

На правах рукописи



СУДАКОВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ РАННЕЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ РЕБЕНКА
С ВРОЖДЕННЫМ ПОРОКОМ СЕРДЦА**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2025

Работа выполнена на кафедре «Биомедицинская техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»).

Научный руководитель *Фролов Сергей Владимирович*,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Официальные оппоненты: *Крамм Михаил Николаевич*,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ радиотехники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Тычков Александр Юрьевич,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и радиоэлектронные системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Защита состоится **20 июня 2025 г. в 14 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета **24.2.375.03** в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радио-технический университет им. В. Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ») по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте www.rstgu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ФГБОУ ВО «РГРТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.375.03.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03,
доктор технических наук, доцент



Г. В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Врожденные пороки сердца являются самыми распространенными из всех пороков развития. Из них наиболее часто встречающимся является дефект межжелудочковой перегородки (ДМЖП). В процентном соотношении частота их выявления достигает 42% от всех пороков.

Создание модели гемодинамики ребенка с ДМЖП, способной прогнозировать изменение состояния с возрастом, обусловлено необходимостью улучшения качества медицинской помощи детям с этим серьезным заболеванием. ДМЖП характеризуется наличием отверстия между желудочками сердца, что приводит к смешиванию артериальной и венозной крови, перегрузке левого желудочка и легочных сосудов, а также риску развития сердечной недостаточности и другим осложнениям. Прогнозирование изменений гемодинамического статуса с учетом возрастных особенностей позволит своевременно корректировать лечебную тактику, предотвращая развитие необратимых патологических состояний. Кроме того, такая модель поможет определить оптимальные сроки хирургического вмешательства, минимизировать риски для здоровья ребенка и повысить шансы на успешное выздоровление.

Для обеспечения эффективного использования модели в клинической практике медицинскими специалистами целесообразно разработать на ее основе систему поддержки принятия врачебных решений, которая будет интегрирована в повседневную работу врача.

Таким образом, научно-технической задачей исследования является создание системы поддержки принятия врачебных решений, основанной на модели сердечно-сосудистой системы ребенка, включающей описание порока сердца, с достаточным уровнем достоверности для применения в системах диагностики заболеваний и прогнозирования состояния организма.

Степень проработанности темы исследования. Вопросы, касающиеся создания математической модели сердечно-сосудистой системы с пороком, поднимались в исследованиях В. А. Лищука, Е. В. Мостковой, Н. М. Амосова, С. С. Симакова, Ю. В. Василевского, С. И. Мухина, С. Corsini, M. Galantowicz, F. Migliavacca, G. Pennati, G. Dubini, R. Fumero, R. Pietrabissa и др. Однако ни в одном из существующих исследований математическое моделирование не применяется для диагностики и прогнозирования состояния организма ребенка.

Объектом исследования является система поддержки принятия врачебных решений, разработанная на основе математической модели пульсирующего сердца ребенка с врожденным пороком, с возможностью моделирования изменения параметров в процессе его роста и развития.

Предметом исследования в работе являются динамические модели сердечно-сосудистой системы, учитывающие изменения параметров организма пациента с возрастом, и алгоритмы, обеспечивающие определение времени возникновения критического состояния кардиологического больного.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка метода оценки состояния сердечно-сосудистой системы ребенка с пороком *in silico* в текущий момент времени и в процессе развития организма при при-

нятии врачебных решений для снижения детской смертности. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели сердечно-сосудистой системы ребенка с пороком на основании методов вычислительной гемодинамики и физиологических законов сердца.

2. Исследование наличия экспоненциальных закономерностей изменения параметров сердечно-сосудистой системы ребенка в процессе роста и развития.

3. Разработка модели экспоненциального изменения ключевых параметров сердечно-сосудистой системы ребенка в процессе его роста и развития.

4. Объединение математической модели сердечно-сосудистой системы ребенка с пороком и модели экспоненциального изменения параметров сердечно-сосудистой системы ребенка в процессе его роста и развития в многомасштабную по времени модель.

5. Проведение имитационных исследований многомасштабной по времени математической модели сердечно-сосудистой системы ребенка с пороком. Исследование параметров, состояние которых позволяет определить момент критического состояния организма.

6. Разработка метода персонализации модели гемодинамики, который позволит учесть параметры, являющиеся индивидуальными для конкретного пациента.

7. Разработка системы определения группы риска ребенка с пороком для повышения точности моделирования изменения параметров сердечно-сосудистой системы в процессе роста и развития организма.

8. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений для детей с врожденными пороками сердца, которая позволит реализовать возможности предложенной математической модели гемодинамики в практической медицине.

Научная новизна:

1. Математическая модель сердечно-сосудистой системы, основанная на совокупном применении методов вычислительной гемодинамики и физиологических законов сердца, отличающаяся тем, что в модель внесено описание врожденной патологии сердца (*соответствует п. 15 научной специальности 2.2.12*).

2. Метод расчета параметров сердечно-сосудистой системы организма ребенка, отличающийся тем, что позволяет оценивать изменения параметров в процессе роста и развития организма (*соответствует п. 2 и 15 научной специальности 2.2.12*).

3. Алгоритм прогнозирования критического состояния ребенка, отличающийся использованием многомасштабной по времени математической модели гемодинамики организма (*соответствует п. 2 научной специальности 2.2.12*).

4. Система поддержки принятия врачебных решений, разработанная на основе включения в математическую модель сердечно-сосудистой системы с врожденным пороком сердца возможности прогнозирования изменения параметров в процессе роста и развития ребенка для оценки критических состояний организма (*соответствует п. 20 научной специальности 2.2.12*).

Теоретическая значимость заключается в развитии нового подхода к моделированию сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца, параметры которого рассчитываются с учетом роста и развития организма. Модель строится в условиях многомасштабности по времени, а именно: математическая модель сердечно-сосудистой системы, основанная на методах вычислительной гемодинамики и функциональных закономерностях работы сердца – законе Франка–Старлинга, гомеометрических и гетерометрических соотношениях, – и модель изменения параметров сердечно-сосудистой системы организма, основанная на гипотезе о экспоненциальном характере изменения организма с возрастом.

Практическая значимость заключается в разработке проблемно ориентированного комплекса программ математического моделирования сердечно-сосудистой системы ребенка с дефектом межжелудочковой перегородки, позволяющей прогнозировать состояние детского организма в процессе его роста и развития, которые реализованы в виде системы поддержки принятия врачебных решений для определения возможных моментов возникновения критических состояний, несовместимых с жизнью.

Методология и методы исследования: в работе применяются методы математического моделирования, вычислительной гемодинамики, обработки экспериментальных данных, аппроксимации, визуализации результатов моделирования, системного анализа, объектно ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. 0D-мерная математическая модель сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным дефектом межжелудочковой перегородки, состоящая из совокупности 14 взаимосвязанных упругих камер.
2. Основанный на экспоненциальном законе алгоритм расчета изменений параметров организма ребенка в процессе его роста и развития с 0 до 240 месяцев.
3. Решение задачи определения времени возникновения критической ситуации, опасной для жизни ребенка.
4. Система поддержки принятия врачебных решений для определения критических состояний, возникающих в процессе роста и развития ребенка с дефектом межжелудочковой перегородки.

Соответствие специальности научных работников. Работа соответствует паспорту специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», а именно 3 пунктам: 2 – «Приборы, системы и аппаратно-программные комплексы для оценки текущего состояния, скринингового обследования, мониторинга, прогнозирования и диагностики состояния здоровья человека», 15 – «Математическое моделирование медико-биологических процессов», 20 – «Системы поддержки принятия врачебных решений и медико-технологических процессов, экспертные, информационные и управляющие системы медицинского назначения, обеспечивающие повышение качества медицинского обслуживания населения».

Степень достоверности исследования. Обоснованность и достоверность научных результатов диссертационной работы обеспечиваются корректным

применением математического аппарата, сопоставлением результатов численного эксперимента, натурных и клинических исследований.

Апробация результатов. Основные положения диссертации и отдельные ее результаты обсуждались и получили положительную реакцию на планарных заседаниях Российского национального конгресса кардиологов 2024 года, IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием для студентов, молодых ученых и специалистов «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» в 2022, 2023 и 2024 годах, научно-практической конференции студенческих научных объединений «Молодежь для устойчивого развития регионов» в 2023 году, IX Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» в 2023 году, XXXIII и XXXVII всероссийских научно-технических конференциях студентов, молодых ученых и специалистов «Биомедсистемы-2020» и «Биомедсистемы-2024», Всероссийской научной конференции «Цифровая трансформация в энергетике» в 2020 году.

Внедрение результатов исследования. Результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Биотехнические системы и технологии», нашли применение в работе медицинского центра ООО «Доступная Диагностика», ООО «Биомедтех», ООО «Медтехника».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 – в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ, из них 2 – в рецензируемых научных журналах по специальности 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

Личный вклад автора. Представленные в диссертации результаты расчетов получены автором самостоятельно, кроме того, в совместно опубликованных работах автор принимал непосредственное участие в анализе полученных результатов и формулировке выводов, составляющих основу публикации.

Диссертационное исследование проводилось в соответствии с Программой развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» на 2023 – 2032 гг., утвержденной 31.07.2024 г. заместителем Минобрнауки России Д. В. Афанасьевым, которая предусматривает разработку прототипов программно-аппаратных комплексов для медицины в области научно-исследовательской деятельности и инноваций.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, четыре главы, выводы, заключение, библиографический список из 136 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов, приложения. Диссертационная работа изложена на 191 странице и содержит 113 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость. Представлены научные положения и результаты, выносимые на защиту автором.

В **первой главе** работы проведен всесторонний анализ современного состояния исследований по тематике диссертации, включая методы персонализации моделей, которые учитывают сердечно-сосудистые заболевания. Особое внимание уделено 0D-мерным моделям, которые используются для изучения различных физиологических сценариев и факторов влияния систем регуляции на гемодинамику. Рассмотрены применение математических моделей в системах поддержки принятия врачебных решений и степень их интеграции в медицинскую практику.

Во **второй главе** построена 0D-мерная математическая модель сердечно-сосудистой системы с врожденным ДМЖП на основании совокупного применения физиологических законов функционирования организма, законов механики и методов вычислительной гидродинамики.

Модель состоит из последовательно соединенных активных и пассивных упругих камер: 1 – левый желудочек ЛЖ, 2 – аорта АО, 3 и 4 – артерии верхних АВ и нижних АН конечностей, 5 и 6 – капилляры верхних КВ и нижних КН конечностей, 7 и 8 – вены верхних ВВ и нижних ВН конечностей, 9 – правое предсердие ПП, 10 – правый желудочек ПЖ, 11 – 13 – легочные артерии ЛА, капилляры ЛК и вены ЛВ, 14 – левое предсердие ЛП. Активными камерами являются левый и правый желудочки (рис. 1, а).

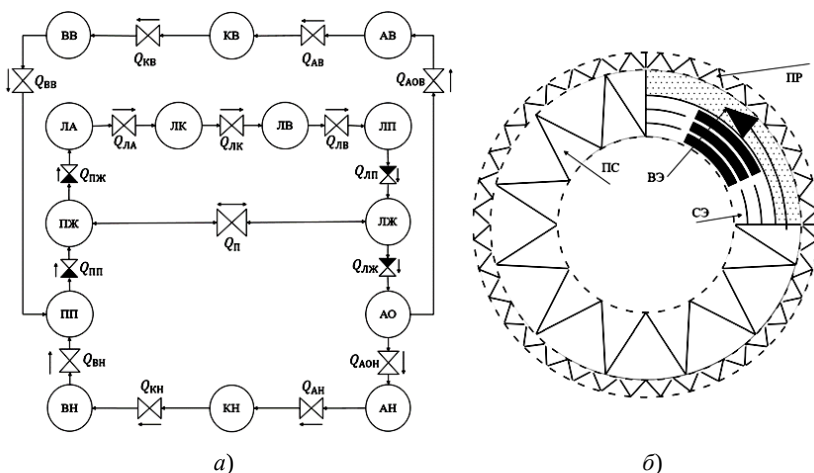


Рис. 1. Структурная модель кровообращения (а) и модель желудочка (б)

Модель желудочка включает в себя элемент сократительный СЭ, параллельно с ним работает элемент вязкий ВЭ, с этими элементами последовательно соединен упругий элемент ПС и параллельно всем предыдущим элементам, образующим сократительную нить, подключен элемент ПР. В фазе систолы сократительная нить укорачивается, изменяются длины элементов СЭ, ПС и ПР. В фазе расслабления происходит увеличение длины элемента СЭ. Скорость изменения длины элемента СЭ ограничивается действием элемента ВЭ (рис. 1, б).

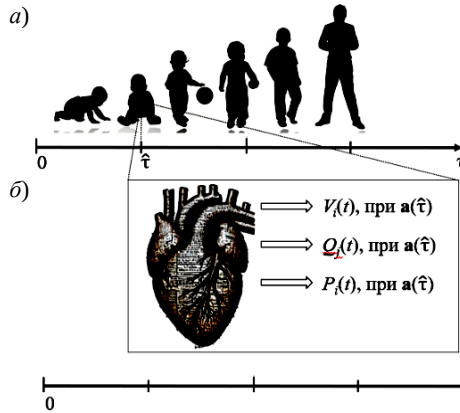


Рис. 2. Многомасштабное представление во времени организма ребенка: развитие ребенка в масштабе времени τ (а); гемодинамика сердечно-сосудистой системы ребенка в момент времени $\hat{\tau}$ (б)

Масштаб времени t , в котором работает модель, определяемая параметрами объема камер $V_i(t)$, давления в камерах $P_i(t)$, $i = \overline{1,14}$, и кровотока, $Q_j(t)$, $j = \overline{1,16}$, измеряется в секундах. При рассмотрении такого масштаба свойства $\mathbf{a}(\hat{\tau})$ организма остаются на постоянном уровне в момент времени $\hat{\tau}$. При переходе к месяцам жизни ребенка вектор параметров организма значительно изменится по причине развития ребенка. Организм ребенка можно представить как квазистационарную систему (рис. 2).

Один месяц жизни ребенка равен $2,5 \cdot 10^6$ с. Тогда формула связи двух временных масштабов:

$$\tau = kt, \quad (1)$$

где k – коэффициент масштаба времени, месяц/с.

С учетом принципа квазистационарности математическая модель переписывается в матричной форме в виде многомасштабной по времени модели, где каждая камера описывается системой дифференциальных уравнений в матричной форме, включающих вектор-столбцы $\mathbf{V}$, $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{P}$:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Q}(t); \\ \mathbf{V}(0) = \mathbf{V}_0(t); \\ \mathbf{L}(\tau)\dot{\mathbf{Q}}(t) + \mathbf{R}(\tau)\mathbf{Q}(t) = \mathbf{B}\mathbf{P}(t); \\ \mathbf{Q}(0) = \mathbf{Q}_0(\tau); \\ P_i(t) = e_i [V_i(t) - U_i(\tau)], \end{cases} \quad (2)$$

где $i = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14\}$; $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ – матрицы связи; $\dot{\mathbf{V}}(t)$, $\dot{\mathbf{Q}}(t)$, $\mathbf{P}(t)$ – вектор-столбцы $[\dot{V}_i(t)]_1^{14}$, $[\dot{Q}_i(t)]_1^{16}$, $[P_i(t)]_1^{14}$. Вектор столбец $[V_{0i}(\tau)]_1^{14}$

определяет начальные условия и зависит от времени τ ; $\mathbf{L}(\tau)$ – инерционность потока крови: $\text{diag}[0, L_2(\tau), L_3(\tau), 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, L_{11}(\tau), 0, 0, 0, 0, 0]$; $\mathbf{R}(\tau)$ – сопротивление потока крови, обратное проводимости ρ : $\text{diag}[1/\rho_2(\tau), 1/\rho_3(\tau), 1/\rho_4(\tau), 1/\rho_5(\tau), 1/\rho_6(\tau), 1/\rho_7(\tau), 1/\rho_8(\tau), 1/\rho_{11}(\tau), 1/\rho_{12}(\tau), 1/\rho_{13}(\tau), 1/\rho_{15}(\tau)]$. Отдельно выделяются проводимости клапанов сердца $\rho_1(\tau), \rho_9(\tau), \rho_{10}(\tau), \rho_{14}(\tau)$, значения которых определяются алгоритмически. Жесткость упругих стенок камеры e_i и ненапряженный объем U_i зависят от времени τ .

Для желудочков сердца $i = \{1, 10\}$ давления будут представлены зависимостью

$$P_i(t) = F_i(V_i(t), \mathbf{a}(\tau)), \quad (3)$$

где $\mathbf{a}(\tau)$ – вектор свойств сердечно-сосудистой системы, которые меняются во времени τ ; F – функция изменения параметров желудочка, разработанная на основании совокупного использования закона Лапласа для тонкостенной сферы, который прямо пропорционально связывает напряжение в стенках камеры с давлением и радиусом, 4-элементной модели мышцы, закона Франка–Старлинга, гомеометрических и гетерометрических соотношений.

Далее в разделе выдвинута и исследована гипотеза о соответствии изменения роста и других параметров организма (рис. 3) в процессе его развития экспоненциальному закону:

$$Rs = A \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right), \quad (4)$$

где Rs – рост ребенка, см; τ – время в месяцах; A и T – параметры, определяющие характер зависимости.

Разработаны математический аппарат моделирования для реализации гипотезы, а также метод объединения модели изменения параметров сердечно-сосудистой системы в процессе роста и развития с 0D-мерной моделью сердечно-сосудистой системы, основанный на использовании свойств квазистационарных моделей, в частности метода замороженных коэффициентов.

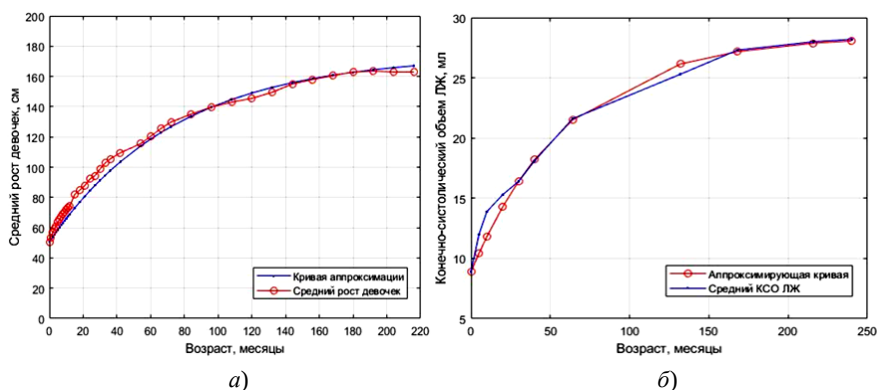


Рис. 3. Графики изменения роста (а) и конечно-систолического объема левого желудочка (б) в процессе взросления

В **третьей главе** были произведены исследования изменения наиболее важных параметров сердечно-сосудистой системы, необходимых для создания математической модели гемодинамики (рис. 4).

Исследование проводили в три этапа. На первом этапе выполняли анализ изменений основных параметров гемодинамики, таких как давление, скорость кровотока, объемные характеристики, частота сердечных сокращений, диаметр кольца аорты и диаметр митрального клапана, в процессе роста и развития организма ребенка.

Для каждого из перечисленных параметров сердечно-сосудистой системы проверено соответствие экспоненциальному закону и определены коэффициенты аппроксимации.

Вторым этапом исследования являлось изучение разработанной 0D-мерной модели гемодинамики здорового ребенка и ребенка с врожденным пороком сердца. Для этого были исследованы давление в аорте и легочных артериях, кровотоки из правого и левого желудочков.

На графиках видно, что давление в аорте у здорового ребенка (рис. 4, а) значительно больше, чем при наличии врожденного порока сердца (рис. 4, б), а давление в легочных артериях, наоборот, меньше в здоровом организме (рис. 4, в), чем в случае с пороком (рис. 4, г).

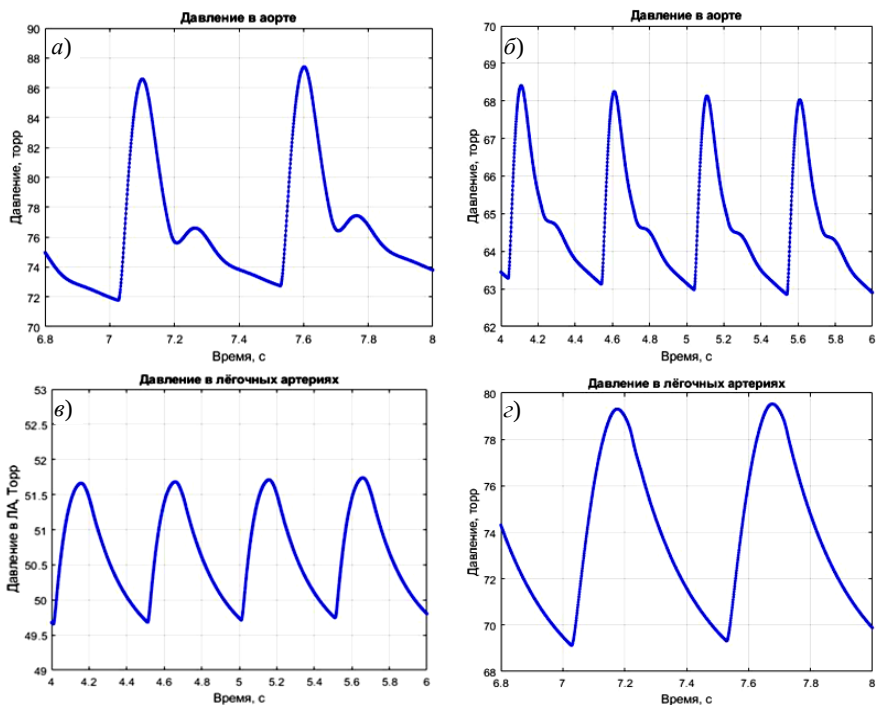


Рис. 4. Параметры давления для здорового ребенка и ребенка с дефектом межжелудочковой перегородки

На третьем этапе исследования был проведен анализ полученной модели изменения параметров сердечно-сосудистой системы в процессе его роста и развития в условиях многомасштабности по времени (рис. 5).

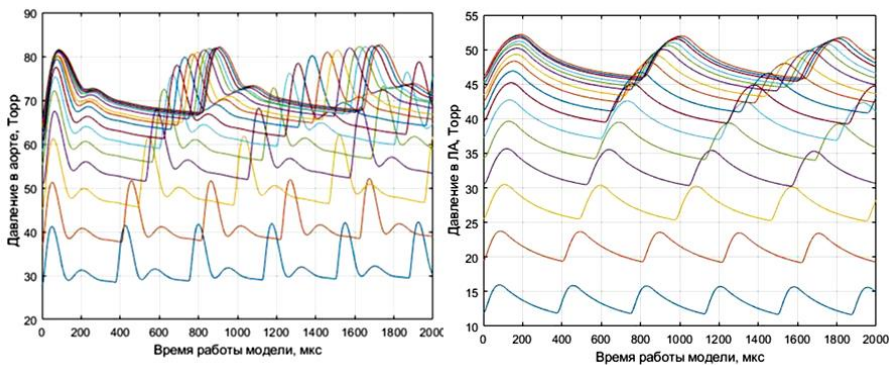


Рис. 5. Изменение давлений в аорте и легочных артериях в процессе роста и развития ребенка

Далее были изучены параметры, на основании которых можно рассчитать время возникновения критической ситуации для сердечно-сосудистой системы ребенка, – давление в желудочках и кровотоки.

У здорового человека давление в левом желудочке значительно выше, чем в правом. При наличии дефекта межжелудочковой перегородки давление в правом желудочке возрастает, а в левом снижается.

При моделировании дефекта межжелудочковой перегородки давление в левом желудочке упало с 140 до 96 Торр, а в правом возросло с 40 до 57 Торр. Таким образом, рассчитывая разницу давления в левом и правом желудочках, возможно определить, как развивается порок, и своевременно выявить критическую ситуацию.

Второй параметр, на основании которого возможно рассчитать время возникновения критической ситуации для сердечно-сосудистой системы ребенка, – это отношение кровотоков в большом и малом кругах кровообращения. В здоровом организме количество крови, проходящее через малый и большой круги кровообращения в единицу времени, одинаково.

Пиковое значение кровотока из правого желудочка в легочные артерии составляет $420 \text{ см}^3/\text{с}$, из левого желудочка в аорту – $500 \text{ см}^3/\text{с}$, отношение кровотоков в данном случае составляет 0,84.

При наличии дефекта межжелудочковой перегородки пиковое значение для легочного кровотока составляет $570 \text{ см}^3/\text{с}$, а для системного кровотока – $345 \text{ см}^3/\text{с}$, отношение кровотоков в данном случае составляет 1,652.

Наиболее оптимальным методом определения возникновения опасной для жизни ребенка с врожденным пороком сердца ситуации в процессе его роста и развития является совокупное использование предложенных вариантов.

В четвертой главе на основании данных, полученных в процессе исследования математической модели гемодинамики с дефектом межжелудочковой перегородки в условиях многомасштабности, разрабатывается система поддержки принятия врачебных решений, ключевой задачей которой является определение опасных для жизни ребенка ситуаций, возникающих в процессе его роста и развития.

Критическое состояние сердечно-сосудистой системы при дефекте межжелудочковой перегородки определяется по двум показателям. Первый показатель – отношение минутного объема кровотока в малом круге кровообращения (МОК_{МК}) к минутному объему кровотока в большом круге кровообращения (МОК_{БК}), которое в медицинской практике называется отношением пульмонального кровотока к системному. Этот показатель изменяется во времени τ и определяется из соотношения

$$v_1(\tau) = \frac{\text{МОК}_{\text{МК}}(\tau)}{\text{МОК}_{\text{БК}}(\tau)} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+nT} Q_{\text{ЛЖ}}(\tau) dt}{\int_{t_0}^{t_0+nT} Q_{\text{ПЖ}}(\tau) dt}, \quad (5)$$

где t_0 – время начала измерения, с; T – длительность сердечного цикла, с; n – количество циклов, $n \geq 1$; $Q_{\text{ЛЖ}}$ – кровоток ЛЖ, см³/с; $Q_{\text{ПЖ}}$ – кровоток ПЖ, см³/с.

Второй показатель, на основании которого можно определить критическое состояние сердечно-сосудистой системы с ДМЖП, – это отношение систолического давления в левом желудочке к давлению в правом желудочке:

$$v_2(\tau) = \frac{P_{\text{СИСЛЖ}}(\tau)}{P_{\text{СИСПЖ}}(\tau)}. \quad (6)$$

Показатели $v_1(\tau)$ и $v_2(\tau)$ образуют вектор $\mathbf{v}(\tau) = (v_1(\tau), v_2(\tau))$, который можно определить по многомасштабной по времени модели гемодинамики (2), (5), (6):

$$\mathbf{v}(\tau) = m(\mathbf{a}(\tau)). \quad (7)$$

где m – обозначение функции, определяющей модель (2), (5), (6).

Постановка задачи определения критического состояния сердечно-сосудистой системы ребенка с ДМЖП формулируется следующим образом: для известного вектора свойств $\mathbf{a}(\tau)$ необходимо найти такое критическое время $\tau_{\text{кр}}$ (месяц), при котором верно логическое условие

$$\left(|v_1(\tau_{\text{кр}}) - \Delta_1| \leq \varepsilon_1 \right) \vee \left(|v_2(\tau_{\text{кр}}) - \Delta_2| \leq \varepsilon_2 \right) = \text{"true"} \quad (8)$$

при $\tau_{\text{кр}} \in [\tau_{\text{н}}, \tau_{\text{к}}]$ и выполнении уравнения связи в виде математической модели (7).

Здесь $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{к}}$ – границы интервала периода прогнозирования, ε_1 и ε_2 – заданные погрешности определения времени возникновения критического

ситуации, Δ_1 – пороговое значение для отношения v_1 , равное 1,5, что указывает на значительное увеличение объема крови в малом круге по сравнению с большим. Это серьезное отклонение, свидетельствующее о значительной перегрузке малого круга кровообращения. Такие значения могут требовать немедленного медицинского вмешательства, поскольку они связаны с высоким риском развития тяжелых осложнений. Величина Δ_2 – пороговое значение для отношения v_2 , которое у здорового человека составляет от 3,5 до 6,0, падение значения ниже установленного порога, равного 2, является показателем возникновения критической ситуации.

Время критического состояния определяется на основании алгоритма, представленного на рис. 6.

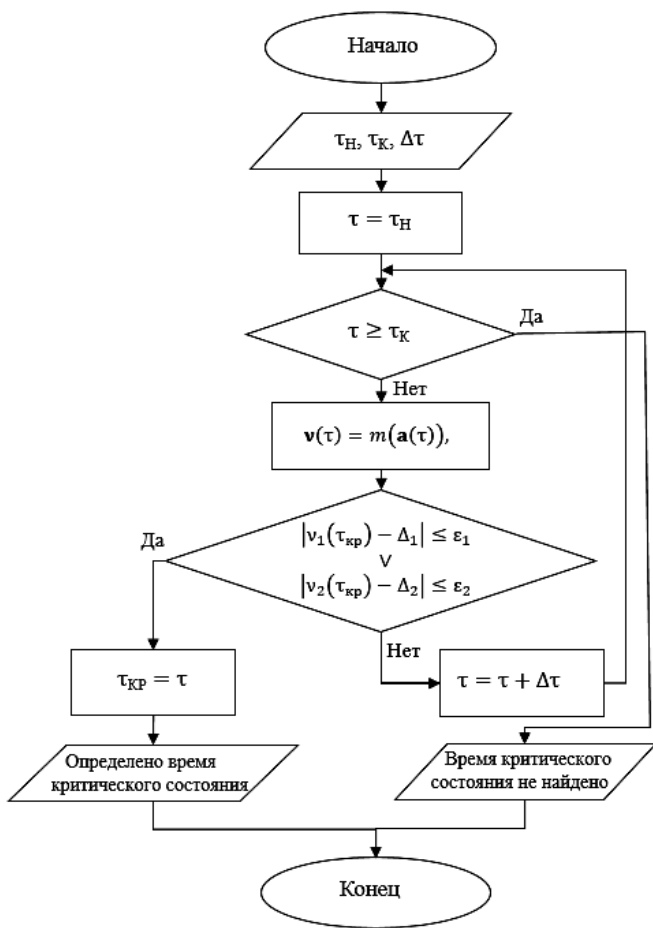


Рис. 6. Алгоритм поиска критических состояний сердечно-сосудистой системы ребенка, возникающих в процессе его роста и развития

Разрабатываемую систему поддержки принятия врачебных решений можно представить как совокупность взаимосвязанных между собой блоков (рис. 7).

На первом этапе врач регистрирует пациента в системе, заводит ему карточку, заполняет ее. Далее врач проводит исследования пациента, которые необходимы для расчета индивидуальной модели гемодинамики прохождения тестирования на группу риска. Моделирование изменения параметров сердечно-сосудистой системы с возрастом происходит по двум точкам: первая – это измеренное значение для текущего возраста ребенка, а вторая – это значение, взятое для среднего взрослого человека. Далее система рассчитывает индивидуальную модель гемодинамики ребенка с учетом изменения параметров с возрастом и производит персонализацию этой модели.

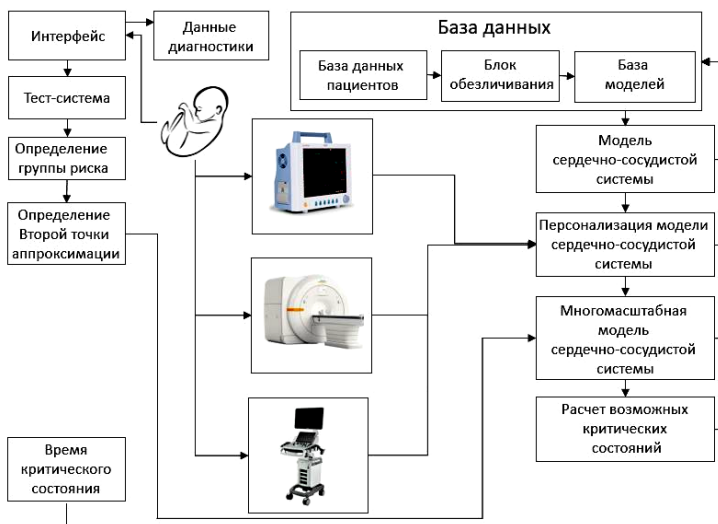


Рис. 7. Структура разработанной системы поддержки принятия врачебных решений

На этапе персонализации модели определяется функция соответствия между результатами работы модели и реальными параметрами пациента. Определены точки $y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, \dots, y_{27}\}$, в которых можно неинвазивными методами исследований получить необходимые параметры сердечно-сосудистой системы ребенка.

Идентификация неизвестных параметров сердечно-сосудистой системы определяется на основании решения обратной задачи с использованием данных неинвазивных исследований. Обозначим $a = a_1 \cup a_2$ свойства сердечно-сосудистой системы, где a_1 – вектор стабильных параметров (изменения которых у разных людей минимальны), a_2 – вектор идентифицируемых параметров.

Значения функции y определяются из уравнений математической модели гемодинамики (2) для фиксированного момента времени $\hat{\tau}$:

$$y(\hat{\tau}) = M(a(\hat{\tau})), \quad (9)$$

где $\hat{\tau}$ – возраст, при котором производились неинвазивные измерения параметров; M – обозначение функции, определяющей модель (2).

Задача идентификации модели, таким образом, сводится к поиску такого вектора $a_2^*(\hat{\tau})$, при котором сумма квадратов разности между выходными данными по модели y_{in} (9) и измеряемыми функциями в момент времени $\hat{\tau}$ для конкретного пациента y_{in}^3 за N экспериментов в течение I_n измерений в каждом n -м эксперименте была бы минимальна:

$$a_2^*(\hat{\tau}) = \arg \min_{a_2 \in A} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (y_{in}(\hat{\tau}) - y_{in}^3(\hat{\tau}))^2, \quad (10)$$

здесь A – допустимая область изменения свойств сердечно-сосудистой системы; N – количество экспериментов; I_n – количество измерений в N -м эксперименте, $I_n \leq 27$. Задача идентификации решается путем поиска неизвестного вектора $a_2^*(\hat{\tau})$.

После идентификации неизвестного вектора a_2 рассчитывается персонализированная многомасштабная по времени математическая модель гемодинамики (2) – (4), далее по данным полученной модели выполняется поиск момента критического состояния на основании уравнений (5) – (8).

Для облегчения работы медицинского персонала с системой поддержки принятия врачебных решений для детей с врожденными дефектами межжелудочковой перегородки, основанной на многомасштабной по времени 0D-мерной модели гемодинамики, предложен графический интерфейс взаимодействия.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В ходе проведенной работы была успешно достигнута цель исследования по разработке метода оценки состояния сердечно-сосудистой системы ребенка с пороком *in silico* при принятии врачебных решений, позволяющего учитывать текущее состояние и динамику изменений в процессе роста и развития организма. Это стало возможным благодаря решению ряда поставленных задач.

1. Проведен всесторонний анализ современного состояния исследований по тематике диссертации, включая методы персонализации математических моделей, которые учитывают сердечно-сосудистые заболевания. Рассмотрены применение математических моделей в системах поддержки принятия врачебных решений и степень их интеграции в российскую медицинскую практику.

2. Разработана математическая модель сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным дефектом межжелудочковой перегородки. На основе физиологических законов и методов вычислительной гемодинамики построена 0D-мерная модель сердечно-сосудистой системы с включенным в нее блоком, характеризующим дефект межжелудочковой перегородки.

3. Выявлены закономерности экспоненциального изменения параметров сердечно-сосудистой системы в процессе онтогенеза ребенка. Построена многомасштабная по времени математическая модель, отражающая динамику основных гемодинамических показателей в зависимости от возраста и физиологического статуса индивида. В модели был применен подход, объединяющий два разных масштаба времени, позволяющий проводить комплексный анализ возрастных трансформаций сердечно-сосудистой системы, включая индивидуальные особенности пациента.

4. Было проведено исследование среднего систолического и диастолического давления в различном возрасте и определены коэффициенты аппроксимации экспоненциальной зависимости: $A = 57,3747$, $T = 30,8608$ для систолического и $A = 35,2471$, $T = 34,2898$ для диастолического давления соответственно. Исследовано изменение ЧСС с возрастом и определены коэффициенты аппроксимации $A = 90,2091$ и $T = -46,6314$. Были рассмотрены возрастные изменения конечно-систолического (КСО) и конечно-диастолического (КДО) объема левого желудочка на основании данных о средних значениях в разном возрасте, найденные коэффициенты аппроксимации: $A = 32,6326$ и $T = 61,0105$ для КДО, а также $A = 19,5796$ и $T = 61,9839$ для КСО. Рассмотрены возрастные изменения диаметра митрального клапана в процессе роста и развития организма, коэффициенты аппроксимации для него составили $A = 8,8574$ и $T = 53,2052$. Для моделирования врожденного порока сердца исследовано изменение такого параметра, как диаметр аорты, так как он является важным звеном при моделировании дефекта межжелудочковой перегородки; коэффициенты аппроксимации параметра составили $A = 14,0913$, $T = 57,0115$.

5. Проведенные имитационные эксперименты позволили исследовать поведение сердечно-сосудистой системы у детей различных возрастных категорий и выявить параметры, на основании которых можно определить момент возникновения критического состояния. Первый параметр – это отношение минутного объема кровотока в малом круге кровообращения к минутному объему кровотока в большом круге кровообращения, которое в нормальных условиях равно 1, а значения в 1,5 указывают на серьезное отклонение, свидетельствующее о значительной перегрузке малого круга кровообращения. Второй параметр – это отношение давления в левом желудочке к давлению в правом желудочке, которое у здорового человека составляет от 3,5 до 6,0, падение значения ниже установленного порога, равного 2, является показателем возникновения критической ситуации.

6. Разработан метод персонализированной настройки модели, повышающий прогностическую ценность результатов и способствующий оптимизации лечебно-диагностических процессов.

7. Создана система стратификации пациентов по пяти группам риска, обеспечивающая более высокую оценку вероятности неблагоприятных исходов и своевременную коррекцию лечебных стратегий с точностью не менее 80%, что позволит сократить уровень смертности детей с тяжелыми ДМЖП, достигающий на текущий момент 20%.

8. Итоговый результат работы представляет собой систему поддержки принятия врачебных решений, основанную на математическом моделировании и адаптированную к потребностям педиатрической практики.

Таким образом, предложенный подход обеспечивает новый уровень понимания патофизиологии сердечно-сосудистых заболеваний у детей с ДМЖП и открывает перспективы для улучшения качества медицинской помощи, включая профилактику осложнений и своевременное хирургическое вмешательство.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Фролов, С. В. Математическое моделирование пульсирующего сердца с дефектом межжелудочковой перегородки / С. В. Фролов, Д. Е. **Судаков**, А. А. Коробов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 2. – С. 79 – 106.

2. **Судаков, Д. Е.** Система поддержки принятия врачебных решений для педиатрических пациентов с врожденными пороками сердца / Д. Е. Судаков, С. В. Фролов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 1(65). – С. 10 – 23.

3. Выявление локальных особенностей сигнала электроэнцефалографа с использованием искусственной нейронной сети / Д. Е. **Судаков**, П. С. Ш. Матяе, В. М. Д. К. Фуши, С. В. Фролов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – С. 230 – 237.

4. **Судаков, Д. Е.** Построение зависимостей изменения параметров организма ребенка от возраста / Д. Е. Судаков, С. В. Фролов, Д. Г. Старых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 3. – URL : <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1622>. – DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.004

Прочие публикации:

5. **Судаков, Д. Е.** Исследование модели пульсирующего сердца с дефектом межжелудочковой перегородки / Д. Е. Судаков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2024. – С. 241–242.

6. **Судаков, Д. Е.** Исследование экспоненциальной зависимости параметров сердечно-сосудистой системы от возраста / Д. Е. Судаков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2024. – С. 243 – 245.

7. **Судаков, Д. Е.** Совместное использование методов функциональной диагностики и математического моделирования сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца / Д. Е. Судаков, С. В. Фролов // Российский кардиологический журнал. – 2024. – Т. 29. – С. 7.

8. **Судаков, Д. Е.** Актуальность математического моделирования сердца ребенка с врожденным пороком / Д. Е. Судаков, А. В. Гришина, Н. О. Сорока // Молодежь для устойчивого развития регионов : материалы науч.-практ. конф. студенческих научных объединений. – Тамбов, 2023.

9. **Судаков, Д. Е.** Современные вопросы математического моделирования врожденных пороков сердца у детей / Д. Е. Судаков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2023. – Вып. 9.

10. **Судаков, Д. Е.** Математическое моделирование сигнала реоэнцефалографа с применением вейвлет-функций / Д. Е. Судаков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Восьмой Всерос. молодеж. науч. конф. – 2023.

11. **Судаков, Д. Е.** Сравнительная характеристика методов математического моделирования реоэнцефалограмм / Д. Е. Судаков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Восьмой Всерос. молодеж. науч. конф. – 2023.

12. **Судаков, Д. Е.** Использование математических моделей электроэнцефалограммы для ранней диагностики инсультов / Д. Е. Судаков, К. С. Савинова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития. – 2022. – С. 217–218.

13. **Коробов, А. А.** Моделирование контуров регуляции системы кровообращения человека / А. А. Коробов, К. С. Савинова, **Д. Е. Судаков** // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы. Биомедсистемы-2020. – Рязань, 2020. – С. 264 – 267.

14. **Коновалова, К. Н.** Информационный анализ модели сердечно-сосудистой системы и ее применение для изучения процессов регуляции / К. Н. Коновалова, **Д. Е. Судаков** // Цифровая трансформация в энергетике. – 2020. – С. 295 – 298.

15. **Судаков, Д. Е.** Использование нейронной сети для обработки электроэнцефалограмм / Д. Е. Судаков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития. – 2019. – С. 300 – 302.

16. **Судаков, Д. Е.** Использование искусственной нейронной сети для обработки сигнала электроэнцефалографа / Д. Е. Судаков, К. С. Савинова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Шестой Всерос. молодеж. науч. конф. – Тамбов, 2021. – С. 350 – 352.

17. **Судаков, Д. Е.** Применение электроэнцефалографии в комплексах диагностики и терапии сердечно-сосудистой системы / Д. Е. Судаков, А. А. Коробов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы. Биомедсистемы-2020. – Рязань, 2020. – С. 451 – 453.

Судаков Дмитрий Евгеньевич

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ РАННЕЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ РЕБЕНКА
С ВРОЖДЕННЫМ ПОРОКОМ СЕРДЦА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2025.
Формат 60 × 84/32. 1 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 14

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.
Телефон (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А.
E-mail: tipo_tstu68@mail.ru