

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПРОТОЧНЫХ КАНАЛОВ ЛЕВЫХ ОТДЕЛОВ СЕРДЦА И АОРТЫ – НОВЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2025 г. И. А. Беглов<sup>2</sup>, Е. А. Талыгин<sup>1</sup>, Я. Е. Жарков<sup>1</sup>, А. Ю. Городков<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ “Научный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава России, Москва, 121552 Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ высшего образования “МИРЭА – Российский технологический университет”, Москва, 119454 Россия

\*e-mail: agorodkov@bk.ru

Поступила в редакцию 03.12.2024 г.

После доработки 18.12.2024 г.

Принята к публикации 22.12.2024 г.

Применяемые в настоящее время имплантаты, замещающие функцию сегментов кровеносного русла в центральных отделах сердечно-сосудистой системы, не учитывают гидродинамические особенности структуры физиологического потока крови в полостях сердца и аорте. Предложен формальный алгоритм геометрического моделирования обтекаемых поверхностей этого отдела на примере нормальной динамической анатомии. Показано, что обтекаемые поверхности проточных каналов в этом сегменте кровообращения могут быть с достаточной точностью аппроксимированы зависимостями для линий тока, вытекающими из точных решений основных уравнений гидродинамики для класса центростремительных закрученных течений вязкой жидкости. Предлагаемый алгоритм позволяет с высокой точностью восстановить форму проточных каналов в тех сегментах, которые могут быть реконструированы или протезированы. Использование данного метода имеет значение для разработки методов диагностики состояния потока, планирования и проведения реконструктивных операций на сердце и магистральных сосудах, а также для конструирования имплантатов, функционирующих в потоке крови.

*Ключевые слова:* геометрическое моделирование, сердечно-сосудистая система, левые отделы сердца, аорта, закрученный поток крови, протезы для кардиохирургии

DOI: 10.56304/S023427582501003X

Норма геометрической конфигурации проточных каналов центральных отделов кровообращения все еще остается в области эмпирических исследований, и не имеет формального аналитического описания, несмотря на значительный массив накопленных данных. Такое описание необходимо с нескольких точек зрения: оно позволяет раскрыть механизмы формообразования и ремоделирования проточных каналов сердца и магистральных сосудов, существенно повысить качество диагностики состояния потока крови и кровеносного русла, обосновать корректность проводимых реконструктивных операций, пересмотреть концепцию конструирования и критерии эффективности имплантатов для сердечно-сосудистой хирургии.

С 30 годов прошлого столетия все большее внимание уделяется закрученной структуре потока крови в полостях сердца и крупных сосудах [1, 2].

Действительно, упорядоченное течение, в том числе и закрученное, является более энергетически выгодным в сравнении с турбулентным.

В ранее опубликованной работе [3] нами был предложен метод анализа структуры закрученных течений на основе точных решений нестационарных уравнений гидродинамики Кикнадзе–Краснова [4], путем сведения к квазистационарным решениям для вихря Бюргерса [5]. В нашей работе, в частности, утверждалось, что на всех этапах эволюции струи крови продольно-радиальный профиль проточного канала должен удовлетворять требованию  $zR^2 = Const$ , где  $z$  – текущая продольная координата,  $R$  – соответствующий радиус. Это утверждение было основано на экспериментальных данных [3].

Обоснованное с точки зрения гидродинамики геометрическое моделирование сегментов сердечно-сосудистой системы дает ключ к конструированию и разработке технологии создания но-

вых, более эффективных имплантатов, таких как протезы клапанов сердца и кровеносных сосудов, имплантируемых вспомогательных насосов и искусственного сердца.

Целью настоящей работы являлось формальное описание нормальной геометрической конфигурации аорты с учетом закрученной гидродинамической структуры потока в соответствии с квазистационарными решениями основных уравнений гидродинамики для обоснования методов диагностики состояния потока, корректности реконструктивных операций и конструкции протезов сегментов кровеносного русла в центральных отделах сердечно-сосудистой системы.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данном исследовании была поставлена задача геометрического моделирования биологических поверхностей на основе их трехмерных триангулированных компьютерных моделей в формате "stl". Имеющиеся файлы сгенерированы на базе томографических снимков здорового человека при помощи программы "Inobitec DICOM viewer 2.6", моделирование морфометрической линейки выполнялось в "Blender 2.93", геометрическое моделирование выполнено в программе "Компас-3D". Такой комплекс программ традиционно используется для решения задач моделирования криволинейных поверхностей [6].

Построение геометрической модели циклической поверхности можно выполнить на базе уравнений её пространственной кривой оси [7, 8].

Исходя из точных решений Кикнадзе—Краснова [4], линии тока центростремительного закрученного течения в проекции на продольно-радиальную плоскость описываются выражением

$$z = \frac{B}{r^2}, \quad B = const,$$

где  $z$ ,  $r$  — продольная и радиальная координаты вдоль струи,

$B$  — произвольная константа, пропорциональная объему струи.

Учитывая, что начало цилиндрической системы координат, в которой описывается струя не известно, аппроксимирующая функция должна быть представлена в виде:

$$(z_0 + z_i) r_i^p = B, \quad (1)$$

где  $z_0$  — расстояние от начала координат до первой точки измерения,

$z_i$  — измеряемые значения продольной координаты,

$r_i$  — измеряемые значения радиальной координаты,

$p$  — показатель степенной функции и  $B$  — значение константы.

Если результаты аппроксимации покажут, что значение показателя степени близко к 2, а величина  $z_0$ , вычисляемая методом наименьших квадратов, имеет порядок соответствующего размера полостей сердца, можно считать, что условия решений Кикнадзе—Краснова [4] выполнены. Эти решения могут быть использованы для описания и моделирования такого течения и границ, в которых оно осуществляется.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в экспериментах значения степени ( $p$ ) переменной ( $r$ ) указывают на единообразие формообразования для исследуемых поверхностей в момент максимальной производительности потока крови. Все полученные значения степени при  $r$  близки к двум. Следовательно, при построении аппроксимирующей поверхности целесообразно применить степень  $p$  равную двум. Уравнение (1) можно представить как функцию  $r$  от аргумента  $z$ . Тогда оно приобретет вид:

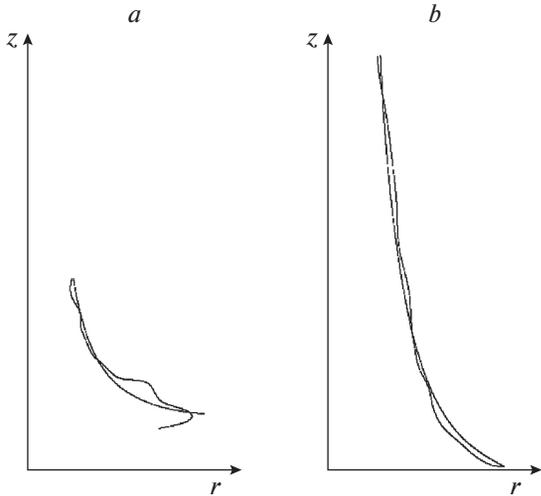
$$r = \left( \frac{c}{z_0 + z} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Отметим, что исследуемая функция имеет смысл только при положительных значениях функции и аргумента поэтому при переходе от (1) к (2) потеря корней уравнения не влияет на конечный результат.

Результирующие уравнения были использованы в качестве аппроксимирующих функций для анализа экспериментальных зависимостей радиуса кривизны стенки каналов левого предсердия ( $a$ ) и левого желудочка вместе с аортой ( $b$ ) от продольной координаты вдоль канала, представленных на рис. 1.

Для построения поверхности аппроксимирующей формы системы желудочек-аорта (рис. 2) необходимо получить модель ее пространственной кривой оси. В рамках данного исследования для этой цели была использована сплайновая кривая, построенная на центрах сфер, вписанных в просвет канала. Выбор способа построения сплайна в данном случае остается открытым. В нашем решении была использована рациональная кривая Безье [9].

Закрученная структура потока крови может сформироваться только в проточном канале определенной геометрической конфигурации. Эта конфигурация определена направлением линий тока течения, трехмерное поле скоростей которого описано уравнениями Кикнадзе—Краснова. Для обеспечения нормального закрученного потенциального течения кривизна обтекаемых поверхностей



**Рис. 1.** Соответствие графиков, аппроксимирующих и экспериментальных-зависимостей радиуса кривизны проточных каналов от продольной координаты вдоль канала. *a* – Изменение радиуса кривизны обтекаемой поверхности левого предсердия вдоль оси закрученной струи; *b* – изменение радиуса системы левого желудочка-аорты вдоль оси проточного канала.

**Fig. 1.** Correspondence of the plots of the approximate and experimental curves of the dependence of the radius of curvature of the streamlined surface of flow channels on the longitudinal coordinate along the channel. *a* – Change in the radius of curvature of the streamlined surface of the left atrium along the axis of the swirling jet; *b* – change in the radius of the left ventricular and aortic canal with an open aortic valve along the longitudinal axis of the swirling jet.

проточного канала должна соответствовать этим условиям.

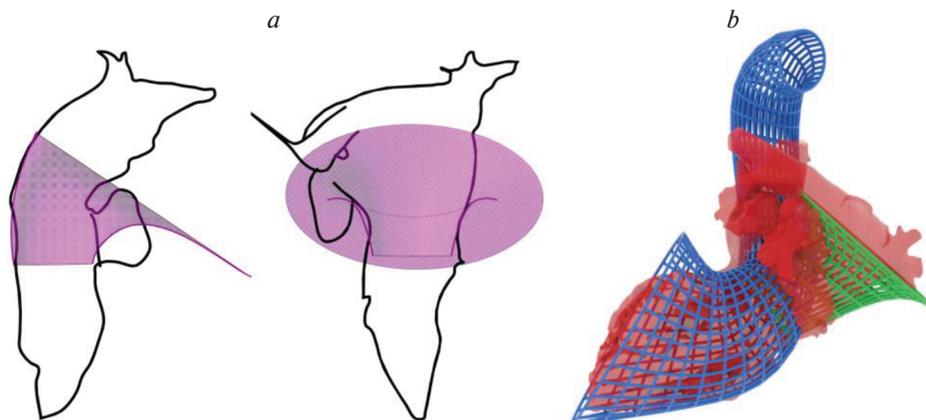
Это позволяет сформулировать новые количественные критерии диагностики состояния потока и кровеносного русла в этом сегменте кровообра-

щения, формально описать целевую геометрическую конфигурацию русла при проведении реконструктивных операций на сердце и магистральных сосудах, геометрическую форму имплантатов, замещающих функцию пораженных клапанов, сосудов или всего сердца.

С точки зрения диагностики, предложенный подход позволяет оценить, насколько существенно меняется структура потока крови при искажении геометрической конфигурации русла. Сравнение измененной формы с шаблоном, полученным в результате геометрического моделирования, и проведение соответствующих расчетов с помощью доступных гидродинамических программ Computer Flow Dynamics (CFD) предоставит исчерпывающие данные о состоянии потока, локализации мест пертурбаций потока, застойных и отрывных зонах, являющихся критическими для образования и отрыва тромбов.

Для реконструктивной кардиохирургии предложенный метод позволит оптимизировать целевую геометрическую конфигурацию русла в результате операции. Это особенно важно при вмешательствах на клапанах сердца, вентрикулопластике и операциях на аорте. Последовательное геометрическое моделирование и анализ с помощью CFD предоставляет новые возможности планирования хирургических вмешательств, направленных на восстановление нормальной функции кровообращения.

Используемые сегодня имплантаты, замещающие различные сегменты кровеносного русла центральных отделов кровообращения, вообще не учитывают гидродинамические особенности течения крови. Геометрическая форма протезов клапанов, упруго-деформационные характеристики протезов кровеносных сосудов, форма рабочих камер вспо-



**Рис. 2.** Геометрические модели левых отделов сердца. *a* – Совместные изображения с двух ракурсов: левое предсердие, сегмент аналитической аппроксимирующей поверхности; *b* – Совместное изображение 3D-моделей: триангуляционная модель левых отделов сердца и аорты; аналитическая модель, аппроксимирующая форму предсердия (зеленый цвет); аналитическая поверхность, аппроксимирующая систему левый желудочек-аорта (синий цвет).

**Fig. 2.** Geometric models of the left heart cavities. *a* – Joint images from two angles: left atrium and segment of the analytical approximating surface; *b* – Joint image of 3D models: triangulation model of the left heart and aorta and analytical model approximating the shape of the atrium (green), and the left ventricle-aorta system (blue).

могательных насосов и моделей имплантируемого сердца в принципе не позволяет сформировать физиологически адекватный потенциальный закрученный поток крови. Это является основной причиной серьезных осложнений, возникающих в результате использования этих устройств, необходимости пожизненного приема антикоагулянтов и существенного ухудшения качества жизни пациентов.

Пересмотр конструктивных и технологических подходов к созданию изделий этого класса требует коррекции всего комплекса нормативной документации, испытательного оборудования, выбора материалов и т.д.

Таким образом, предложенный подход формального описания геометрической конфигурации обтекаемых поверхностей полостей сердца и главных сосудов необходим для диагностики, планирования и проведения реконструктивных операций на сердце и магистральных сосудах, модернизации класса имплантируемых устройств, используемых в кардиохирургии.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-15-00148).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bremer J.* Presence and influence of spiral streams in the heart of the chick embryo. *Am. J. Anat.*, 1932, 49, 409–440.
2. *Markl M., Kilner P.J., Ebbers T.* Comprehensive 4D velocity mapping of the heart and great vessels by cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. R.*, 2011, 13, 7.  
<https://doi.org/10.1186/1532-429X-13-7>
3. *Агафонов А.В., Талыгин Е.А., Бокерия Л.А., Городков А.Ю.* Гидродинамические особенности закрученного потока крови в левых отделах сердца и аорте. *Acta Naturae*, 2021, 13(4), 4–16.  
<https://doi.org/10.32607/actanaturae.11439>
4. *Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К.* Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости. *Докл. АН. СССР*, 1986, 290(6), 1315–1319.
5. *Burgers J.M.* A mathematical model illustrating the theory of turbulence. In: *Advances in applied mechanics*. Elsevier 1948, 1, 171–199.
6. *Бойков А.* Возможная реализация геометрических преобразований в САД-системах САПР и графика, 2023, 2, 58–64.
7. *Beglov I.A.* Computer geometric modeling of quasi-rotation surfaces *J. Phys. Conf. Ser.*, 2021, 1901, 012057.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012057>
8. *Панчук К.Л., Мясоедова Т.М.* Поверхность нелинейного вращения, Омский научный вестник, 2023, 4(188), 5–12.  
<https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-5-12>
9. *Panchuk K., Myasoedova T., Lyubchinov E.* Spline curves formation given extreme derivatives. *Mathematics*, 2021, 9(1), 1–29.  
<https://doi.org/10.3390/math9010047>

## A New Approach to the Development of Medical Technologies: Parameterisation of the Shape of the Left Heart and Aortic Ducts

I. A. Beglov<sup>b</sup>, E. A. Talygin<sup>a</sup>, Y. E. Zharkov<sup>a</sup>, and A. Y. Gorodkov<sup>a, b, #</sup>

<sup>a</sup>*Scientific Medical Research Centre of Cardiovascular Surgery named after A.N. Bakulev' of the Ministry of Health of Russia, Moscow, 121552 Russia*

<sup>b</sup>*MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: agorodkov@bk.ru*

**Abstract**—Currently used implants, replacing the function of blood channel segments in the central parts of the cardiovascular system, do not take into account the hydrodynamic features of the structure of physiological blood flow in the cardiac chambers and the aorta. A formal algorithm of geometric modelling of streamlined surfaces of this department on the example of normal dynamic anatomy is proposed. It is shown that the streamlined surfaces of the flow channels in this segment of the blood circulation can be approximated with sufficient accuracy by dependencies for the flow lines arising from the exact solution of the basic equations of hydrodynamics for the class of centripetal swirling flows of viscous fluids. The proposed algorithm to restore with high accuracy the shape of flow channels in those segments that can be reconstructed or prosthetic. The use of this method is important for the development of methods for diagnostics of the flow state, planning and performance of reconstructive operations on the heart and major vessels, as well as for the design of implants functioning in the blood flow.

**Keywords:** geometric modelling, cardiovascular system, left heart, aorta, swirling blood flow, prostheses for cardiac surgery