

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Кучумова Алексея Геннадьевича

на диссертационную работу *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 разработке комплексного многомасштабного подхода к моделированию кровотока в сердечно-сосудистой системе человека, включающей математические модели, их численную дискретизацию и реализацию в виде программного комплекса.

Актуальность темы исследования.

Использование результатов математического моделирования кровообращения в медицинских центрах, специализирующихся на сердечно-сосудистой хирургии, как правило, сопряжено с рядом трудностей. С одной стороны, для настройки параметров математических моделей требуется набор данных, которые не всегда возможно измерить у пациента в силу организационных, технических и других причин. С другой стороны, медицинские работники, как правило, не имеют достаточной квалификации и вычислительной инфраструктуры для настройки и использования сложных математических моделей. Данная работа устраняет указанные недостатки и, поэтому, безусловно, актуальна.

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 практических клинических 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 физических принципах (законах сохранения). При их разработке соблюден баланс между доступностью клинических данных, требованиям к вычислительным ресурсам и адекватным воспроизведением физиологических процессов в сердечно-сосудистой системе.

Практическая и научная ценность работы. В диссертации представлен теоретический анализ и обоснование условий, при которых одномерную модель гемодинамики корректно рассматривать в виде системы нелинейных гиперболических уравнений. Ценность новых граничных условий в области соединения сосудов состоит в том, что их использование обеспечивает предельный переход решения к решению в одном сплошном сосуде. Данный факт продемонстрирован в работе с помощью вычислительных экспериментов. В работе теоретически обоснована новая модель течения в глубоких венах. Неотражающие граничные условия в конечных точках сосудов представляют практический интерес для проведения тестовых расчетов в урезанных фрагментах сосудистых сетей. Оригинальная модель кровотока в сердце с учётом динамики открытия и закрытия клапанов более детально и корректно описывает динамику сердечного выброса в зависимости в том числе от частоты сердечных сокращений и патологий клапанов.

Практическое использование модели микроциркуляторного кровотока при прорастании сосудов вблизи опухоли представляет интерес с точки зрения создания новых моделей развития опухоли и разработке эффективных стратегий антиангиогенной терапии. Методика моделирования сердечно-сосудистой системы пациента с патологиями и методика вычислительного прогнозирования гемодинамических характеристик после сосудистых операций по устранению стеноза представляют практический интерес для медицинских специалистов в центрах сердечно-сосудистой хирургии.

Практическую междисциплинарную ценность диссертации подтверждает то, что ее результаты уже использованы в двух работах на соискание степени кандидата медицинских наук. В одной из них проводились комплексные исследования микроциркуляции глаза при субклиническом атеросклерозе и артериальной гипертензии, а во второй проводилась неинвазивная оценка 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 клиническими данными. Результаты многократно обсуждались на ведущих российских и международных конференциях и научных семинарах.

Замечания по работе:

1. Из диссертации неясен смысл определения значений параметров $K_k^f, K_k^p, K_k^b, K_k^v$ для конкретного пациента. В будущем, при развитии модели возможна разработка алгоритма для определения всех параметров модели сердца (табл. 1.4) или как минимум оценка значимости каждого из параметров вследствие огромной трудоемкости процедуры идентификации.
2. В работе было бы уместно привести численные оценки при сравнении результатов 1-мерной и 3-мерной моделей извитости сонной артерии. Также следовало бы более детально обсудить ограничения и предположения при одномерном моделировании. Насколько следует из работы: эволюция развития патологической извитости при кровотоке не рассматривалась. Моделирование течения рассматривалось лишь при заданной геометрии изгиба. При

патологической извитости роль изменения формы имеет важное значение для прогрессирования заболевания и изменения гемодинамики, соответственно.

3. В работе на соискание степени по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» получено лишь одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ по теме диссертации. Насколько программный комплекс для численного моделирования системы вентиляции зданий соотносится с темой рассматриваемой диссертации?

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».

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., доцент кафедры
вычислительной математики, механики и
биомеханики факультета прикладной
математики и механики ФГАОУ ВО
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета

Кучумов Алексей
Геннадьевич



« 15 » августа 2022 г.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29
Телефон: +7 (342) 239-17-02
e-mail: kuchumov@inbox.ru



Подпись Кучумов А.Г.

ЗАВЕРЯЮ:

ученый секретарь ПНИПУ

В.И. Макарович

« 15 » августа 2022 г.