

Отзыв официального оппонента  
на диссертационную работу Гамилова Тимура Мударисовича  
«Математическое моделирование кровотока при механических воздействиях на сосуды»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ».

Диссертация Гамилова Тимура Мударисовича «Математическое моделирование кровотока при механических воздействиях на сосуды» посвящена развитию моделей и соответствующих численных методов в рамках квазиодномерного описания кровотока человека. Квазиодномерное описание течения крови в сложной, близкой к реальной системе эластичных сосудов является в настоящее время одним из перспективных подходов к моделированию течения крови в сердечно-сосудистой системе в целом. Полнота такого моделирования, помимо описания самого течения крови в сосудах, зависит от качества и возможности моделирования процессов и органов, влияющих на характер кровотока. Таких факторов и отдельных органов огромное количество, и в настоящее время идет процесс создания и накопления различных моделей, их описывающих. Разработка многих моделей требует зачастую применения самых неожиданных подходов для получения физиологически адекватных результатов моделирования. К этому направлению относится данная работа, что и обуславливает ее актуальность и теоретическую значимость.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации 13 составляет 151 страницу, включая 60 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы основные результаты, их научная новизна и практическая ценность, описан личный вклад автора в публикациях.

Первая глава посвящена обзору литературы по математическим моделям кровотока и медицинским процедурам, рассматриваемым в работе. Глава состоит из краткой исторической справки об изучении кровеносной системы, обзора математических моделей кровотока, в котором затронуты вопросы поиска аналитического решения, моделирования областей ветвления сосудов, постановки граничных условий. Представлен обзор работ по рассматриваемым в работе физиологическим процессам, медицинским процедурам и их моделям, даются разъяснения по некоторым медицинским терминам.

Во второй главе описана используемая математическая модель. За основу взята незамкнутая квазиодномерная модель гемодинамики. Приведены основные соотношения, используемые граничные условия и системы уравнений в точках ветвления сосудов. Описаны предложенные автором модификации модели, позволяющие учитывать внешнее давление на сосуды и эффект миогенной ауторегуляции. Модификации состоят в задании периодической функции внешнего давления, профиль которого зависит от типа воздействия, и учета способности сосудов менять свою эластичность в зависимости от среднего давления. Кроме того, в случае коронарного кровотока предложено менять сопротивление терминальных сосудов для имитации возрастающего в систолу периферического сопротивления. В конце главы приводятся основные уравнения построенной модели и сведения по вопросу существования гладкого решения.

В третьей главе описан выбранный численный метод. Решаемая система уравнений приводится к характеристическому виду, выписана используемая в работе численная схема. Значительное внимание автором уделено модификации численной дискретизации уравнений для вычисления значений на границе на основе характеристического метода. Построены аппроксимации характеристического условия, имеющие первый и второй порядок. Исследована сходимость численного решения с использованием описанных модификаций на примерах отдельного сосуда и бифуркации.

Четвёртая глава описывает применение построенных моделей в некоторых прикладных задачах. Апробация моделей происходит путем сравнения результатов расчетов с клиническими экспериментальными данными. Часть тестов при этом оперирует сугубо качественным сравнением (окклюзионный тест, кровоток в коронарных артериях). Рассмотрена задача моделирования кровотока при работе мышечного насоса, предложено функцию клапанов в венах описывать повышенной вязкостью для попятного течения. При этом используется незамкнутая модель кровотока в большом круге кровообращения с фиксированным сердечным ритмом и выбросом. Рассмотрены задачи математического моделирования кровотока при стенотическом поражении бедренной артерии и наружной контрпульсации. Глава завершается описанием методики оценки гемодинамической значимости стенозов в коронарных артериях, основанной на вычислении фракционированного резерва кровотока. Методика протестирована на чувствительность к изменению различных параметров: частоте сердечных сокращений, эластичности сосудов и т.д. Заслуживающим отдельного внимания результатом является воспроизведенная методами вычислительного эксперимента зависимость между частотой бега атлетов спринтеров и величиной кровотока через нижние конечности.

В выводах обсуждаются основные ограничения, недостатки и преимущества предложенных в работе модели и методик.

В заключении сформулированы основные результаты работы. В приложениях приведены построенные в работе структуры сосудов, а также дается описание программного комплекса, используемого для расчетов.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Новизна результатов состоит в разработке новых математических моделей ряда физиологических процессов, способов их практического применения. Предложены модификации традиционного вычислительного явного алгоритма решения уравнений гемодинамики на графе сосудов.

Практическая ценность работы представлена созданием ряда моделей, которые могут быть использованы как для развития общих моделей квазиодномерной гемодинамики, так и в качестве элементов методик по оценке гемодинамических параметров в клинической практике.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенных моделей и численных методов, а также сравнением рассчитанных гемодинамических параметров с клиническими данными.

К достоинству работы следует отнести большое количество сравнений результатов расчетов с экспериментальными данными.

Основное содержание диссертации отражено в шестнадцати печатных работах, четыре из которых опубликованы в журналах из списка ВАК. Личный вклад соискателя в эти работы значителен. Результаты диссертации докладывались на 16 российских и зарубежных конференциях.

К содержанию диссертационной работе есть ряд замечаний.

1. На стр.29, в системе (2.3) в знаменателе правой части второго уравнения стоит величина  $S^2$ , тогда как степень площади сечения в данном случае должна быть первой.
2. На стр.50 величина  $\varepsilon_k$ , характеризующая направление, одинакова для входящего и выходящего сосуда.
3. На стр.55, формула (3.3), скорость распространения малых возмущений для системы уравнений гемодинамики названа «скоростью распространения малых возмущений в материале стенки сосуда», что неверно.
4. При моделировании влияния клапанов и мышечного насоса в венах на кровоток при беге, указано, что «Увеличение притока крови к работающим группам мышц может быть важным фактором как для доставки кислорода и питательных веществ...» (стр.89), что само по себе верно. Однако мышечный насос в венах, прежде всего, предназначен подъема венозной крови к сердцу и венозная кровь органов не снабжает. Поскольку

рассматривается разомкнутая система кровообращения, то мышечный насос в венах в рамках модели не может увеличить объем кровотока в артериальной части.

5. В работе рассматривается незамкнутая система кровообращения, что вообще говоря, не позволяет в полном объеме моделировать такие эффекты, как гравитационное воздействие, мышечный насос, ауторегуляция и др. Это отмечено в тексте диссертации (стр. 31), однако границы применимости представленных для этих эффектов моделей четко не прописаны.

Перечисленные выше замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку работы. Представленная диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, посвященную актуальной теме, выполненную на достаточно высоком математическом и научном уровне и представляющую теоретическую и практическую ценность.

Считаю, что диссертация Гамилова Т.М. «Математическое моделирование кровотока при механических воздействиях на сосуды», отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Гамилов Т. М., заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

05.12.2017

Доктор физико-математических наук



Мухин Сергей Иванович

Организация – место работы: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Структурное подразделение: кафедра вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики

Должность: профессор

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, факультет ВМК

Телефон: +7 916 114 51 19

Адрес электронной почты: [yvmus@cs.msu.ru](mailto:yvmus@cs.msu.ru)

Подпись и сведения заверяю.

Ученый секретарь факультета ВМК

МГУ имени М.В.Ломоносова



Григорьев Евгений Александрович