должна быть направлена на учет указанных ограничений, что даст возможность повысить клиническую применимость разработанного подхода и его интеграцию в процесс производства и тестирования биопротезов клапанов сердца.

Заключение

Разработанный алгоритм автоматической оптимизации створчатого аппарата клапана сердца продемонстрировал эффективность в повышении механической устойчивости и гидродинамической эффективности конструкции. Методика позволяет значительно сократить время проектирования и уменьшить субъективность инженерных решений. Тем не менее, выявленные технологические сложности прототипирования требуют дальнейшей доработки, включая альтернативные методы производства. Будущие исследования будут направлены на улучшение биосовместимости материалов и экспериментальную валидацию оптимизированных моделей.

Литература / References

1. Бокерия Л.А., Милюевская Е.Б., Прынишников В.В., Юрлов И.А. Сердечно-сосудистая хирургия – 2023. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения. М.: ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России; 2024:368.
2. Бокерия Л.А., Милюевская Е.Б., Прынишников В.В., Юрлов И.А. Cardiovascular surgery – 2023. Diseases and congenital abnormalities of the circulatory system. Moscow: A.N. Bakulev National medical research center for cardiovascular surgery of the Russian Ministry of Health; 2024:368. (In Russ.).
3. Кудрявцева Ю.А. Биологические протезы клапана сердца. От идеи до клинического применения. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2015;(4):6–16. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2015-4-6-16>
4. Kudryavtseva Yu.A. Biological prosthetic heart valves. From idea to clinical application. *Kompleksnyye problemy serdechno-sosudistykh zabolevaniy*. 2015;(4):6–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2015-4-6-16>
5. Халивопуло И.К., Евтушенко А.В., Шабалдин А.В., Трошкинев Н.М., Стасев А.Н., Кокорин С.Г. и др. Сравнительный анализ результатов хирургического лечения дисфункции биологических протезов митрального клапана классическим методом и методом «протез-в-протез» с использованием propensity score matching. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2023;12(2):57–69. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2023-12-2-57-69>
6. Khalivopulo I.K., Evtushenko A.V., Shabalidin A.V., Troshkinev N.M., Stasev A.N., Kokorin S.G. et al. Comparative analysis of the results of surgical treatment of dysfunction of biological mitral valve prostheses by the classical method and the “prosthesis-to-prosthesis” method using propensity score matching. *Kompleksnyye problemy serdechno-sosudistykh zabolevaniy*. 2023;12(2):57–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2023-12-2-57-69>
7. Барбараш Л.С., Борисов В.В., Рутковская Н.В., Бурого А.Ю., Одаренко Ю.Н., Стасев А.Н. и др. Клинико-морфологическое исследование причин дисфункций эпоксиобработанных ксеноаортальных биопротезов в митральной позиции. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2014;7(4):84–86. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/kardiologiya-i-serdechno-sosudistaya-khirurgiya/2014/4/031996-63852014413> (22.05.2025).
8. Barbarash L.S., Borisov V.V., Rutkovskaya N.V., Burago A.Y., Odarenko Yu.N., Stasev A.N. et al. Clinical and morphological study of the causes of dysfunctions of epoxy-treated xenoaortic bioprostheses in the mitral position. *Cardiology and cardiovascular surgery*. 2014;7(4):84–86. (In Russ.). URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/kardiologiya-i-serdechno-sosudistaya-khirurgiya/2014/4/031996-63852014413> (22.05.2025).
9. Zhuravleva I.Y., Nushtaev D.V., Timchenko T.V., Trebushat D.V., Mayorov A.P., Zheleznev S.I. et al. The concept of a device for the redo transcatheter mitral valve implantation. *Sovrem. Tehnol. v Med.* 2017;9(3):7. <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.3.01>
10. Fazzari F., Baggiano A., Fusini L., Ghulam Ali S., Gripari P., Junod D. et al. Early biological valve failure: structural valve degeneration, thrombosis, or endocarditis? *J. Clin. Med.* 2023;12(17):5740. <https://doi.org/10.3390/jcm12175740>
11. Фадеев А.А. Конструктивные формы и функциональные свойства протезов клапанов сердца. *Анналы хирургии*. 2013;(3):9–18. URL: https://rusannsurg.com/catalog/detail.php?SECTION_ID=677&ID=18093 (22.05.2025).
12. Fadeev A.A. Structural forms and functional properties of heart valve prostheses. *Annals of surgery*. 2013;(3):9–18. (In Russ.). URL: https://rusannsurg.com/catalog/detail.php?SECTION_ID=677&ID=18093 (22.05.2025).
13. Xu F., Morganti S., Zakerzadeh R., Kamensky D., Auricchio F., Reali A. et al. A framework for designing patient-specific bioprosthetic heart valves using immersogeometric fluid-structure interaction analysis. *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.* 2018;34(4):e2938. <https://doi.org/10.1002/cnm.2938>
14. Li K., Sun W. Simulated transcatheter aortic valve deformation: A parametric study on the impact of leaflet geometry on valve peak stress. *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.* 2017;33(3):e02814. <https://doi.org/10.1002/cnm.2814>
15. Travaglio S., Murdock K., Tran A., Martin C., Liang L., Wang Y. et al. computational optimization study of transcatheter aortic valve leaflet design using porcine and bovine leaflets. *J. Biomech. Eng.* 2020;142(1):011007. <https://doi.org/10.1115/1.4044244>
16. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2002;6(2):182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
17. Hall J.E. Guyton and hall: Textbook of medical physiology. 12th ed., Grulio R., ed. Philadelphia: Elsevier Saunders (2011). [Electronic resource] URL: https://archive.org/stream/guytonandhalltextbookofmedicalphysiology12thed_202004/Guyton-and-Hall-Textbook-of-Medical-Physiology-12th-Ed_djvu.txt (22.05.2025).
18. Смирнов А.А., Овсепьян А.Л., Квиндт П.А., Палеев Ф.Н., Борисова Е.В., Яковлев Е.В. Конечно-элементный анализ при моделировании структур сердца и аорты. *Альманах клинической медицины*. 2021;49(6):375–384.
19. Smirnov A.A., Ovsepyan A.L., Kvindt P.A., Paleev F.N., Borisova E.V., Yakovlev E.V. Finite element analysis in modeling the structures of the heart and aorta. *Almanac of Clinical Medicine*. 2021;49(6):375–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-043>
20. Rego M.F., Pinto J.C.E.M., Cota L.P., Souza M.J.F. A mathematical formulation and an NSGA-II algorithm for minimizing the makespan and energy cost under time-of-use electricity price in an unrelated parallel machine scheduling. *Peer. J. Comput. Sci.* 2022;8:e844. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.844>
21. Zhang J., Yao Y., Sun W., Tang L., Li X., Lin H. Application of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II in Multi-objective Optimization of Orally Disintegrating Tablet Formulation. *AAPS Pharm. Sci. Tech.* 2022;23(6):224. <https://doi.org/10.1208/s12249-022-02379-6>
22. Cattelan L., Fortino V. Improved NSGA-II algorithms for multi-objective biomarker discovery. *Bioinformatics*. 2022;38(Supplement_2):ii20–ii26. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btac463>
23. Joshi M., Ghadai R.K., Madhu S., Kalita K., Gao X.-Z. Comparison of NSGA-II, MOALO and MODA for Multi-Objective Optimization of Micro-Machining Processes. *Materials (Basel)*. 2021;14(17):5109. <https://doi.org/10.3390/ma14175109>
24. Masheane L.R., du Preez W., Combrinck J. Evaluation of the impact of stress distribution on polyurethane trileaflet heart valve leaflets in the open configuration by employing numerical simulation. *Math. Comput. Appl.* 2024;29(4):64. <https://doi.org/10.3390/mca29040064>
25. Майоров А.П., Тарасов В.М., Гончаренко А.М., Глушкова Т.В., Бурого А.Ю. Лазерный раскрой элементов кардиоваскулярных протезов. *Альманах клинической медицины*. 2008;17(2):115.
26. Mayorov A.P., Tarasov V.M., Goncharenko A.M., Glushkova T.V., Burago A.Yu. Laser cutting of cardiovascular prosthesis elements. *Almanac of Clinical Medicine*. 2008;17(2):115. (In Russ.).
27. Онищенко П.С., Глушкова Т.В., Костюнин А.Е., Резвова М.А., Акентьева Т.Н., Барбараш Л.С. Компьютерные модели биоматериалов, применяемых для изготовления створчатого аппарата протезов клапанов сердца. *Материаловедение*. 2023;(7):30–39. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-0-7-30-39>
28. Onishchenko P.S., Glushkova T.V., Kostyunin A.E., Rezvova M.A., Akentyeva T.N., Barbarash L.S. Computer models of biomaterials used for the manufacture of the valve apparatus of heart valve prostheses. *Materials Science*. 2023;(7):30–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2023-0-7-30-39>

Информация о вкладе авторов

Овчаренко Е.А. – получение и интерпретация данных исследования, написание статьи, корректура статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание.

Онищенко П.С. – получение и интерпретация данных исследования, написание статьи, полная ответственность за содержание.

Костюнин А.Е., Глушкова Т.В., Акентьева Т.Н., Борисова Н.Н., Фокеева М.П., Фокеева М.П., Клышников К.Ю. – получение и интерпретация данных исследования, написание статьи, корректура статьи, полная ответственность за содержание.

Information on author contributions

Ovcharenko E.A. – data acquisition and interpretation, article writing, article revision, approval of the final version for publication, full responsibility for content.

Onishchenko P.S. – data acquisition and interpretation, article writing, article revision, full responsibility for content.

Kostyunin A.E., Glushkova T.V., Akentyeva T.N., Borisova N.N., Fokeeva M.P., Klyshnikov K.Yu. – data acquisition and interpretation, article writing, article revision, full responsibility for content.



Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах

Овчаренко Евгений Андреевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-7477-3979>.

E-mail: ovchea@kemcardio.ru.

Онищенко Павел Сергеевич, младший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-2404-2873>.

E-mail: onisps@kemcardio.ru.

Костюнин Александр Евгеньевич, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6099-0315>.

E-mail: kostae@kemcardio.ru.

Глушкова Татьяна Владимировна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-4890-0393>.

E-mail: glushtv@kemcardio.ru.

Акентьева Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-0033-9376>.

E-mail: akentn@kemcardio.ru.

Борисова Наталья Николаевна, младший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0009-0004-1138-9653>.

E-mail: borinn@kemcardio.ru.

Фокеева Марина Павловна, младший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0009-0008-7392-2344>.

E-mail: fokemp@kemcardio.ru.

Клышников Кирилл Юрьевич, канд. мед. наук, старший научный сотрудник, лаборатория новых биоматериалов, отдел экспериментальной медицины, НИИ КПССЗ, Кемерово, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-3211-1250>.

E-mail: klyshku@kemcardio.ru.

 **Клышников Кирилл Юрьевич**, e-mail: klyshku@kemcardio.ru.

Поступила 04.03.2025;
рецензия получена 22.04.2025;
принята к публикации 23.04.2025.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors

Evgeny A. Ovcharenko, Cand. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-7477-3979>.

E-mail: ovchea@kemcardio.ru.

Pavel S. Onishchenko, Junior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-2404-2873>.

E-mail: onisps@kemcardio.ru.

Alexander E. Kostyunin, PhD, Senior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-6099-0315>.

E-mail: kostae@kemcardio.ru.

Tatyana V. Glushkova, PhD, Senior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-4890-0393>.

E-mail: glushtv@kemcardio.ru.

Tatyana N. Akentyeva, Junior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-0033-9376>.

E-mail: akentn@kemcardio.ru.

Natalia N. Borisova, Junior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0009-0004-1138-9653>.

E-mail: borinn@kemcardio.ru.

Marina P. Fokeeva, Junior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0009-0008-7392-2344>.

E-mail: fokemp@kemcardio.ru.

Kirill Yu. Klyshnikov, PhD, Senior Research Scientist, Laboratory of New Biomaterials, Department of Experimental Medicine, NII KPSSZ, Kemerovo, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-3211-1250>.

E-mail: klyshku@kemcardio.ru.

 **Kirill Yu. Klyshnikov**, e-mail: klyshku@kemcardio.ru.

Received 04.03.2025;
review received 22.04.2025;
accepted for publication 23.04.2025.