

УДК 651.471

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.004)

Построение зависимостей изменения параметров организма ребенка от возраста

С.В. Фролов✉, Д.Е. Судаков, Д.Г. Старых

*Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Российская Федерация*

Резюме. Актуальность исследования, проведенного в статье, обусловлена необходимостью прогнозирования рисков, которые угрожают жизни ребенка, имеющего врожденный порок сердца, с целью планирования проведения хирургических вмешательств. Прогноз состояния сердечно-сосудистой системы осуществляется на основе нульмерной модели кровообращения. Для этого предлагается создать квазистационарную модель, в которой параметры сердечно-сосудистой системы изменяются в зависимости от возраста ребенка. На основе анализа данных регионального мониторинга здоровья детей в статье сформулирована гипотеза о том, что параметры организма ребенка изменяются в зависимости от возраста по экспоненциальному закону. Экспериментальные исследования на основе данных мониторинга подтвердили выдвинутую гипотезу. Предложена и исследована методика построения изменения параметров сердечно-сосудистой системы ребенка в зависимости от возраста. Для установления этой зависимости достаточно иметь значение параметра для ребенка в текущий момент времени и в другой момент времени для среднего ребенка данного пола. Предложен алгоритм получения экспериментальной экспоненциальной зависимости на основе использования итерационного метода Ньютона для решения нелинейного уравнения. Реализация предложенной методики позволяет прогнозировать состояние сердечно-сосудистой системы ребенка для планирования таких вмешательств, как хирургическое устранение врожденных пороков сердца.

Ключевые слова: врожденный порок сердца, аппроксимация, экспоненциальный закон, математическое моделирование, квазистационарная система, сердечно-сосудистая система.

Для цитирования: Фролов С.В., Судаков Д.Е., Старых Д.Г. Построение зависимостей изменения параметров организма ребенка от возраста. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1622> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.004

Building dependencies of changes in the parameters of the child's body on age

S.V. Frolov✉, D.E. Sudakov, D.G. Starykh

Tambov State Technical University, Tambov, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the research conducted in the article is due to the need to predict the risks that threaten the life of a child with congenital heart disease in order to plan surgical interventions. The prognosis of the state of the cardiovascular system is based on a zero-dimensional model of blood circulation. To do this, it is proposed to create a quasi-stationary model in which the parameters of the cardiovascular system vary depending on the age of the child. Based on the analysis of data from regional monitoring of children's health, the article formulates a hypothesis that the parameters of a child's body change exponentially depending on age. Experimental studies based on monitoring data have confirmed the hypothesis put forward. A method for constructing changes in the parameters of a child's cardiovascular system depending on age is proposed and investigated. To establish this dependence, it is sufficient to have the parameter value for the child at the current time and at another

time for the average child of a given gender. An algorithm for obtaining an experimental exponential dependence based on the use of Newton's iterative method for solving a nonlinear equation is proposed. The implementation of the proposed technique makes it possible to predict the state of the child's cardiovascular system for planning such interventions as surgical removal of congenital heart defects.

Keywords: congenital heart disease, approximation, exponential law, mathematical modeling, quasi-stationary system, cardiovascular system.

For citation: Frolov S.V., Sudakov D.E., Starykh D.G. The construction of dependencies of changes in the parameters of the child's body on age. *Modeling, optimization and information technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=1622> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.004 (In Russ.).

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы являются глобальной мировой проблемой. Согласно статистике, количество смертей от заболеваний сердечно-сосудистой системы в мире около 17,8 миллионов и составляет 37 % от всех смертей, не связанных с инфекционными заболеваниями. В России по данным за 2022 год этот показатель составляет около 830 тысяч человек, что составляет 43,8 % от общей смертности [1].

У детей одной из основных причин смерти являются врожденные пороки сердца. По разным данным, среди сохраняемых плодов с врожденными пороками сердца средняя смертность составляет 11–12 %. А вскоре после родов умирает еще от 19 до 43 % детей. Без операции и поддерживающей терапии в течение первого года жизни погибает до 55 % детей, до пятилетнего возраста – 85 % [1].

Пороки сердца начинают формироваться еще во время внутриутробного развития и влияют на всю последующую жизнь человека [2]. Моделирование сердечно-сосудистой системы ребенка с врожденным пороком сердца является актуальной и важной задачей, которая может повысить возможности диагностических методов и снизить детскую смертность [3]. Моделирование сердечно-сосудистой системы ребенка представляет собой сложную задачу, так как необходимые для моделирования параметры меняются в процессе роста и развития.

Актуальным является разработка методики построения зависимостей изменения параметров организма ребенка от возраста с целью моделирования сердечно-сосудистой системы с наличием врожденных пороков для прогнозирования возможных рисков.

Большинство современных математических моделей описывают поведение сердечно-сосудистой системы на фиксированном моменте жизнедеятельности организма ребенка [4–6]. Однако важно учитывать изменения в организме, происходящие в процессе взросления. Масштаб времени, в котором обычно работают модели гемодинамики, измеряется в секундах. При рассмотрении такого масштаба параметры организма остаются на примерно постоянном уровне. Но если мы переходим к дням, неделям и месяцам жизни ребенка, то параметры организма значительно изменяются, и это необходимо учитывать.

Материалы и методы

Математическая модель сердечно-сосудистой системы, где параметры изменяются в двух различных масштабах времени (Рисунок 1), а именно в секундах работы сердечного цикла и месяцев роста и развития организма, относится к классу квазистационарных [7].

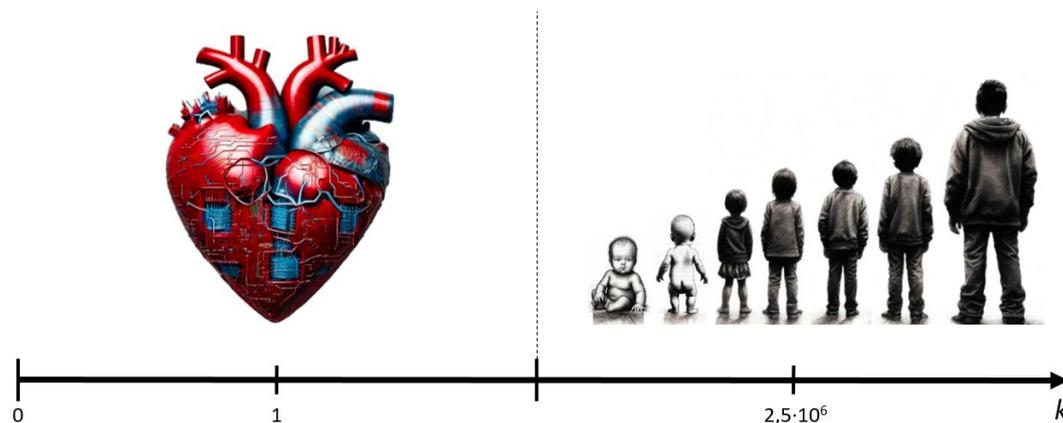


Рисунок 1 – Масштабы времени в двух моделях
Figure 1 – Time scales in two models

Квазистационарной называют систему, в которой параметры изменяются настолько медленно относительно длительности переходных процессов внутри системы, что при рассмотрении последних можно приближенно считать параметры системы постоянными [7].

Для расчета такой системы используется метод замороженных коэффициентов. Переменные коэффициенты системы $A(\tau)$ и $B(\tau)$ заменяются постоянными коэффициентами $A^*(\tau)$ и $B^*(\tau)$, которые равны значениям исходных коэффициентов в фиксированный момент времени [7].

Если рассматриваемый промежуток времени достаточно большой и изменения коэффициентов в процессе значительны, то для применения метода замороженных коэффициентов его необходимо разбить на интервалы, на каждом из которых принимается система дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Таким образом, мы получаем два различных масштаба времени, с которыми необходимо работать – секунды работы математической модели с постоянными параметрами и месяцы жизни ребенка, в течение которых эти параметры меняются.

Один месяц жизни ребенка равен $2,5 \cdot 10^6$ секунд. Основываясь на этой информации, запишем формулу связи двух временных масштабов:

$$\tau = k \cdot t, \quad (1)$$

где k – коэффициент масштаба, *месяц*· c^{-1} ; t – время, c .

На следующем этапе работы устанавливаются закономерности, по которым изменяются параметры сердечно-сосудистой системы ребенка для включения их в модель.

Основой для поиска необходимых закономерностей является гипотеза, выдвинутая при изучении данных, собранных в рамках проекта региональной информационной системы мониторинга показателей индивидуального и общественного здоровья школьников, в котором была собрана информация о физическом развитии более 90 тысяч школьников из 104 и 29 лечебных учреждений за период с 2010 по 2014 годы [8].

Гипотеза заключается в том, что при построении зависимости изменения среднего роста ребенка от его возраста график принимает форму, которая близка к экспоненциальной. Например, эта зависимость наблюдается на Рисунке 2.

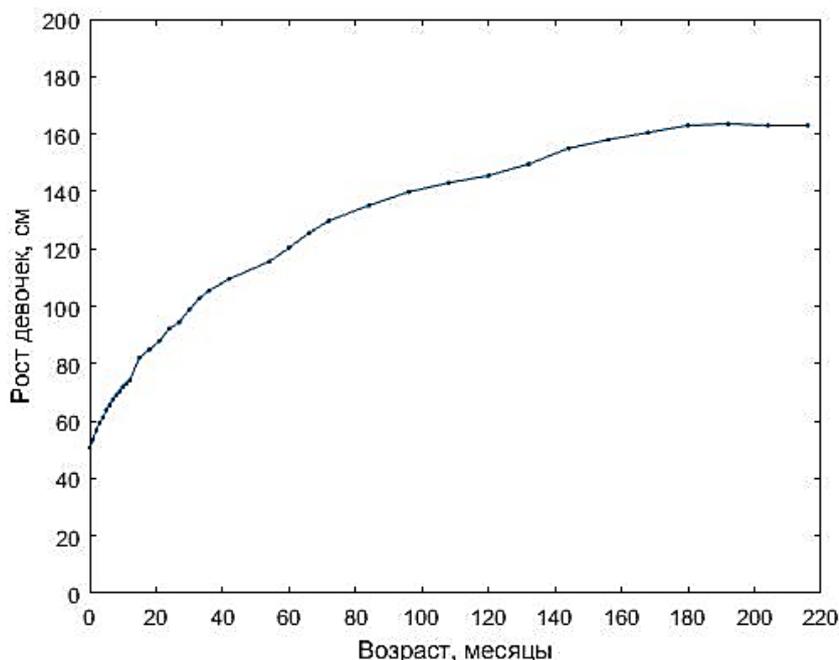


Рисунок 2 – Мониторинг среднего роста девочек в зависимости от возраста
Figure 2 – Monitoring of average growth of girls depending on age

Исходя из данного замечания, нами выдвигается гипотеза о том, что рост ребенка с возрастом, а также параметры, с ним связанные, меняются по экспоненциальному закону:

$$R = B + A \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}), \quad (2)$$

где R – рост, см; τ – время, месяцы; A , B и T – константы.

Для определения параметров A и T по экспериментальным данным применяется следующая методика. Берутся две произвольные точки в моменты времени τ_1 и τ_2 , для которых известно значение роста ребенка:

$$\begin{cases} R_1 = A \cdot (1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}}) \\ R_2 = A \cdot (1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}}) \end{cases} \quad (3)$$

Для решения этой системы определяем время τ_1 и τ_2 :

$$\begin{cases} \tau_1 = -T \cdot \ln(1 - \frac{R_1}{A}) \\ \tau_2 = -T \cdot \ln(1 - \frac{R_2}{A}) \end{cases} \quad (4)$$

Далее записывается система уравнений в виде пропорции на основе (4), предварительно сократив оба уравнения на T :

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\ln(1 - \frac{R_2}{A})}{\ln(1 - \frac{R_1}{A})} \quad (5)$$

Для получения решения в явном виде принимаем отношение τ_2 к τ_1 равным 2, в ином случае при решении уравнения будут использоваться классические численные методы.

Приводим уравнение (5) к общему знаменателю:

$$\ln\left(1 - \frac{R_2}{A}\right) = 2 \cdot \ln\left(1 - \frac{R_1}{A}\right). \quad (6)$$

Далее для параметра A получаем:

$$A = \frac{R_1^2}{2 \cdot R_1 - R_2}. \quad (7)$$

Для определения T подставим полученное значение A в изначальную систему уравнений (3):

$$T = \frac{-\tau_1}{\ln\left(\frac{R(\tau_2)}{R(\tau_1)} - 1\right)}. \quad (8)$$

На основании (7) и (8) находим коэффициенты A и T , строим график полученной зависимости. При этом важно учесть тот факт, что начало координат при построении экспериментальных находится не в нулевой точке, а имеет смещение B по оси ординат.

Для первого исследования были выбраны точки, соответствующие возрасту 2 и 4 месяца, чтоб выполнялось соотношение $\tau_2/\tau_1=2$. На Рисунке 3 видно, что при использовании данных точек экспериментальная и рассчитанная зависимости сильно расходятся.

Для определения ошибки в численном виде воспользуемся формулой относительной погрешности

$$\varepsilon = \frac{|R_3(\tau) - R_i(\tau)| \cdot 100\%}{R_3(\tau)}, \quad (9)$$

где $R_3(\tau)$ – значение роста из данных исследования, $R_i(\tau)$ – значение, рассчитанное по экспоненциальному закону.

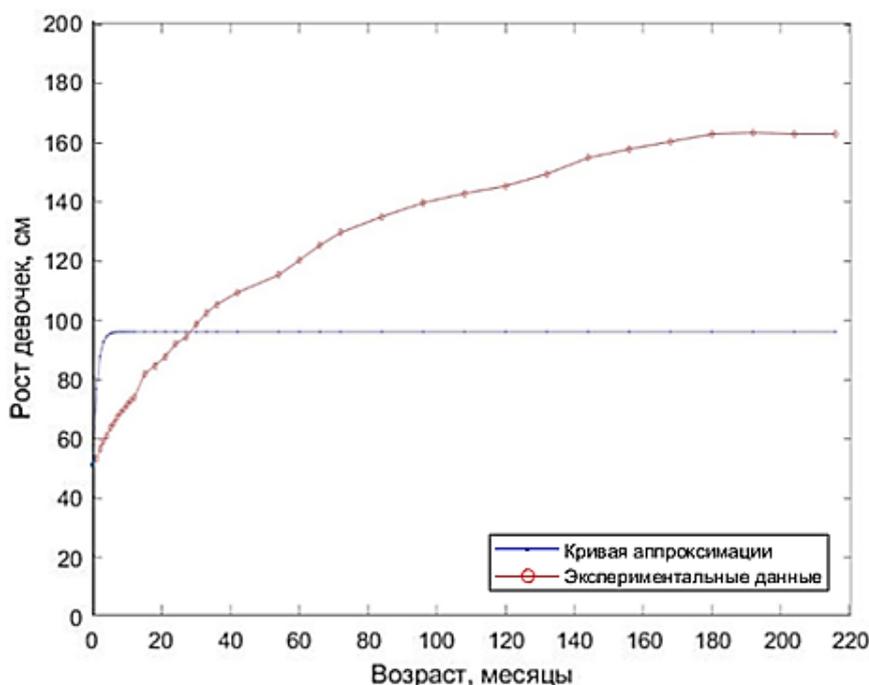


Рисунок 3 – Аппроксимация по точкам, соответствующим 2 и 4 месяцам жизни
Figure 3 – Point approximation corresponding to 2 and 4 months of life

Для выбранных при первом опыте точек значение погрешности составило 40,92 %. Высокая погрешность говорит о неправильном выборе точек для расчета. Для

проверки данного предположения во втором опыте выбраны точки, которые также удовлетворяют пропорции 2/1, однако расположены на большем удалении друг от друга.

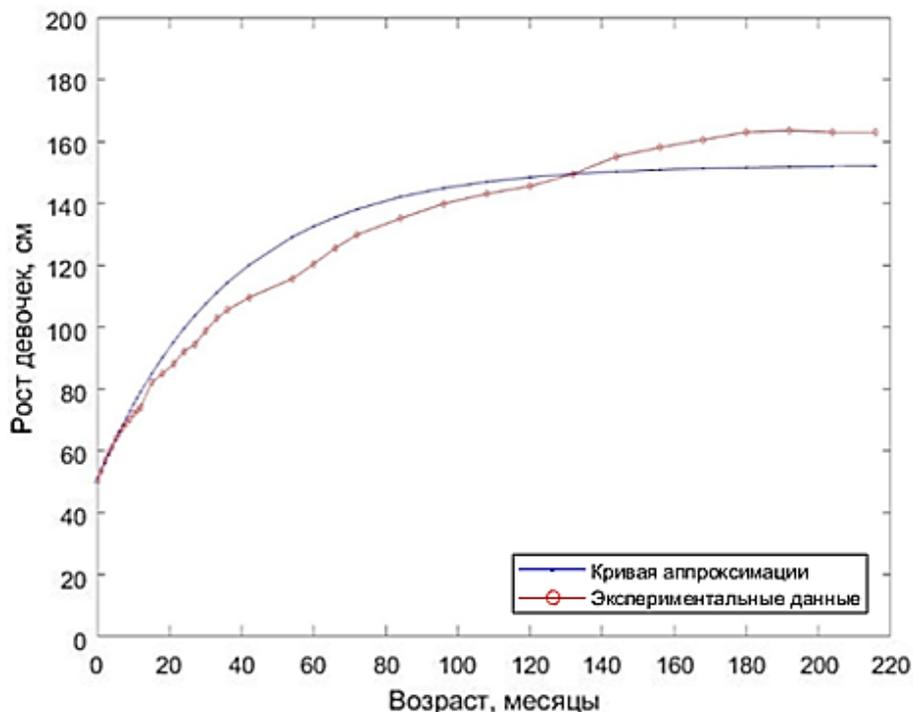


Рисунок 4 – Аппроксимация по точкам, которые соответствуют 32 и 74 месяцам жизни
Figure 4 – Approximation by points that correspond to 32 and 74 months of life

На Рисунке 4 построена зависимость для точек, соответствующих возрасту 32 и 74 месяца соответственно. Форма кривой, построенной по экспоненциальному закону, гораздо ближе к экспериментальным значениям, чем при первом расчете. Значение относительной погрешности при расчете для данных точек составляет 6,78 %.

Проведем исследование для всех соотношений точек, которые удовлетворяют условию 2/1 и в каждом случае посчитаем значение относительной погрешности (Рисунок 5).

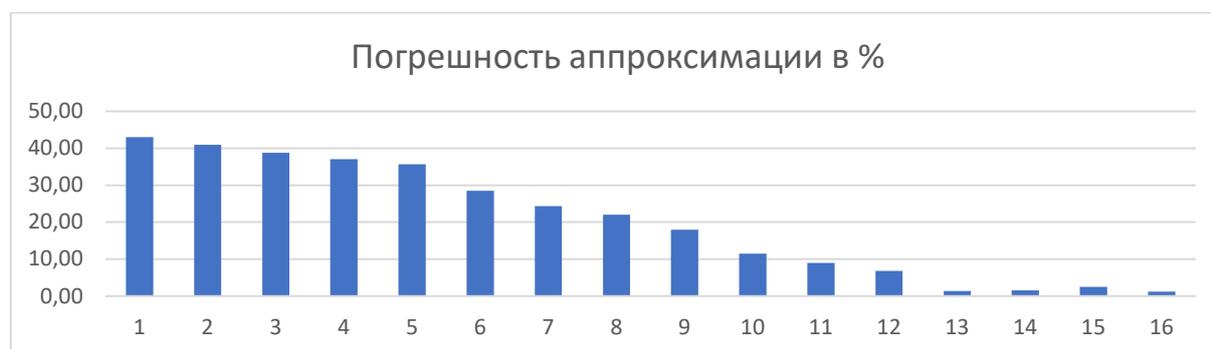


Рисунок 5 – Относительная погрешность при различных интервалах времени
Figure 5 – Relative error at different time intervals

Наибольшая погрешность составила 42,98 %, а наименьшая 1,24 %. Построим график, полученный при наименьшем значении относительной погрешности (Рисунок 6).

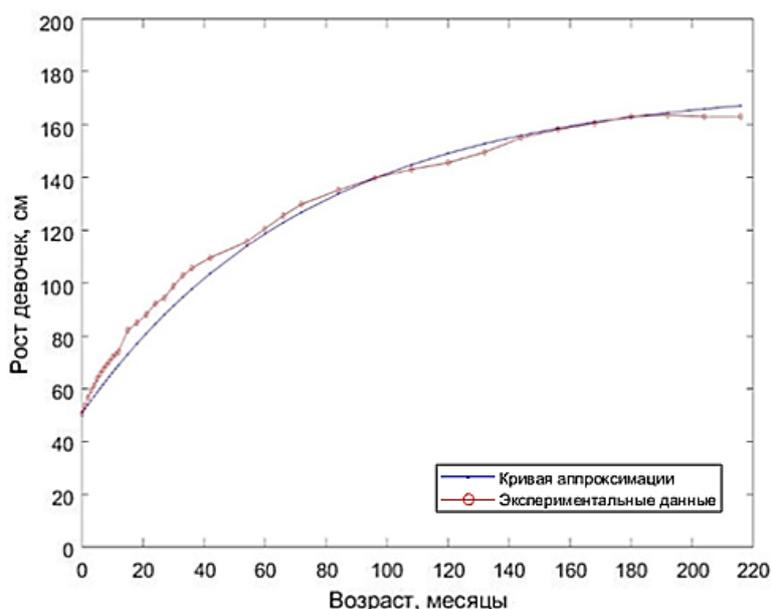


Рисунок 6 – График с наименьшей относительной погрешностью
 Figure 6 – The graph with the lowest relative error

Отклонения от экспериментальных данных на графике находится на приемлемом уровне и обусловлено во многом усреднением статистических данных, так как для каждого конкретного ребенка зависимость роста от возраста является более плавной и еще более близкой к экспоненциальному закону.

Вторым утверждением в выдвигаемой гипотезе является соответствие экспоненциальному закону параметров сердечно-сосудистой системы, связанных с ростом. Одним из таких параметров является минутный объем кровообращения. Зависимость минутного объема кровообращения в *мл/мин* от возраста в месяцах представлена на Рисунке 7.

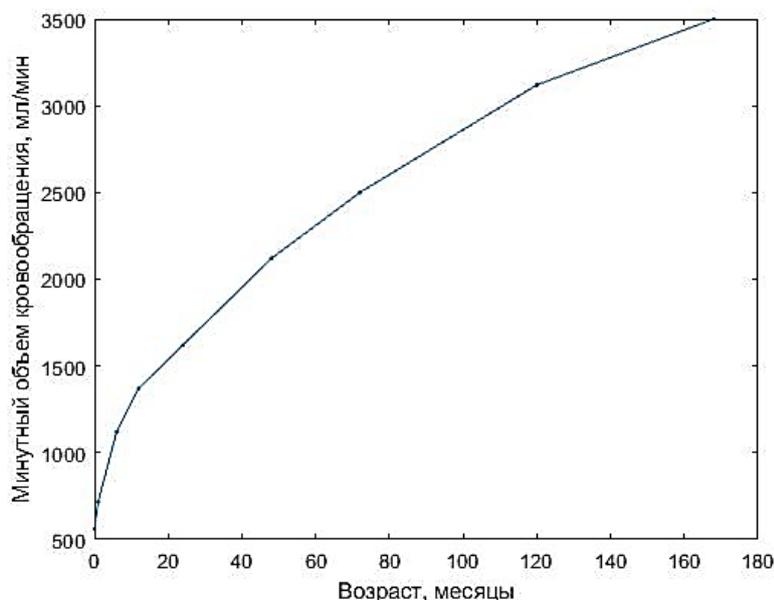


Рисунок 7 – Зависимость минутного объема кровообращения от возраста
 Figure 7 – Dependence of the minute volume of blood circulation on age

По аналогии с расчетом экспоненциального закона, возьмем точки, удовлетворяющие условию 2/1, на максимально близком к началу координат расстоянии и построим получившуюся зависимость.

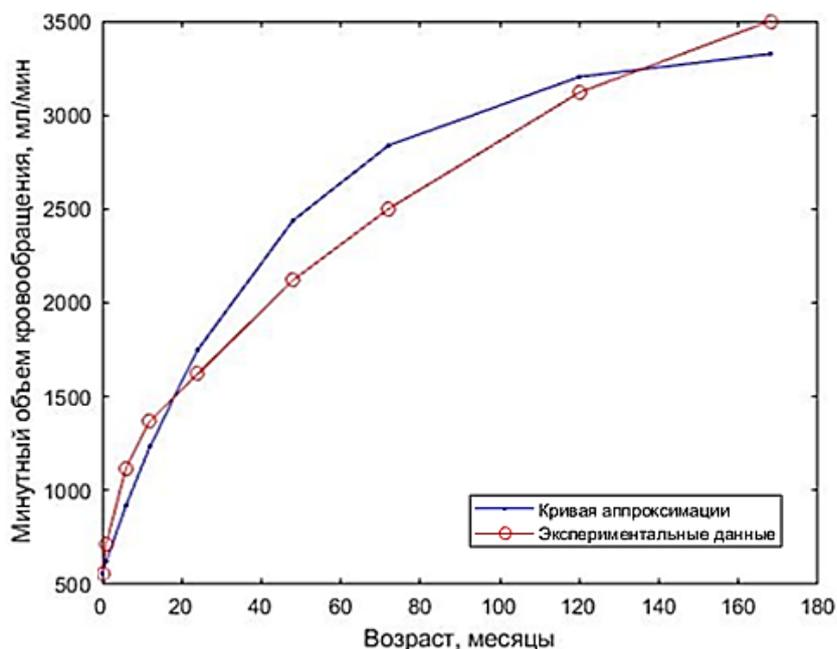


Рисунок 8 – Аппроксимация при погрешности 4,99 %
 Figure 8 – Approximation with an error of 4.99 %

Относительная погрешность при первом расчете составила 4,99 %. Далее проверяем погрешность в каждой удовлетворяющей условию паре точек (Рисунок 8).

Наименьшая из полученных относительных погрешностей составила 0,86 %. График данного случая отражен на Рисунок 9.

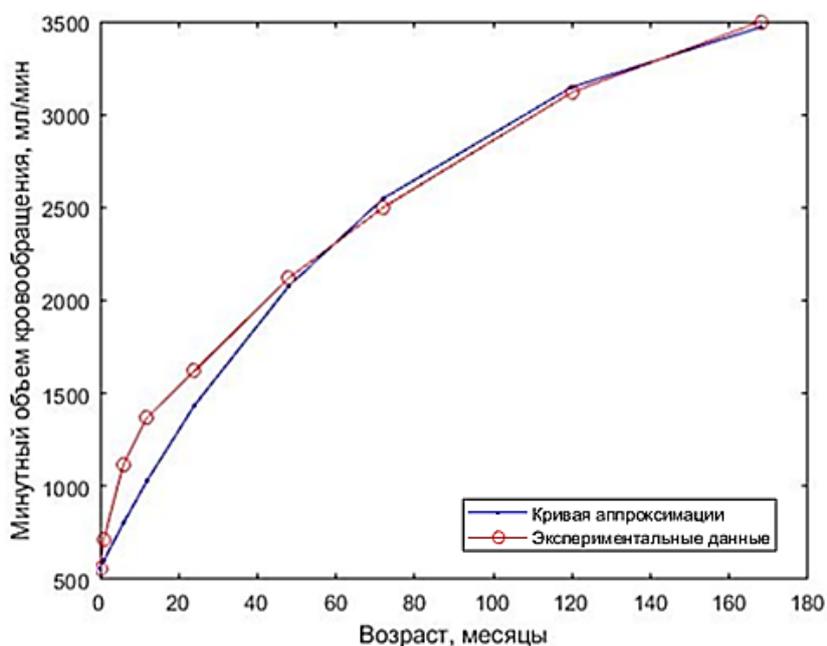


Рисунок 9 – Аппроксимация при погрешности 0,86 %
 Figure 9 – Approximation with an error of 0.86 %

Таким образом, можно сделать вывод от том, что объем минутного кровообращения человека с возрастом меняется в соответствии с экспоненциальным законом. Однако пропорция 2/1 не всегда способна дать удовлетворительный результат. В частности, в вопросе применения экспоненциального закона для прогнозирования состояния организма в будущем, у исследователей может не быть точек, находящихся на необходимом удалении друг от друга, что необходимо для достижения хорошего и достоверного результата.

Решением этой проблемы является применение другого соотношения τ_2 к τ_1 , однако при таком варианте может быть проблематично получение решения системы уравнений в явном виде.

Возьмем к рассмотрению соотношение τ_2 к τ_1 в формуле (5) равным s , при условии, что s является положительным и целочисленным. При выборе данного соотношения невозможно получить решение в явном виде, поэтому воспользуемся численным методом Ньютона. Он относится к числу итерационных методов второго порядка и имеет наибольшую точность нахождения корней нелинейного уравнения.

В общем виде метод Ньютона для решения нелинейных уравнений описывается формулой [9]:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \quad (10)$$

где k – номер итерации.

Приводим уравнение к общему знаменателю аналогично (6) и выполняем преобразования:

$$\ln\left(1 - \frac{R_2}{A}\right) = \ln\left(1 - \frac{R_1}{A}\right)^s. \quad (11)$$

После этого преобразуем обе части уравнения

$$\frac{A-R_2}{A} = \frac{(A-R_1)^s}{A^s}. \quad (12)$$

Для применения метода Ньютона приведем уравнение к нормальному виду $f(A)=0$:

$$f(A) = \frac{(A-R_1)^s}{A^{s-1}} - A - R_2 = 0. \quad (13)$$

После приведения к нормальному виду находим первую производную функции:

$$f'(A) = \frac{(A+R_1 \cdot s - R_1) \cdot (-R_1 + A)^{s-1}}{A^s} - 1. \quad (14)$$

Для определения коэффициента A итерационный процесс проводится с использованием (10), (13), (14). Здесь $A=x_k$.

Результаты

В результате применения итерационного метода Ньютона получаем универсальные формулы, позволяющие найти коэффициенты аппроксимации для любого целочисленного отношения двух рассматриваемых точек.

Для экспериментальной проверки выберем отношение $s=4$, взяв точки роста организма ребенка, которые соответствуют возрасту 15 месяцев и 60 месяцев (Рисунок 10).

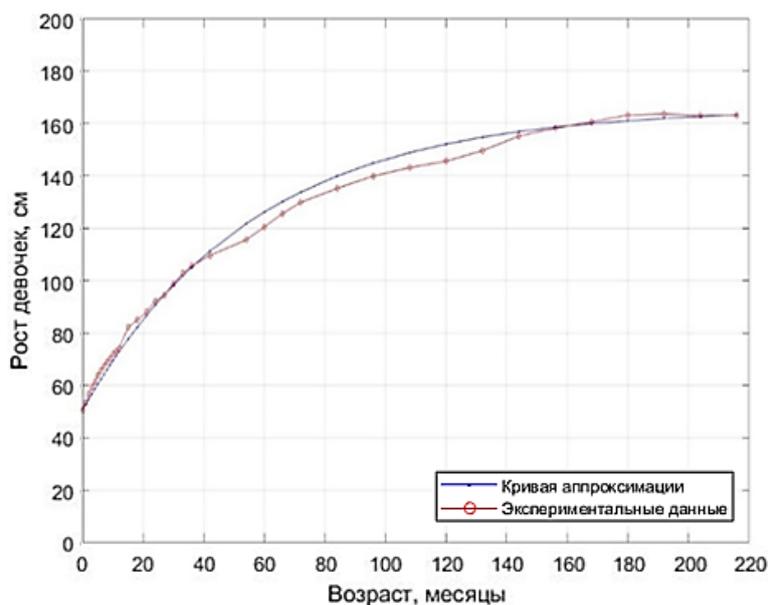


Рисунок 10 – Аппроксимация при $s=4$
Figure 10 – Approximation at $s=4$

Относительная погрешность аппроксимации в данном случае составила 0,09 %. За счет сдвига точек ближе к началу координат точность аппроксимации получилась выше, чем при рассмотрении аналогичного по протяженности интервала с отношением $\tau_2/\tau_1=2$.

Стоит отметить, что и с аналитическим решением и решением через численный метод Ньютона отношение τ_2/τ_1 равнялось четному числу, поэтому последним этапом оценки данного метода аппроксимации является проверка при нечетном значении отношения, а именно $s=5$.

Для выполнения данного соотношения рассмотрим точки, соответствующие возрасту 12 месяцев и 60 месяцев. Рассчитываем значения и строим график (Рисунок 11).

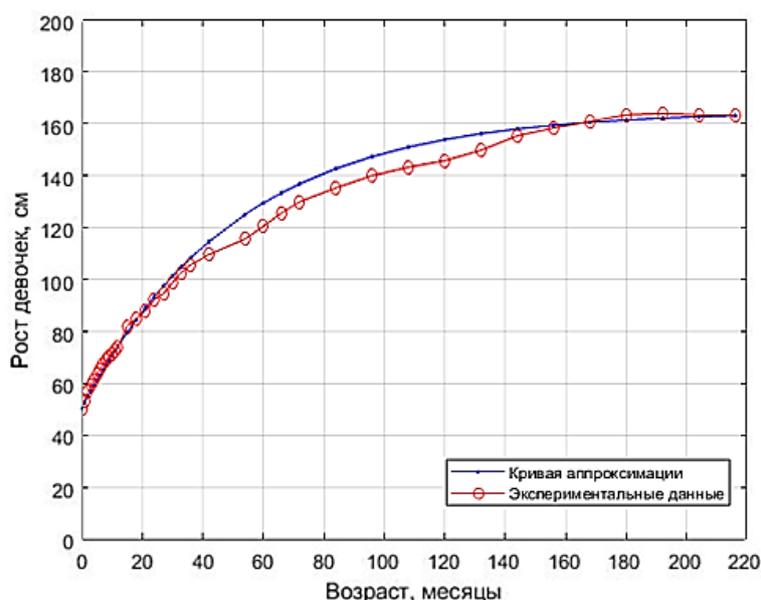


Рисунок 11 – Аппроксимация при $s=5$
Figure 11 – Approximation at $s=5$

Относительная погрешность при моделировании составила 0,15 %. Данное значение говорит о высокой точности работы метода. Однако при сравнении с результатами моделирования, которые были получены при рассмотрении точек, соответствующих 15 и 60 месяцев, можно заметить, что там относительная погрешность ниже при более коротком интервале. Данный факт может говорить о том, что размер интервала должен быть оптимальным и выбор слишком маленького или наоборот слишком большого расстояния между точками может приводить к значительному снижению точности моделирования. При этом стоит отметить, что на данный момент – это лишь гипотеза, которая требует дополнительных исследований для своего подтверждения либо – опровержения.

Достоинством предлагаемой методики является то, что для построения зависимостей изменения параметров сердечно-сосудистой системы от возраста достаточно знать значение параметров для текущего момента времени τ_1 и в любой другой момент времени τ_2 для среднего ребенка данного пола. Выбор времени $\tau_2, \tau_2 > \tau_1$ производится исходя из необходимости достижения заданной точности аппроксимации и имеющихся известных данных для среднего ребенка.

Обсуждение

Следующим закономерным шагом после проверки соответствия выдвинутой гипотезы действительности должно стать объединение двух различных масштабов времени в единую модель.

Наиболее простым вариантом будет использование уже существующей математической модели сердечно-сосудистой системы. При этом стоит отметить, что можно использовать различные математические модели, например, построенные по методу аналогии течения крови в организме с течением тока в электрической цепи [10], а также модели с различными пороками сердца [11]. В таких моделях параметры сердечно-сосудистой системы в соответствии с методом замороженных коэффициентов меняют свои значения по экспоненциальному закону при глобальном масштабе и являются стационарными в локальном масштабе.

Рассмотрим, для примера, такой параметр, как объем левого желудочка в масштабе работы модели $V(t)$ и масштабе роста организма ребенка $V(\tau)$.

В произвольно выбранный момент работы модели объем $V_i(t_0)$ на рассматриваемом участке процесса роста и развития будет отличаться от того же объема на предыдущем рассматриваемом участке $V_{i-1}(t_0)$ на величину:

$$\Delta V = V_i(\tau) - V_{i-1}(t_0). \quad (17)$$

Далее, учитывая свойства квазистационарных систем, мы распространяем величину разницы параметров, которая была найдена в произвольной точке t_0 , на все точки изменения объема левого желудочка на рассматриваемом участке.

Заключение

В статье выдвинута гипотеза о соответствии изменения параметров организма ребенка в процессе роста и развития экспоненциальному закону. Разработан математический аппарат моделирования для реализации и проверки достоверности гипотезы. Проведено исследование гипотезы для различных исходных данных, а также для одних и тех же данных при различных исходных условиях.

Разработан метод объединения модели изменения параметров сердечно-сосудистой системы в процессе роста и развития с нульмерной моделью сердечно-

сосудистой системы, основанный на использовании свойств квазистационарных моделей, в частности, метода замороженных коэффициентов.

Таким образом, реализация предлагаемого механизма взаимодействия моделей позволит получить систему, которая будет описывать состояние сердечно-сосудистой системы ребенка в любом возрасте. Данная модель изменения параметров сердечно-сосудистой системы при совокупном использовании с нульмерными моделями гемодинамики позволит прогнозировать состояние исследуемого организма ребенка на определенный период времени в будущем, что является важным инструментом, например, в планировании таких вмешательств, как хирургическое устранение врожденных пороков сердца.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бокарева А.А. Сбор и анализ данных по сердечно-сосудистым заболеваниям на фоне Covid-19 для выявления закономерностей и вероятных прогнозов на основе существующей статистики. В сборнике: *Пятидесятая научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО: Альманах научных работ молодых учёных Университета ИТМО: Том 3, 01-04 февраля 2021 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО; 2021. С. 26–30.
Bokareva A.A. Sbor i analiz dannykh po serdechno-sosudistym zabolevaniyam na fone Covid-19 dlya vyyavleniya zakonomernostei i veroyatnykh prognozov na osnove sushchestvuyushchei statistiki. In: *Pyatidesyataya nauchnaya i uchebno-metodicheskaya konferentsiya Universiteta ITMO: Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchennykh Universiteta ITMO: Volume 3, 01-04 February 2021, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: ITMO University; 2021. pp. 26–30. (In Russ.).
2. Холл Дж.Э. *Медицинская физиология по Гайтону и Холлу*. Москва: Логосфера; 2018. 1328 с.
Hall J.E. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. Moscow: Logosfera; 2018. 1328 p. (In Russ.).
3. Бокерия Л.А., Гудкова Р.Г., Милюевская Е.Б., Кудзоева З.Ф., Прянишников В.В. *Сердечно-сосудистая хирургия-2016. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения*. Москва: Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева; 2017. 228 с.
Bokeriya L.A., Gudkova R.G., Milievskaya E.B., Kudzoeva Z.F., Pryanishnikov V.V. *Serdechno-sosudistaya khirurgiya-2016. Bolezni i vrozhdennye anomalii sistemy krovoobrashcheniya*. Moscow: A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery; 2017. 228 p. (In Russ.).
4. Лищук В.А. *Математическая теория кровообращения*. Москва: Медицина; 1991. 256 с.
Lishchuk V.A. *Matematicheskaya teoriya krovoobrashcheniya*. Moscow: Meditsina; 1991. 256 p. (In Russ.).
5. Frolov S.V., Sindeev S.V., Lischouk V.A., Gazizova D.S., Liepsch D., Balasso A. A lumped parameter model of cardiovascular system with pulsating heart for diagnostic studies. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2017;17(3). <https://doi.org/10.1142/S0219519417500567>
6. Al-Mayah A. *Biomechanics of Soft Tissues: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 188 p. <https://doi.org/10.1201/9781351135825>

7. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др. *Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления.* Москва: Высшая школа; 1986. 367 с.
Babakov N.A., Voronov A.A., Voronova A.A. et al. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. V 2-kh ch. Ch. I. Teoriya lineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniya.* Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 367 p. (In Russ.).
8. Фролов С.В., Лядов М.А., Остапенко О.А. Экспертная система оценки физического развития ребенка на основе аппарата реляционной алгебры. *Биотехносфера.* 2013;(6):28–39.
Frolov S.V., Lyadov M.A., Ostapenko O.A. Expert system for the physical development of children based on apparatus of the relational algebra. *Biotekhnosfera.* 2013;(6):28–39. (In Russ.).
9. Яблонский А.И., Кузнецов А.В., Шилкина Е.И. и др. *Высшая математика. Общий курс.* Минск: Вышэйшая школа; 2000. 352 с.
Yablonskii A.I., Kuznetsov A.V., Shilkina E.I. et al. *Vysshaya matematika. Obshchii kurs.* Minsk: Vysheishaya shkola; 2000. 352 p. (In Russ.).
10. Петухов Д.С., Тельшев Д.В. Математическая модель сердечно-сосудистой системы педиатрических пациентов с врожденными пороками сердца. *Медицинская техника.* 2016;(4):9–11.
Petukhov D.S., Telyshev D.V. A Mathematical Model of the Cardiovascular System of Pediatric Patients with Congenital Heart Defect. *Biomedical Engineering.* 2016;50(4):229–232. <https://doi.org/10.1007/s10527-016-9626-y>
11. Szabó G., Soans D., Graf A., Beller C.J., Waite L., Hagl S. A new computer model of mitral valve hemodynamics during ventricular filling. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery.* 2004;26(2):239–247. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2004.03.018>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фролов Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры Биомедицинская техника, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация.
e-mail: Sergei.frolov@gmail.com
ORCID: [0000-0003-2917-535X](https://orcid.org/0000-0003-2917-535X)

Sergey V. Frolov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, the Russian Federation.

Судаков Дмитрий Евгеньевич, ассистент кафедры Биомедицинская техника, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация.
e-mail: sudakov.dima1702@yandex.ru

Dmitry E. Sudakov, assistant at the Department of Biomedical Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, the Russian Federation.

Старых Даниил Геннадиевич, магистрант кафедры Биомедицинская техника, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация.
e-mail: staryh.danya@yandex.ru

Daniil G. Starykh, Master at the Department of Biomedical Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 03.07.2024; одобрена после рецензирования 11.07.2024; принята к публикации 15.07.2024.

The article was submitted 03.07.2024; approved after reviewing 11.07.2024;

accepted for publication 15.07.2024.