

---

ОТ РЕДАКЦИИ

---

Вниманию читателей предлагается специальный выпуск, собранный по итогам V Всероссийской конференции «Математика в медицине», прошедшей в Москве, в Первом Московском государственном медицинском университете имени И. М. Сеченова (Сеченовском университете), 1–2 декабря 2025 г. Организаторами конференции выступили Сеченовский университет, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, Математический центр мирового уровня «Московский центр фундаментальной и прикладной математики». Конференция стала очередной в серии конференций «Математика в медицине», предыдущие конференции прошли в Новосибирске, Красноярске, Владивостоке и Томске. Главной темой всех конференций этой серии является применение современных вычислительных технологий, математического моделирования и технологий искусственного интеллекта для решения актуальных задач биомедицины и здравоохранения. Московская конференция собрала более 70 участников — специалистов из разных областей: физико-математического профиля, IT, медицины и биологии. Программа конференции включает такие направления, как математическое моделирование заболеваний, персонализированная медицина, эпидемиология, биоинформатика, обработка медицинских изображений, интеллектуальные системы поддержки врачебных решений. В частности, в докладах рассматривались методы прогнозирования течения заболеваний, оптимизации схем лекарственной терапии, применения лазерных технологий и искусственного интеллекта для автоматической диагностики по данным КТ, МРТ и гистологических снимков. Около 50 заявленных докладов были распределены по тематическим секциям «Кардиология», «Лазерные и диагностические технологии», «Машинное обучение и обработка данных», «Гемодинамика», «Иммунология и эпидемиология», «Биомеханика». Все презентации доступны на сайте конференции: <https://dodo.inm.ras.ru/mathmed2025/program/>, а ряд докладов представлен в виде тезисов, которые будут опубликованы в российском издательстве. Тем не менее высокий уровень многих докладов, их новизна и актуальность предполагают их оформление в виде публикаций в рецензируемом периодическом научном издании. В настоящем спецвыпуске представлены статьи, написанные по следам таких докладов и отобранные редакционной коллегией журнала «Компьютерные исследования и моделирование».



Кратко представим содержание данного специального выпуска, в котором статьи ранжируются в алфавитном порядке по фамилиям первых авторов.

В статье «Математическая модель свертывания крови в воротной вене» (А. А. Андреева, Б. И. Казымов, А. И. Лобанов, С. В. Панюков, Б. И. Яремин) исследуется влияние гидродинамических условий и уровней факторов коагуляции на возможность формирования тромба в воротной вене посредством математической модели, формализующей связь между гемодинамическими и биохимическими факторами риска тромбоза. Воротная вена рассматривается как проточный реактор с быстрым конвективным перемешиванием, в модели присутствуют уравнения для внешнего пути активации свертывания, петель положительных и отрицательных обратных связей, ингибирования активных факторов. Показано, что при превышении критической скорости фаза инициации не переходит в фазу амплификации, что соответствует физиологическим условиям, препятствующим тромбообразованию, а при пониженной концентрации фибриногена порог скорости, выше которого тромб не формируется, возрастает, что означает повышенную чувствительность системы к стазу. Таким образом, пониженный уровень фибриногена идентифицирован как фактор, усиливающий тромботический потенциал при условиях стаза. Результаты моделирования качественно согласуются с клиническими данными по распределению пациентов с тромбозом воротной вены по уровню фибриногена. Актуальность исследования заключается в том, что оно открывает перспективы для пациентоориентированного прогнозирования риска тромбоза у кандидатов на трансплантацию печени как в претрансплантационном, так и в послеоперационном периодах.

В статье «Моделирование механического поведения коронарных сосудов и ангиопластических баллонов» (О. В. Антонова, Э. Рововой, С. Д. Иванов, Н. А. Кабин, И. Д. Гесин, А. В. Козаев) предложен метод персонализированной оценки механического поведения коронарных сосудов и ангиопластических баллонов при проведении процедуры ангиопластики. Метод использует данные внутрисосудистого ультразвукового исследования и ангиографии, полученные для каждого пациента индивидуально. Предложенный метод моделирования процесса ангиопластики включает биомеханическую модель с атеросклерозом артерии за счет использования данных реального пациента, конечно-элементную нелинейно-упругую модель стенки артерии, конечно-элементную модель ангиопластического баллона. Такой метод позволит усовершенствовать методику ангиопластики на основе данных внутрисосудистой визуализации.

В статье «Идентификация нестационарного коэффициента младшей производной в параболическом уравнении» (В. И. Васильев, А. М. Кардашевский, Д. Х. Иванов, К. С. Кардашевская) предлагается безытерационный метод решения обратной задачи для уравнения параболического типа с неизвестным нестационарным коэффициентом при первой производной по пространственной переменной (коэффициентом конвекции). Такой метод востребован, например, при моделировании процессов переноса в биологических жидкостях, где скорость потока может меняться во времени (в ходе сердечного цикла). Суть метода состоит в представлении на каждом временном слое решения обратной задачи в виде линейной комбинации решений двух вспомогательных систем уравнений с одинаковой матрицей и различными правыми частями с последующим определением неизвестного коэффициента из дискретного аналога условия переопределения. Этот метод может быть применим в задачах медицинской диагностики и в тех задачах, где требуется оперативная обработка экспериментальных данных по нестационарному переносу.

В статье «Физически информированная нейросеть для оценки перепада давления при артериальных стенозах на основе данных моделирования» (Т. М. Гамилов, А. Ланге, А. А. Осипова, Ф. Лян, С. С. Симаков) представлена методика генерации синтетической базы данных стенозов, состоящей из 1620 записей. Каждая запись представляет собой результаты численного эксперимента по моделированию трехмерного течения вязкой несжимаемой жидкости через трубку с переменным сечением: перепад давлений, средний поток, усредненная по сечению скорость

кровотока на входе в трубку, максимальная степень сужения стеноза, длина стеноза, асимметрия стеноза, радиус трубки, число Рейнольдса. База данных синтетических стенозов использовалась для обучения физически информированной нейронной сети для последующей быстрой оценки перепада давления по четырем ключевым входным показателям: число Рейнольдса, длина стеноза, степень стеноза, степень асимметрии стеноза. Актуальность построенной нейросети состоит в том, что она может выступать как самостоятельный инструмент для быстрой клинической оценки стенозов и как компонент сетевых моделей кровотока, что особенно важно при моделировании доминирующих в клинической практике многососудистых поражений.

В статье «Определение механизма лазерно-индуцированного капиллярного эффекта методами численного моделирования» (Е. П. Дац, М. А. Гузев, Ю. В. Василевский, В. М. Чудновский) посредством численного моделирования впервые определен механизм инициированного кавитацией подъема уровня жидкости в трубках и капиллярах (лазерно-индуцированный светокапиллярный эффект). Показано, что асимметричное схлопывание относительно крупного одиночного кавитационного пузырька внутри вертикально ориентированной трубки или капилляра приводит к появлению потока жидкости, который замыкается в долгоживущее тороидальное вихревое кольцо (тороидальный вихрь). Вихрь за счет вязкого увлечения окружающей среды генерирует направленное течение жидкости вверх, а также обеспечивает всасывание новой порции жидкости через открытый нижний конец трубки. Характерное время жизни тороидального вихря значительно превышает время стадий роста и схлопывания кавитационного пузырька, а подъем уровня жидкости в трубке начинается не в момент расширения пузырька, а после его полного исчезновения, что полностью согласуется с экспериментальными данными. Размещение оптоволокон в трубке и лазерно-индуцированный светокапиллярный эффект открывают широкие перспективы для их использования в лазерной хирургии, поскольку формируемый кавитационный насос может очищать поверхности ран, где процесс удаления поврежденных тканей и инородных тел в результате температурного воздействия будет сопровождаться удалением продуктов очистки через трубку, что существенно повышает эффективность и безопасность процедуры.

В статье «Численное моделирование инверсии потока в воротной вене» (Б. И. Казымов, М. Ю. Лимарева, А. И. Лобанов, Ю. В. Фишер, Б. И. Яремин) исследуется движение жидкости в воротной вене, в которой из-за отсутствия клапанного аппарата направление потока есть исключительно функция градиента давления и, следовательно, реверсифельно. Рассматривались модель идеальной жидкости и модель Куемады вязкопластического течения во фрагменте КТ изображения воротной вены, не содержащем сосудистых бифуркаций; при этом в качестве граничных условий для потока использована интерполяция данных доплерографии. Коэффициент сопротивления либо соответствует физиологической норме, либо превышает ее. Расчеты показали, что при использовании модели Куемады течение в воротной вене стратифицировано, причем при нормальном значении коэффициента сопротивления при уменьшении скорости формируется пластическое ядро течения, а при повышенном значении коэффициента при инверсии потока также формируется пластическое ядро течения, которое продолжает движение в прямом направлении, в то время как пристеночные слои жидкости начинают двигаться в обратном направлении. Актуальность таких выводов связана с оценками риска тромбоза в воротной вене.

В статье «Сравнение подходов в оценке динамики створок аортального клапана» (Н. Е. Пиль, А. Г. Кучумов) выполнено сопоставление пяти расчетных сценариев оценки работы аортального клапана с точки зрения локальных механических и гемодинамических характеристик. Эти сценарии различаются используемыми моделями (гидроупругое взаимодействие или деформируемое твердое тело), источником перепада давления и направлением приложения нагрузки к створкам клапана. Сравнительными характеристиками являются деформации, перемещения, напряжения по Мизесу, колебательная динамика створок и площадь геометрического открытия клапана. Показано, что FSI-модель обеспечивает наиболее согласованное описа-

ние работы клапана. Актуальность исследования связана с важностью понимания связи между дисфункцией аортального клапана, нарушениями внутрисердечной гемодинамики и перегрузкой левого желудочка.

В статье «Применение бета-регрессии в задаче альтернативного сплайсинга гена CD44» (А. Пирогов) предложен метод анализа альтернативного сплайсинга, позволяющего включение и исключение переменных экзонов для формирования различных изоформ одного гена, через моделирование долей экспрессии изоформ с помощью бета-регрессии. Модель реализована как нейросетевой регрессор с совместной оценкой параметров распределения и регуляризацией Elastic Net, что позволяет отбирать наиболее значимые признаки. Метод применен к идентификации РНК-связывающих белков (сплайсинг-факторов), регулирующих выбор сайтов сплайсинга CD44 в клетках колоректального рака. Биологический анализ подтвердил участие известных регуляторов CD44 и выявил новые потенциальные кандидаты, включая ACO1, NUDT21 и AGO2.

В статье «Метод оценки скорости коронарного кровотока по ангиографическим изображениям» (А. А. Реброва, А. А. Данилов) представлен автоматизированный алгоритм для обработки динамических последовательностей рентгеновских ангиографических изображений, направленный на оценку скорости кровотока. Этот алгоритм справляется с такими трудностями ангиографического анализа, как артефакты движения сосудов в ходе сердечно-дыхательного цикла, неравномерная контрастная плотность и геометрическая сложность сосудистого дерева в двумерных проекциях. Представленный алгоритм обработки включает в себя предобработку кадров для подавления шумов и фильтрации анатомического фона, сегментацию с использованием фильтра Сато и пороговой обработки Оцу, скелетонизацию для извлечения центральных линий сосудов с автоматической идентификацией точек бифуркации и фильтрацией артефактных пересечений, возникающих при наложении сосудов, решение обратной одномерной задачи для уравнения конвекции – диффузии для восстановления скорости кровотока по временным кривым интенсивности. Последний этап содержит математическое ядро алгоритма, основанное на методе, предложенном в статье «Идентификация нестационарного коэффициента младшей производной в параболическом уравнении» настоящего специального выпуска. Алгоритм валидирован путем сопоставления результатов автоматического расчета с ручными экспертными измерениями. Алгоритм востребован при оценке функциональной значимости стенозов коронарных артерий и открывает перспективы для создания систем поддержки принятия врачебных решений в реальном времени в условиях катетеризационной лаборатории.

*Редактор спецвыпуска  
чл.-корр. РАН Ю. В. Василевский*