

УТВЕРЖДАЮ



Директор ФГБУН  
Института гидродинамики им. М.А.  
Лаврентьева СО РАН, д.ф.-м.н.

 С.В.Головин

декабря 2017 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию 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»

**Целью** работы является построение математической модели кровотока с учётом механических воздействий на кровеносные сосуды и использование этой модели для решения ряда прикладных задач.

**Актуальность** работы не вызывает сомнений: диагностика и лечение заболеваний сердечно-сосудистой системы является острым вопросом в развитых странах. Моделирование процесса ауторегуляции является сложной и интересной задачей, имеющей как фундаментальное значение, так и очевидные приложения. Именно ауторегуляция кровотока вместе с упругостью стенок сосудов существенно отличает кровеносную систему от водопроводной или отопительной. Использование методов математического моделирования позволяет оценивать параметры кровотока (давление, скорость) без хирургического вмешательства, что расширяет возможности диагностики и позволяет проводить предварительный анализ выбранной стратегии лечения. Учёт влияния механических воздействий на сосуды в виде мышечного насоса, манжет и тканей миокарда позволяет моделировать ряд медицинских процедур, а также работать такими с областями сосудистой

системы как коронарные сосуды и вены нижних конечностей при ходьбе. Выбранный в работе подход, основанный на одномерной модели, позволяет существенно сократить требования к вычислительным ресурсам и облегчить внедрение результатов.

### **Содержание работы.**

Объём диссертации составляет 151 страницу. Она состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и четырёх приложений.

Во **введении** автор даёт обоснование актуальности работы, формулирует цели и задачи исследования, научную новизну, практическую и научную значимость результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору различных подходов к моделированию кровотока. Особое внимание уделено одномерным моделям. Приводится обзор работ по рассматриваемым прикладным клиническим задачам.

Во **второй главе** приведена базовая одномерная модель кровотока, используемая в работе. Описаны ее модификации, предложенные в диссертации и позволяющие учитывать влияние мышечного насоса, сжатие тканей миокарда и реакцию сосуда на рассматриваемые воздействия.

**Третья глава** посвящена вопросам численной реализации модели. Предлагается использовать существовавшую ранее явную гибридную схему первого-второго порядка точности. Для использования выбранной схемы в работе выведены граничные условия первого и второго порядка аппроксимации. Проведено исследование сходимости численного решения в равномерной норме.

В **четвёртой главе** описаны численные эксперименты и подходы к решению ряда прикладных задач. Предложенная в работе модель апробируется на ряде тестовых задач, результаты расчётов сравниваются с измерениями, представленными в медицинской литературе. Предложены методы оценки степени тяжести стеноза в бедренной артерии и в коронарных

сосудах. Исследована чувствительность методов к различным параметрам модели.

В **выводах** обсуждаются преимущества и недостатки предложенных подходов. В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов**

Предложенная в работе модель основана на известных постановках задач одномерной гемодинамики, описанных в работах Фаворского А.П., Мухина С.И., Холодова А.С. и др. Для численной реализации автор использует сеточно-характеристический метод, исследованный в работах Холодова А.С. и Магомедова К.М.

Результаты расчётов согласуются с данными из медицинской литературы, а также с экспериментальными работами по измерению параметров кровотока. Поэтому полученные результаты можно считать обоснованными.

### **Научная значимость работы**

В работе предложена модель адаптации одномерных сосудов к внешним воздействиям, модель влияния внешних механических воздействий. Также предложена модель коронарного кровотока в рамках одномерного подхода, учитывающая противофазный характер течения крови в коронарных артериях. Для численной реализации модели выведены дискретизации условий совместности первого и второго порядка точности по пространству.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость состоит в предложенных подходах к оценке ряда диагностических параметров. Предложена методика расчёта изменения параметров кровотока при устранении стеноза, основанная на измерении скоростей кровотока до операции. Предложена неинвазивная методика оценки фракционированного резерва кровотока. Данная методика позволяет удешевить диагностику стенозов коронарных артерий и упрощает выбор стратегии лечения при наличии нескольких стенозов.



Кроме того на основе предложенной модели мышечного насоса в работе предложен метод оценки степени подготовки спортсмена бегуна. Метод основан на анализе возрастания потока крови через нижние конечности при ходьбе и беге.

Полученные результаты могут быть использованы для внедрения в медицинскую практику методик диагностики сосудистых заболеваний на основе КТ и МРТ снимков и математического моделирования

### **Соответствие специальности**

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в частности, пунктам:

- п. 3 – Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
- п. 4 – Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
- п. 5 – Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.
- п. 8 – Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

### **Замечания**

1.Список литературы в диссертации обширен, но можно отметить следующие лакуны, касающиеся модели одномерной гемодинамики и источников описывающих течения газа в упругих трубках (Shapiro et al.).Модель одномерной гемодинамики была впервые получена и использована, в частности, для моделирования тонов Короткова в работах Григоряна, Саакаяна и Цатуряна в 80-х годах 20 века. Более того, в этих работах рассматривалась модель вязкоупругой стенки сосуда, более общая, чем предложенная потом Formaggia et al.Считаю что этот приоритет отечественной науки должен быть закреплен.

2. Выбор уравнения состояния в виде (2.5) традиционен, но он нуждается в обосновании именно ввиду его обобщения в работе как модели ауторегуляции. Процесс ауторегуляции обусловлен несколькими физиологическими факторами, которые можно было бы описать в работе. Его математической моделью является уравнение с запаздыванием. В работе приведено лишь описание процедуры аппроксимации сводящей модель процесса к уравнению (2.12).

3. В работе не поясняется, почему при моделировании периодических воздействий в уравнении (2.15) периодически меняется лишь скорость пульсовой волны  $c$ , а произведение плотности на функцию от сечения сосуда остается постоянным.

4. В работе несколько раз встречаются графики типа ПИЛЫ-см. Рис. 2.6, 4.4, 4.8 и др. Они имеют очень острую вершину и чрезвычайно спрессованные отрезки прямых. По ним очень трудно представить поведение искомых функций.

5. Реальные клинические данные в работе приводятся, зачастую, в виде некоторых кривых из медицинских учебников лишь качественно отражающих поведение интересующих величин. Сегодня можно использовать для этих целей многочисленные базы данных в Интернете, упомянем, например [https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiac\\_output](https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiac_output) в которой приведено около 50 ссылок на статьи в научных журналах.

Сделанные замечания носят рабочий характер и не умаляют ценности работы Гамилова как самостоятельной научно-квалификационной работы.

### **Заключение**

Таким образом, в диссертации Гамилова Т.М. сделан значительный шаг в применении методов математического моделирования в медицинской практике. Работа выполнена на высоком уровне, все научные положения, выводы и рекомендации обоснованы. Достоверность основных результатов, сформулированных в заключении, не вызывает сомнения. Результаты

диссертации опубликованы в открытой печати, в том числе в пяти публикациях в журналах из перечня ВАК, кроме того результаты были представлены на многих международных и всероссийских конференциях и семинарах.

Содержание автореферата в полной мере отражает основные положения, выводы и результаты диссертации.

Диссертация отвечает требованиям "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК Минобрнауки РФ, а её автор Гамилов Тимур Мударисович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ".

Отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на объединённом семинаре лаборатории дифференциальных уравнений ИГиЛ СО РАН и лаборатории нелинейных процессов в гидродинамических системах НГУ 23 ноября 2017 г., протокол № 3.

Руководитель семинара,  
зав. лабораторией  
дифференциальных уравнений,  
д. ф.-м.н.

Чупахин Александр Павлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт гидродинамики им.М.А.Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской Академии наук  
630090,Новосибирск,пр.Лаврентьева,15  
Телефон: (383)333-16-12,факс: (383)333-16-12  
Электронная почта: [igil@hydro.nsc.ru](mailto:igil@hydro.nsc.ru)  
Сайт организации: <http://www.hydro.nsc.ru>



Исполнительный директор  
Федерального государственного бюджетного  
института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Шашин А.В.  
Ф.И.О. подпись