

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Гамилова Тимура Мударисовича
«Математическое моделирование кровотока при механических
воздействиях на сосуды»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18
«Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Работа посвящена важному направлению — моделированию кровотока в сосудах. В настоящее время для моделирования движения крови по сосудам разрабатываются как одномерные модели, когда сосуды соответствуют отрезкам кривых, так и трехмерные модели, где для моделирования кровотока используется реальная трехмерная геометрия сосудов. В первой обзорной главе диссертации правильно указано, что главным препятствием использования трехмерных моделей в медицинской практике является недостаточная информация о параметрах модели для конкретного пациента, а также затратность ресурсов для расчета больших кусков кровеносной системы. Следует отметить, однако, что в последнее время активно развиваются модели гибридной размерности, сочетающие одномерное описание на участках регулярного кровотока с трехмерными зумами в окрестностях бифуркаций, тромбов, стентов и др. участков сингулярного поведения кровотока. Поскольку диссертация ориентирована на быстрое внедрение результатов расчета в медицинскую практику, в ней принимается за основу одномерное моделирование сосудов.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, заключения и четырёх приложений. **В первой главе** содержится обзор различных подходов к моделированию сердечно-сосудистой системы. Уделено

внимание истории вопроса, обсуждаются преимущества, недостатки и границы применения существующих моделей. Также приведены сведения по медицинским методам и физиологическим процессам, упоминаемым в работе, и их математическим моделям.

Во второй главе представлены одномерная, уже существующая, модель гемодинамики, взятая в данной работе за базовую, и предложенные модификации, позволяющие учитывать воздействие стенок сосуда на кровоток: стенки играют активную роль в кровотоке не только за счет своей упругости, но и за счет реакции окружающих мышц на динамику давления в сосуде. В уравнения движения добавляются члены, учитывающие различные механизмы такого воздействия: ауторегуляция, мышечный насос и др. В результате построена новая одномерная модель кровотока с учетом этих факторов.

В третьей главе описывается численная реализация модели. Приводится разностная схема решения гиперболической системы уравнений, исследуется ее порядок аппроксимации, рассматриваются аппроксимации граничных условий первого и второго порядка по пространству, выводятся дискретизации условий совместности. Проведены численные эксперименты, исследующие сходимость численного решения.

Четвертая глава посвящена численному моделированию некоторых прикладных задач. Результаты расчетов с использованием предложенной модели сравниваются с клиническими экспериментами. Предложена методика оценки гемодинамической значимости стенозов артерий. Исследована чувствительность модели к определённым параметрам.

В **выводах** обсуждаются границы применимости модели и предложенных методик. В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

К критическим замечаниям следует отнести отсутствие детального математического анализа корректности предлагаемой модели и её численной реализации, однако это не снижает её прикладную ценность.

Основным результатом диссертации является решение важной прикладной задачи: создание и компьютерная реализация одномерной модели кровотока, учитывающей механизмы взаимодействия стенок с мышцами, позволяющих учитывать реакцию сосудистой стенки на изменение среднего давления, работу мышечного насоса и особенности коронарного кровообращения. Кроме того предложены дискретизации условий совместности, повышающие порядок сходимости разностной схемы.

Практическая значимость состоит в реализации предложенных численных моделей в виде программного комплекса, который используется в предложенных методиках оценки гемодинамической значимости стенозов и прогнозировании результатов хирургического вмешательства. Проведено сравнение результатов расчета модели с клиническими исследованиями.

Диссертационная работа Т. М. Гамилова выполнена на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как существенный шаг в применении моделей кровотока в медицинской диагностике. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а её автор Гамилов Тимур Мударисович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических

наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук

Панасенко Григорий Петрович

1 декабря 2017 г.

Адрес электронной почты: grigory.panasenko@univ-st-etienne.fr

Организация: University Jean Monnet (Университет Жан Моннэ)

Структурное подразделение: Institut Camille Jordan (Институт Камиля Жордана)

Должность: профессор

Адрес организации: 23 rue Paul Michelon, 42023, Saint-Etienne, France

Телефон: +33477485105

Подпись Панасенко Г. П. завершено.

Исполнитель секретарь ИФМ РАН

8.12.2017



И. П. Шутев /Шутев Ф. П./