

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАП РАН



Никитин Илья  
Степанович

2022 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Симакова Сергея Сергеевича  
«Многомасштабное моделирование кровотока в сердечно-сосудистой системе»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Диссертация посвящена созданию комплексного многомасштабного подхода к математическому моделированию гемодинамических параметров в сердечно-сосудистой системе человека при некоторых патологиях и сосудистых операциях по устранению стенозов.

#### **Актуальность темы исследования.**

Использование моделей механики сплошных сред в новых областях, таких, как, физиология и медицина, является популярным и актуальным междисциплинарным направлением в последние два десятилетия. В том числе достигнут ряд успехов в разработке моделей кровообращения, дыхания, переноса веществ. Однако многие известные на сегодняшний день работы имеют теоретический характер и описывают физиологические процессы качественно. Актуальность рассматриваемой работы в первую очередь обусловлена ее практической направленностью на конкретные прикладные задачи

в сосудистой хирургии с сохранением единого комплексного подхода, основанного на законах и принципах классической механики.

#### **Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 265 страниц с 54 рисунками и 26 таблицами. Список литературы содержит 302 наименования.

#### **Научная новизна.**

В диссертации впервые предложен взаимосвязанный набор математических моделей разных пространственных и временных масштабов для решения медицинских задач. Параметры моделей, а также начальные и краевые условия задаются на основе данных медицинских протоколов, используемых в большинстве медицинских учреждений, специализирующихся на лечении сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Все модели основаны на классических физических принципах (законах сохранения). При построении математических моделей учтены доступность клинических данных и доступность вычислительных ресурсов. Достигнута хорошая точность при моделировании кровотока в сердечно-сосудистой системе пациентов.

#### **Практическая и научная ценность работы.**

В диссертации представлено теоретическое обоснование представимости одномерной модели гемодинамики в виде системы нелинейных гиперболических уравнений. Впервые предложенные граничные условия в областях соединения однотипных сосудов обеспечивают переход решения к решению в одном сплошном сосуде при соответствующем выборе параметров. Все ранее использовавшиеся постановки граничных условий действительно не обладали таким свойством. Теоретически обоснована новая модель течения в глубоких венах. Использование неотражающих граничных условий является широко распространенным инструментом, однако для задач вычислительной гемодинамики они, по всей видимости, использованы впервые. Модель кровотока в сердце с учётом динамики открытия и закрытия клапанов более корректно описывает динамику сердечного выброса.

Практическое использование модели микроциркуляторного кровотока при опухолевом ангиогенезе позволяет создавать более точные модели роста опухоли и разрабатывать эффективные стратегии антиангиогенной терапии. Методика моделирования сердечно-сосудистой системы пациента с патологиями и методика вычислительного прогнозирования гемодинамических характеристик после сосудистых операций по устранению стеноза имеют практическую значимость с точки зрения их

использования в центрах, специализирующихся на сердечно-сосудистых хирургических операциях по устранению стенозов.

Подтверждением высокой практической ценности диссертации является то, что ее результаты уже использованы в научных исследованиях представителями двух известных медицинских организаций: НМИЦ Глазных болезней им. Гельмгольца и Сеченовского университета для комплексного исследования микроциркуляции глаза при субклиническом атеросклерозе и артериальной гипертензии, и для неинвазивной оценки фракционного резерва коронарного кровотока при помощи одномерной математической модели у пациентов с ишемической болезнью сердца.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.**

Достоверность полученных результатов и выводов обусловлена тем, что при разработке математических моделей и численных методов использованы обоснованные теоретические выводы и строгий математический аппарат. Результаты теоретических исследований подтверждены численными расчётами модельных задач, а также проведены сравнения численных решений с хорошо известными физиологическими, лабораторными и медицинскими данными. Результаты многократно обсуждались на ведущих российских и международных конференциях и научных семинарах.

#### **Замечания по работе:**

1. В работе не представлены результаты численных расчетов кровотока в венах.
2. Не до конца ясно предназначение неотражающих граничных условий, поскольку сердечно-сосудистая система является замкнутой. Как вариант крупные артерии постепенно уменьшаются и соединяются с областями микроциркуляции. Как неотражающие граничные условия соотносятся с этими двумя ситуациями?
3. Из работы не ясно, каким образом проводится персонализированное моделирование течения крови в микрососудистом русле.

**Общая оценка работы.** Приведенные замечания относятся скорее не к существу, а к форме представления результатов. Работа выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты представляют научную ценность. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 47 работах в изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science или входящих в список ВАК. Диссертация удовлетворяет всем требованиям пунктов Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Симаков Сергей Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв ведущей организации на диссертацию обсуждён и одобрен на научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации проектирования Российской академии наук 21 июня 2022 г., протокол № 3.

Отзыв составил


Ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
автоматизации проектирования  
Российской академии наук

д.ф.-м.н.

Почтовый адрес: 123056, Москва, 2-ая  
Брестская ул, д.19/18

Телефон: 8 (499) 250-02-62

Адрес электронной почты:  
[sfortova@mail.ru](mailto:sfortova@mail.ru)

  
Фортова С.В.

«23» июня 2022 г.

Подпись сотрудника ФГБУН ИАП РАН удостоверяю

*Зам. директора*  
  
Изюров Д.М.



«23» июня 2022 г.