

Научный обзор

УДК 004.81

DOI: 10.17816/pmj42441-54

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КРОНАРНОГО КРОВОТОКА

**А.А. Породииков¹, А.Н. Бианов¹, В.Б. Арутюнян¹,
Ф.Ф. Азимов^{1*}, М.А. Барулина², Я.Н. Иванов²**

¹Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии имени С.Г. Суханова, г. Пермь,

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Российская Федерация

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MATHEMATICAL MODELING OF CORONARY BLOOD FLOW

**A.A. Porodikov¹, A.N. Biyanov¹, V.B. Arutyunyan¹,
F.F. Azimov^{1*}, M.A. Barulina², Ya.N. Ivanov²**

¹S.G. Sukhanov Federal Center for Cardiovascular Surgery, Perm,

²Perm State National Research University, Russian Federation

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются ведущей причиной смертности и инвалидности во всем мире. Только в 2021 г. на ССЗ пришлось более 20 млн летальных исходов, что составляет примерно треть всех смертей в мире. Важным фактором, влияющим на уровень смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, являются диагностические и терапевтические стратегии, используемые для лечения ишемической болезни сердца. Инвестиции в эту область за последние 25 лет привели к снижению уровня смертности от сердечно-сосудистых заболеваний в странах с высоким социально-демографическим индексом. Точная диагностика является первым шагом к выбору подходящего метода лечения.

© Породииков А.А., Бианов А.Н., Арутюнян В.Б., Азимов Ф.Ф., Барулина М.А., Иванов Я.Н., 2025

e-mail: faridun.azimov.98@list.ru

[Породииков А.А. – кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, ORCID: 0000-0003-3624-3226; Бианов А.Н. – кандидат медицинских наук, детский кардиолог, ORCID: 0000-0002-9314-3558; Арутюнян В.Б. – кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, ORCID: 0000-0002-1730-9050; Азимов Ф.Ф. (*контактное лицо) – врач-стажер, ORCID: 0009-0006-3286-6951; Барулина М.А. – доктор физико-математических наук, директор Физико-математического института, ORCID: 0000-0003-3867-648X; Иванов Я.Н. – магистр Физико-математического института, ORCID: 0000-0003-3974-9011].

© Porodikov A.A., Biyanov A.N., Arutyunyan V.B., Azimov F.F., Barulina M.A., Ivanov Ya.N., 2025

e-mail: faridun.azimov.98@list.ru

[Porodikov A.A. – PhD (Medicine), Cardiovascular Surgeon, ORCID: 0000-0003-3624-3226; Biyanov A.N. – PhD (Medicine), Pediatric Cardiologist, ORCID: 0000-0002-9314-3558; Arutyunyan V.B. – PhD (Medicine), Cardiovascular Surgeon, ORCID: 0000-0002-1730-9050; Azimov F.F. (*contact person) – Medical Intern, ORCID: 0009-0006-3286-6951; Barulina M.A. – DSc (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Physics and Mathematics, ORCID: 0000-0003-3867-648X; Ivanov Ya.N. – Master of Physics and Mathematics Institute, ORCID: 0000-0003-3974-9011].

Изучены данные литературы о возможности применения искусственного интеллекта и математического моделирования медицинских исследований, в частности коронароангиографии, для анализа и создания компьютерных программ по моделированию сердечно-сосудистых и эндоваскулярных оперативных вмешательств.

Осуществлен поиск отечественной и зарубежной литературы в поисковиках «Яндекс» и Google, PUB.MED по ключевым словам: «коронароангиография», «искусственный интеллект», «математическое моделирование», «фракционный резерв кровотока», «3D-моделирование», «ишемическая болезнь сердца», «чрескожное коронарное вмешательство».

Практическое применение ИИ для создания математических моделей позволит реконструировать 3D-картины коронарных артерий, моделирование кровотока, что значительно оптимизирует лечение ишемической болезни сердца. Благодаря этому удастся эффективно планировать эндоваскулярные вмешательства в отсутствие самого пациента по его данным. Дальнейшее изучение этого вопроса сулит огромные перспективы для развития математического моделирования коронарного кровотока, принятия эффективных решений при проведении интервенционных вмешательств, что позволит уменьшить заболеваемость и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова. Математическое моделирование, коронарная ангиография, фракционный резерв кровотока. 3D-моделирование, ишемическая болезнь сердца, чрескожное коронарное вмешательство.

Cardiovascular diseases (CVD) are the leading cause of death and disability worldwide. In 2021 alone, there were more than 20 million deaths attributed to CVD, accounting for about a third of all deaths worldwide. An important factor influencing the mortality rate from cardiovascular diseases is the diagnostic and therapeutic strategies used to treat coronary heart disease. Investments in this area over the past 25 years have led to a reduction in the death rate from cardiovascular diseases in countries with a high socio-demographic index. Accurate diagnosis is the first step to choosing the appropriate treatment method.

The objective of the research is to study the literature data on the possibility of using artificial intelligence and mathematical modeling of medical research, in particular coronary angiography, for the analysis and development of computer programs for modeling cardiovascular and endovascular surgical interventions.

The search for Russian and foreign literature in Yandex and Google search engines, medical research websites PUB.MED was conducted using keywords: coronary angiography and artificial intelligence, mathematical modeling, fractional blood flow reserve, 3D modeling, coronary artery disease, percutaneous coronary intervention.

The practical application of AI to create mathematical models will allow reconstructing 3D pictures of coronary arteries, modeling blood flow, which significantly optimizes the treatment of coronary artery disease. This will make it possible to effectively plan endovascular interventions based on the patient's data in the absence of the patient himself. Further study of this issue promises great prospects for the development of mathematical modeling of coronary blood flow, making effective decisions during interventional procedures, which will reduce the incidence and mortality from cardiovascular diseases.

Keywords. Mathematical modeling, coronary angiography, fractional blood flow reserve. 3D modeling, coronary artery disease, percutaneous coronary intervention.

ВВЕДЕНИЕ

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются ведущей причиной смертности и инвалидности во всем мире. Только в 2021 г. на ССЗ пришлось более 20 млн летальных исходов, что составляет примерно треть всех смертей в мире [1].

Стандартизированный по возрасту коэффициент смертности от сердечно-сосудистых заболеваний варьируется в разных странах в зависимости от общей распространенности сердечно-сосудистых заболеваний в этом регионе, которая определяется наличием таких факторов риска в популяции, как ожирение, отсутствие физической

активности, гиперлипидемия, артериальная гипертония, сахарный диабет, хронические заболевания почек, а также экологическими рисками [2].

По данным Росстата, в 2022 г. от ССЗ умерло 831 557 человек (43,8 % от общей доли смертности). В эту категорию входят ишемическая болезнь сердца (ИБС), цереброваскулярные заболевания и острые нарушения мозгового кровообращения. По данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю, смертность в Пермском крае по причине болезней органов кровообращения в 2022 г. составила 16 525 человек. В целом по Пермскому краю от различных причин умерло 35 018 человек. Следовательно, смертность по причине болезней органов кровообращения составляет около 47 % от доли общей смертности.

Важным фактором, влияющим на уровень смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, являются диагностические и терапевтические стратегии, используемые для лечения ИБС. Пристальное внимание к этой проблеме и привлечение ресурсов в эту область за последние 25 лет привели к снижению уровня смертности от ССЗ в странах с высоким социально-демографическим индексом [3; 4]. Точная диагностика является первым шагом к выбору подходящего метода лечения [5].

Параметры диагностических инструментов, используемые для диагностики ИБС, делятся на предположительные и точные. К первым относятся первичные диагностические критерии, такие как клинические симптомы, изменения на электрокардиограмме (ЭКГ) и биохимические маркеры, с помощью которых можно быстро заподозрить острый инфаркт миокарда (ОИМ). Большее значение для выбора терапевтического подхода имеют точные критерии, к которым относятся инвазивная коронарная

ангиография (КАГ), компьютерная томография сердца (КТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), гибридная ПЭТ/КТ и обычная однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) [6; 7].

Наиболее точным диагностическим показателем для определения необходимости реваскуляризации при гемодинамически значимых поражениях коронарных артерий является фракционный резерв коронарного кровотока (ФРК), который определяется как разница в давлении в коронарной артерии между проксимальным и дистальным участками при значительном стенотическом поражении в условиях фармакологической вазодилатации [8]. ФРК традиционно рассчитывается с помощью проводникового катетера при инвазивной коронарной ангиографии, однако в дальнейшем его можно оценить с помощью инвазивной коронарной ангиографии с определением фракционного резерва кровотока (ФРК) без необходимости проведения проводникового катетера [9]. Учитывая инвазивный характер ФРК, были разработаны новые методы оценки несоответствия между анатомическим и функциональным состоянием значительных коронарных поражений, такие как неинвазивный метод оценки резерва коронарного кровотока с помощью КТ (КТ ФРК) [10].

ТРАДИЦИОННАЯ ИНВАЗИВНАЯ КОРОНАРНАЯ АНГИОГРАФИЯ И ЧРЕСКОЖНОЕ КОРОНАРНОЕ ВМЕШАТЕЛЬСТВО

Селективная КАГ была впервые применена Соунсом в 1958 г. С тех пор КАГ произвела революцию в нашем понимании патофизиологии и лечении заболеваний сердца и стала одним из главных достижений в области кардиологии. Она используется в качестве стандартного и общепринятого метода диагностики ИБС [3; 11]. На основании растущего числа наблюдений врачей в первона-

чальную методику КАГ были внесены изменения, в том числе получение цифровых изображений, уменьшение объема контрастного вещества и количества используемых проводников, а также разработаны количественные измерения, которые позволили получать более точные изображения, уменьшить количество осложнений, повысить процент успешных операций и сократить время процедуры [11; 12]. Эта процедура является одной из самых распространенных инвазивных процедур в мире. В России за 2023 г. проведено более 634 тыс. исследований, по результатам которых выполнено 324 тыс. чрескожных коронарных вмешательств (ЧКВ) и более 29 тыс. аортокоронарных вмешательств.

КАГ проводится с помощью рентген-ангиографической установки, которая включает источник рентгеновского излучения и детектор изображения, размещенные на подвижной С-дуге. С-дуга для визуализации может вращаться вокруг объекта – находящегося на движущемся столе пациента. На рисунке представлено положение С-дуги в нейтральной (вертикальной) и переднезадней (AP) ориентации, когда источник рентгеновского излучения расположен под столом пациента. Рентгеновская визуализация выполняется обученным медицинским работником, который использует катетер для введения рентгеноконтрастного вещества в артерии и позиционирует оборудование для получения оптимальных двумерных проекций сосудистой системы. С-дуга может вращаться вокруг изоцентра с использованием двух углов поворота: первичного (α) и вторичного (β). Угол α изменяется от $+180^\circ$ (левый передний наклон, LAO) до -180° (правый передний наклон, RAO), а угол β варьируется от $+90^\circ$ (краниальный, CRA) до -90° (каудальный, CAU). Возможно изменение расстояния между пациентом и источником рентгеновского излучения (SOD) и расстоя-

ния между источником и детектором (SID). Все эти параметры вместе с полученными изображениями сохраняются в DICOM-файле, что позволяет систематически фиксировать данные во время рентгеновской визуализации.

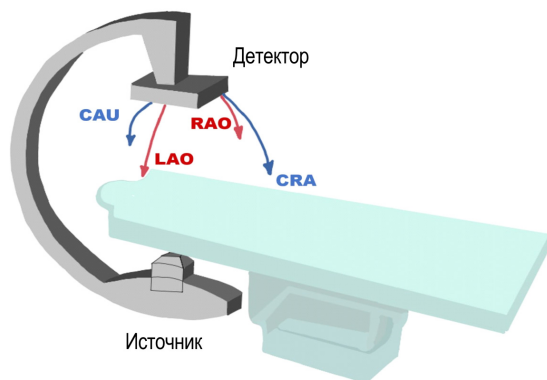


Рис. Параметры рентген-ангиографической установки

Еще одним важным преимуществом КАГ является возможность одновременного проведения ЧКВ, имеющего высокую эффективность (более 95 %) [13]. ЧКВ также показало большую эффективность лечения у пациентов с хронической полной окклюзией по сравнению с медикаментозной терапией [14; 15]. Раннее проведение ИКД также снизило общую и сердечную смертность у пациентов с острыми коронарными заболеваниями [16]. Сравнение результатов ЧКВ с аортокоронарным шунтированием (АКШ) показало, что ЧКВ (с использованием стентов с лекарственным покрытием) так же безопасно и эффективно, как и АКШ, у пациентов с поражением ствола левой коронарной артерии с низким хирургическим риском и более низкой частотой повторной реваскуляризации, необходимой после АКШ [17; 18]. Однако АКШ считается методом выбора у пациентов с многососудистым поражением коронарных артерий с более высокой выживаемостью, более низкой частотой

основных сердечно-сосудистых событий (ОССС) и повторной реваскуляризации, чем при ЧКВ [19; 20]. Кроме того, успешность реваскуляризации пациентов с помощью ЧКВ зависит от нескольких факторов, таких как тип и тяжесть ИБС, а также особенности методики, инструмента и препаратов, используемых во время и после ЧКВ [21].

Пациент-специфические вычислительные модели кровотока в коронарных артериях приобрели основополагающее значение как клиническая технология в последние годы, способствуя улучшению диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний. Эти модели позволяют клиницистам более точно оценивать гемодинамические параметры и значимость коронарных стенозов, что содействует принятию аргументированных решений о необходимости интервенций, таких как стентирование. Доказательства их клинической эффективности подтверждаются значительным количеством исследований, демонстрирующих высокую степень согласия с инвазивными методами измерения, такими как катетеризация.

Такие модели имеют преимущества с точки зрения безопасности, поскольку не требуют инвазивных процедур, что снижает риски для пациентов. Эффективность и экономическая целесообразность внедрения этих технологий в клиническую практику были подтверждены рядом исследований, которые указали на снижение затрат на лечение и улучшение клинических исходов. Таким образом, использование пациент-специфических вычислительных моделей кровотока в коронарных артериях представляет собой перспективное направление в кардиологии, способствующее более точной и безопасной диагностике и лечению сердечно-сосудистых заболеваний.

Процесс пациент-специфического моделирования коронарного кровотока, основанного на ангиографических данных, мож-

но условно разделить на несколько ключевых этапов.

Первый этап заключается в сегментации коронарных артерий на ангиографических изображениях. Для этого используются различные методы, такие как пороговая сегментация по интенсивности (intensity thresholding), метод активных контуров (active contour method) и современные алгоритмы, основанные на машинном обучении. Комбинирование этих методов позволяет существенно повысить точность сегментации и минимизировать влияние шумов и артефактов.

Критически важно отметить, что корректная сегментация служит основой для последующих этапов моделирования, поскольку любые ошибки на этом этапе могут приводить к искажению данных и, следовательно, негативно сказываться на точности вычислений гемодинамических параметров [22].

Следующим важным этапом является восстановление трехмерной геометрии коронарного дерева. Трехмерная геометрия играет ключевую роль в создании реалистичной модели кровотока, поскольку позволяет учитывать сложные анатомические и топографические особенности, включая изгибы, бифуркации и стенозы.

Создание такой трехмерной модели значительным образом упрощается при использовании данных трехмерной медицинской визуализации, таких как компьютерная томографическая ангиография (КТА). Однако для двумерной рентгеновской ангиографии необходимо применять методы реконструкции трехмерной геометрии из серии изображений.

Существуют различные подходы к реконструкции коронарных артерий по ангиографическим снимкам, основанные на принципах проективной геометрии и стереозрения. Эти методы можно разделить на две категории: «снизу вверх» и «сверху вниз». Методы «снизу вверх» основаны на эпипо-

лярном ограничении, которое каждой точке на первой проекции устанавливает соответствие точки на второй проекции. После установления такой пары точек можно однозначно восстановить положение трехмерной точки [23].

Ошибки в измерениях ангиографических углов может усложнить этап сопоставления точек на проекциях. Использование неоткалиброванного ангиографа может вносить искажения в полученную геометрию. В некоторых работах производилась калибровка установки с использованием фантомных объектов. В исследованиях, где использовалась неоткалиброванная геометрия, перед реконструкцией проводится дополнительный этап калибровки [23].

Однако сопоставление точек на проекциях может быть затруднено ошибками в измерениях ангиографических углов. Калибровка системы с использованием фантомов может помочь минимизировать искажения. В ряде работ применялись дополнительные этапы калибровки, чтобы улучшить точность реконструкции на основе неоткалиброванной геометрии [22].

Методы «сверху вниз» для реконструкции коронарных артерий используют трехмерную модель коронарного дерева, проекции которого адаптируются к изображению сосудов на двумерных рентгеновских изображениях.

Деформируемая трехмерная модель развивается под воздействием внешней энергии, которая рассчитывается из несоответствия проекции деформируемой модели и рентгеновского 2D-изображения коронарной артерии, и внутренней энергии, которая обусловлена гладкостью и топологией самой деформируемой модели. Основной сложностью реконструкции геометрии коронарных сосудов на основе активных контуров является проектирование внешних и внутренних энергетических условий [22].

Описанные проекционные методы требуют необходимость идентификации соответствующих анатомических особенностей на изображениях. Такие действия обычно выполняются вручную, и их автоматизация представляет собой сложную задачу [22; 23]. Также точность реконструкции будет зависеть от точности измерения ангиографических углов. Однако основной проблемой являются пересекающиеся ветви и наложения, которые могут приводить к неопределенности в получаемой геометрии. Движения коронарных артерий, вызванные сердечными и дыхательными сокращениями, также создают трудности в установлении соответствий между сегментированными двумерными изображениями [22].

В последние годы использование нейронных сетей для реконструкции коронарных артерий стало актуальной темой в области медицинской визуализации. В частности, работа [27] представляет собой важный вклад в эту область. Исследование описывает многоступенчатый подход к обучению нейронной сети для реконструкции 3D-коронарных деревьев. Данные для обучения нейронной сети создаются с помощью генератора синтетических сосудов. Генератор использует эталонную геометрию коронарного дерева, которая была получена с помощью компьютерной томографии. Работа генератора состоит в том, что синтетическая геометрия коронарного дерева создается из эталонной путем внесения геометрии сосудов. Для имитации патологических изменений случайным образом вводятся стенозы с различным уровнем сужения. В отличие от проекционных методов, такой подход не требует точных углов съемки или калибровки оборудования.

Тем не менее одним из главных ограничений данных работ является отсутствие учета движения сосудов между снимками, что часто наблюдается в одноплоскостных

рентгеновских системах. Это движение может значительно влиять на точность и достоверность реконструкции сосудистой геометрии, особенно при интерпретации временных изменений, связанных с физиологическими процессами. В работе [28] предлагается подход с использованием жесткого преобразования для имитации реальных неодновременных проекций в синтетической геометрии сосудов. Данный метод позволяет создать более точную модель коронарного дерева, учитывающую изменения в геометрии сосудов, возникающие из-за движений сердца и дыхания.

Несмотря на то что подход с использование нейронной сети для восстановления трехмерной геометрии сосуда по ангиографическим снимкам все еще требует дальнейшей оптимизации для достижения высокой точности, он сохраняет потенциал для полностью автоматизированной реконструкции коронарных артерий без необходимости ручных рутинных операций, что является значительным преимуществом по сравнению с классическими проекционными методами.

ИНВАЗИВНАЯ ОЦЕНКА ФРАКЦИОННОГО РЕЗЕРВА КРОВотоКА

Оценка коронарного кровотока имеет большое значение при проведении ЧКВ. Изначально для определения градиентов давления и оценки результатов ангиопластики использовались измерения внутрикоронарного давления. Появление катетера для измерения внутрикоронарного давления и оценка фракционного резерва кровотока (ФРК) позволили определять влияние эпикардального сужения на перфузию миокарда [26]. В клинических испытаниях измерение ФРК позволило оптимизировать отбор пациентов для проведения реваскуляризации и улучшило клинические

результаты при меньших экономических затратах [28–30].

Несмотря на убедительные доказательства и рекомендации, во многих регионах мира использование оценки состояния коронарного кровотока на основе проводников давления остается низким. Применение в клинической практике данных о состоянии коронарного кровотока в США и Европе составляет от 10 до 20 % [30]. Факторами, ограничивающими использование этих данных, являются высокая стоимость и ограниченная эффективность современных проводников давления, необходимость в гипертоническом стимуле, увеличение продолжительности процедуры, а также предполагаемая ненужность физиологических исследований [31].

Методы ангиографической количественной оценки тяжести стеноза коронарных артерий претерпели изменения. Исторически сложилось так, что уменьшение диаметра просвета более чем на 50 % по сравнению со здоровым эталонным диаметром использовалось для определения значительного стеноза, требующего лечения. Тем не менее межэкспертная согласованность в оценке тяжести стеноза коронарной артерии низкая и составляет от 40 до 70 % [32]. Кроме того, только половина промежуточных стенозов связана с ишемией, и ЧКВ при таких поражениях не улучшает результаты. Использование ангиографии для оценки кровотока предшествовало количественной коронарной ангиографии (QCA) и FFR. В 1970 г. Рутишаузер и др. впервые измерили абсолютный коронарный кровоток у людей с помощью киноденситометрии [33]. В 1984 г. Фогель и его коллеги использовали денситометрию для определения среднего времени прохождения контрастного вещества в состоянии покоя и при гипертензии, чтобы определить резерв коронарного кровотока (РКК). Три десятилетия спустя, отчасти благодаря достижениям в этой области, в том числе трехмерной (3D)

количественной компьютерной томографии и вычислительной гидродинамике (CFD), был предложен суррогатный показатель резерва кровотока (FFR), полученный с помощью ангиографии. В 2014 г. в двух публикациях Папафаклиса и Ту был описан подход к виртуальной оценке ФРВ с использованием только обычной ангиографии и без применения катетера с давлением [34–36]. Эта веха ознаменовала появление альтернативы использованию катетера с давлением для оценки ФРВ. За последнее десятилетие значительно увеличилось количество систем, способных оценивать ФРВ непосредственно по результатам ангиографии.

НЕИНВАЗИВНАЯ ОЦЕНКА ФРАКЦИОННОГО РЕЗЕРВА КРОВОТОКА

Использование трехмерного моделирования коронарного кровотока улучшает визуализацию и понимание патологии коронарной артерии, что важно для принятия клинических решений. Расчет гемодинамики может не только помочь в планировании таких вмешательств, как ангиопластика или установка стентов, но и способствовать более точной оценке рисков для пациента [37].

Интеграция вычислительного моделирования с клиническими данными углубляет понимание сложной динамики, происходящей внутри коронарных артерий, что позитивно сказывается на улучшении клинических метрик оценки. Среди ключевых показателей гемодинамики можно выделить несколько, играющих важную роль в анализе состояния коронарных отражений.

Фракционный резерв кровотока (ФРК) является одним из основных параметров для оценки гемодинамики коронарных артерий. ФРК рассчитывается путем сравнения артериального давления до и после стеноза. Используя это соотношение, врачи могут определить, насколько сужение затрудняет при-

ток крови к сердцу. FFR может дать ценную информацию о том, требует ли коронарный стеноз вмешательства, такого как ангиопластика или установка стента, или его можно лечить медикаментозно [38].

Резерв коронарного кровотока (РКК) представляет собой важный показатель, вычисляемый как отношение коронарного кровотока во время максимальной вазодилатации к кровотоку в состоянии покоя [39]. Он учитывает сосудистое сопротивление и характеристики расширения коронарных артерий, что помогает в оценке их функциональности. Сравнивая CFR стенозированной коронарной артерии с референтным сегментом, таким как нестенозированный сегмент или сегмент с минимальным заболеванием, можно рассчитать относительный РКК. Он особенно полезен при оценке функциональных последствий путем сравнения кровотока через определенный стеноз с кровотоком в другой, менее пораженной артерии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В современной медицине предъявляют высокие требования и к квалификации врачей, и к используемым методикам. Общее количество информации о болезнях увеличивается с каждым годом, один человек не в состоянии в точности оценить важность имеющегося материала для врачебной практики, и тогда приходит на помощь математика, которая помогает структурировать материал. Выбор тех или иных математических моделей при описании и исследовании медицинских объектов зависит от индивидуальных знаний специалиста и от особенностей решаемых задач. Численные методы оказываются не только наиболее точными, но и позволяют корректно строить вычислительные алгоритмы, что немаловажно при диагностике болезней.

На ранних этапах разработки математических моделей, качественно определяющих взаимосвязь между кровотоком и давлением, исследователям приходилось прибегать к значительным упрощениям уравнений Навье – Стокса, относящихся к несжимаемым потокам. В общем математические модели кровообращения можно классифицировать на три категории: модели с сосредоточенными параметрами (0D-модели), модели гемодинамики артериального русла (1D) и трехмерные численные модели.

Трехмерные модели (3D) используют численные методы для решения уравнений Навье – Стокса. Такой подход позволяет точно представлять геометрию сосудистой системы, моделировать трехмерный пульсирующий поток (включая компоненты турбулентности) и внедрять сложные модели поведения крови и свойства сосудов.

Одномерные модели (1D) создаются путем усреднения уравнений Навье – Стокса по поперечному сечению сосуда. Это приводит к игнорированию неаксиальных компонент скорости, предположению о наличии аксиального профиля скорости у сосудов и условию постоянного давления по поперечному сечению. Однако эти модели имеют ограничения вблизи бифуркаций, боковых ответвлений или пораженных участков, особенно для сложных поражений в области ответвлений и бифуркаций.

0D-модель гемодинамики представляет собой упрощенный подход к описанию кровообращения. Этот метод используется для анализа динамики давления и потока крови в сосудистой системе, игнорируя пространственные характеристики системы. Поток в такой модели предполагается постоянным, осесимметричным и однонаправленным, где сегменты сосудов рассматриваются как круговые цилиндры, что приводит к значительным упрощениям в анализе сопротивления жидкости. Это часто создает высокий уро-

вень неточности в моделировании кровотока в пораженных коронарных артериях, где стабильный однонаправленный поток, осесимметрия или круглая форма сечений сосудов отсутствуют.

Гибридные модели преследуют цель оптимизации расчетного времени, обеспечивая при этом точные результаты моделирования, сочетая различные подходы, включая модели с сосредоточенными параметрами и одномерные модели, а также комбинации одномерных и трехмерных моделей.

Конечной целью предлагаемой методологии является создание цифрового двойника, то есть виртуальной копии пораженной атеросклерозом коронарной артерии конкретного пациента, которая позволила бы проводить более тщательный анализ клинического состояния пациента и анализ возможного и наиболее оптимального лечения, а также предлагать дальнейшую адаптацию разработанной копии с течением времени в ходе последующих обследований.

Единственными данными, которые необходимы в качестве входных, для разработанного программного обеспечения являются рентгеновские ангиографические изображения рассматриваемого пациента. Впоследствии программное обеспечение сможет позволить врачу выполнить виртуальное стентирование вручную (отметив нужное место для стента и выбрав диаметр стента) или выполнить автоматизированное оптимизированное виртуальное стентирование, которое предоставит информацию о наиболее подходящем месте и диаметре устанавливаемого стента, а также проанализировать несколько вариантов расположения стента и диаметра расширения, чтобы определить наиболее оптимальный вариант. В процессе оптимизации следует учитывать не только FFR в качестве единственного параметра, как это обычно бывает, но и данные гемодинамики в суженном и расширенном участке артерии

(с помощью анализа WSS (напряжения стенки сосуда)). Поэтому вычислительный подход также может быть полезен, поскольку позволяет провести компьютерное моделирование имплантации стента. В литературе описаны методы имплантации стентов в коронарные артерии конкретного пациента [40–43]. Основное преимущество такого компьютерного моделирования заключается в том, что оно позволяет проанализировать влияние стентирования на перерасчет vFFR после вмешательства и спрогнозировать гемодинамические эффекты и преимущества лечения в конкретной коронарной артерии, что обеспечивает более тщательное планирование лечения. Для врачей было бы полезно иметь инструмент «виртуального стентирования», с помощью которого можно было бы изучать влияние нескольких альтернативных стратегий вмешательства в режиме «симуляции» (с помощью компьютерного

моделирования) и получать оценку наилучшего и наиболее эффективного расположения стента перед проведением клинического лечения *in vivo*.

Выводы

Практическое применение математических моделей позволит реконструировать 3D-картины коронарных артерий, моделирование кровотока, что оптимизирует лечение ИБС. Это позволит эффективно планировать эндоваскулярные вмешательства по данным пациента в отсутствии самого пациента. Дальнейшее изучение этого вопроса сулит огромные перспективы для развития математического моделирования коронарного кровотока, принятия эффективных решений при проведении интервенционных вмешательств, что потенциально снизит заболеваемость и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Dornquast C., Kroll L.E., Neubauer H.K., Willich S.N., Reinbold T., Busch M.A. Regional differences in the prevalence of cardiovascular disease. *Dtsch Arztebl Int* 2016; 113 (42): 704–11. DOI: 10.3238/arztebl.2016.0704 PMID: 27866565
2. Mensah G.A., Roth G.A., Fuster V. The global burden of cardiovascular diseases and risk factors: 2020 and beyond. *J Am College. Cardiol.* 2019; 74 (20): 2529–2532. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.10.009
3. Roth G.A., Johnson C., Abajobir A. et al. Global, regional, and national burden of cardiovascular diseases for 10 causes, 1990 to 2015. *J Am Coll. Cardiol.* 2017; 70 (1): 1–25. DOI: 10.1016/j.jacc.2017.04.052
4. Townsend N., Wilson L., Bhatnagar P., Wickramasinghe K., Rayner M., Nichols M. Cardiovascular disease in Europe: Epidemiological update 2016. *Eur Heart J* 2016; 37 (42): 3232–45. DOI: 10.1093/eurheartj/ehw334 PMID: 27523477
5. Joseph P., Leong D., McKee M. et al. Reducing the global burden of cardiovascular disease, part 1: The epidemiology and risk factors. *Circ Res* 2017; 121 (6): 677–94. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.117.308903 PMID: 28860318
6. Bonaca M.P., Wiviott S.D., Braunwald E. et al. American college of cardiology/American heart association/European society of cardiology/world heart federation universal definition of myocardial infarction classification system and the risk of cardiovascular death: Observations from the triton-timi 38 trial (trial to assess improvement in therapeutic outcomes by optimizing platelet

inhibition with prasugrel-thrombolysis in myocardial infarction 38). *Circulation* 2012; 125 (4): 577–83. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.041160 PMID: 22199016

7. Di Carli M.F., Hachamovitch R. New technology for noninvasive evaluation of coronary artery disease. *Circulation* 2007; 115 (11): 1464–80. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.629808 PMID: 17372188

8. Collet C., Onuma Y., Sonck J. et al. Diagnostic performance of angiography-derived fractional flow reserve: A systematic review and Bayesian meta-analysis. *Eur Heart J* 2018; 39 (35): 3314–21. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy445 PMID: 30137305

9. Collet C., Onuma Y., Sonck J. et al. Diagnostic performance of angiography-derived fractional flow reserve: A systematic review and Bayesian meta-analysis. *Eur Heart J* 2018; 39 (35): 3314–21. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy445 PMID: 30137305

10. Liu X., Wang Y., Zhang H. et al. Evaluation of fractional flow reserve in patients with stable angina: Can CT compete with angiography? *Eur Radiol* 2019; 29 (7): 3669–77. DOI: 10.1007/s00330-019-06023-z PMID: 30887203

11. Ryan T.J. The coronary angiogram and its seminal contributions to cardiovascular medicine over five decades. *Circulation* 2002; 106 (6): 752–6. DOI: 10.1161/01.CIR.0000024109.12658.D4 PMID: 12163439

12. Wang K.T., Chen C.Y., Chen Y.T. et al. Improving success rates of percutaneous coronary intervention for chronic total occlusion at arural Hospital in East Taiwan. *Int J Gerontol* 2014; 8 (3): 157–61. DOI: 10.1016/j.ijge.2013.12.004

13. Sondagur A.R., Wang H., Cao Y., Lin S., Li X. Success rate and safety of coronary angiography and angioplasty via radial artery approach among a Chinese population. *J Invasive Cardiol* 2014; 26 (6): 273–5. PMID: 24907084

14. Nikolakopoulos I., Vemou E., Karacsonyi J. et al. Latest developments in chronic total occlusion percutaneous coronary intervention. *Expert Rev Cardiovasc Ther* 2020; 15 (7): 415–26. DOI: 10.1080/14779072.2020.1787153 PMID: 32594784

15. Lee S.H., Cho J.Y., Kim J.S. et al. A comparison of procedural success rate and long-term clinical outcomes between in-stent restenosis chronic total occlusion and de novo chronic total occlusion using multicenter registry data. *Clin Res Cardiol* 2020; 109 (5): 628–37. DOI: 10.1007/s00392-019-01550-7 PMID: 31552494

16. Kosyakovsky L.B., Austin P.C., Ross H.J. et al. Early invasive coronary angiography and acute ischaemic heart failure outcomes. *Eur Heart J* 2021; 42 (36): 3756–66. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab423 PMID: 34331056

17. Nerlekar N., Ha F.J., Verma K.P. et al. Percutaneous coronary intervention using drug-eluting stents versus coronary artery bypass grafting for unprotected left main coronary artery stenosis: A metaanalysis of randomized trials. *Circ Cardiovasc Interv.* 2016; 9 (12): e004729. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.116.004729 PMID: 27899408

18. Gao L., Liu Y., Sun Z., Wang Y., Cao F., Chen Y. Percutaneous coronary intervention using drug-eluting stents versus coronary artery bypass graft surgery in left main coronary artery disease an updated meta-analysis of randomized clinical trials. *Oncotarget* 2017; 8 (39): 66449–57. DOI: 10.18632/oncotarget.20142 PMID: 29029526

19. Thuijs D.J.F.M., Kappetein A.P., Serruys P.W. et al. Percutaneous coronary intervention versus coronary artery bypass grafting in patients with three-vessel or left main coronary artery disease:

10-year follow-up of the multicentre randomised controlled SYNTAX trial. *Lancet* 2019; 394 (10206): 1325–34. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)31997-X PMID: 31488373

20. Spadaccio C., Benedetto U. Coronary Artery Bypass Grafting (CABG) vs. Percutaneous Coronary Intervention (PCI) in the treatment of multivessel coronary disease: quo vadis—a review of the evidences on coronary artery disease. *Ann Cardiothorac Surg.* 2018; 7 (4): 506–15. DOI: 10.21037/acs.2018.05.17 PMID: 30094215

21. Baykan A.O., Gür M., Acele A. et al. Predictors of successful percutaneous coronary intervention in chronic total coronary occlusions. *Postępy Kardiol Interwencyjnej* 2016; 1 (1): 17–24. DOI: 10.5114/pwki.2016.56945 PMID: 26966445

22. Cimen S., Gooya A., Grass M., Frangi A. Reconstruction of coronary arteries from X-ray angiography: A review. *Medical Image Analysis* 2016; 32. DOI: 10.1016/j.media.2016.02.007

23. Vukicevic A.M., Çimen S., Jagic N. et al. Three-dimensional reconstruction and NURBS-based structured meshing of coronary arteries from the conventional X-ray angiography projection images. *Sci Rep* 2018; 8: 1711. DOI: 10.1038/s41598-018-19440-9

24. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active contour models. *Int. J. Comput. Vis.* 1988; 1 (4): 321–331. DOI: 10.1007/bf00133570

25. Xu C., Prince J.L. Generalized gradient vector flow external forces for active contours. *Signal Process.* 1998; 71: 131–9. DOI: 10.1016/S0165-1684(98)00140-6

26. Bappy D.M., Hong A., Choi E., Park J.-O., Kim C.-S. Automated three-dimensional vessel reconstruction based on deep segmentation and bi-plane angiographic projections. *Comput. Med. Imaging Graph.* 2021; 92: 101956. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2021.101956

27. Iyer K., Nallamothu B.K., Figueroa C.A. et al. A multi-stage neural network approach for coronary 3D reconstruction from uncalibrated X-ray angiography images. *Sci Rep* 2023; 13: 17603. DOI: 10.1038/s41598-023-44633-2

28. Wang Y., Banerjee A., Choudhury R., Grau V. (). Deep Learning-based 3D Coronary Tree Reconstruction from Two 2D Non-simultaneous X-ray. *Angiography Projections* 2024; 07. DOI: 10.48550/arXiv.2407.14616

29. Gruntzig A.R., Senning A., Siegenthaler W.E. Nonoperative dilatation of coronary- artery stenosis: percutaneous transluminal coronary angioplasty. *N Engl J Med.* 1979; 301: 61–68. DOI: 10.1056/nejm197907123010201

30. Fearon W.F., Nishi T., De Bruyne B. et al. Clinical outcomes and cost-effectiveness of fractional flow Reserve-guided percutaneous coronary intervention in patients with stable coronary artery disease: three-year follow-up of the FAME 2 trial (fractional flow Reserve versus angiography for multivessel evaluation). *Circulation* 2018; 137: 480–487. DOI: 10.1161/circulationaha.117.031907

31. Tonino P.A., De Bruyne B., Pijls N.H. et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *N Engl J Med.* 2009; 360: 213–224. DOI: 10.1056/NEJMoa0807611

32. Knuuti J., Wijns W., Saraste A. et al. ESC guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes: the task force for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J.* 2019; 2019. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz425

33. Gulati M., Levy P.D., Mukherjee D. et al. 2021 AHA/ACC/ASE/CHEST/SAEM/SCCT/ SCMR guideline for the evaluation and diagnosis of CHEST pain: executive summary: a report of the

American College of Cardiology / American Heart Association joint committee on clinical practice guidelines. *J Am Coll Cardiol.* 2021; 78: 2218–2261. DOI: 10.1016/j.jacc.2021.07.052

34. Parikh R.V., Liu G., Plomondon M.E. et al. Utilization and outcomes of measuring fractional flow Reserve in Patients with Stable Ischemic Heart Disease. *J Am Coll Cardiol.* 2020; 75: 409–419. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.10.060

35. Toth G.G., Toth B., Johnson N.P. et al. Revascularization decisions in patients with stable angina and intermediate lesions: results of the international survey on interventional strategy. *Circ Cardiovasc Interv.* 2014; 7: 751–759. DOI: 10.1161/circinterventions.114.001608

36. Meier B., Gruentzig A.R., Goebel N., Pyle R., von Gossler W., Schlumpf M. Assessment of stenoses in coronary angioplasty. Inter- and intraobserver variability. *Int J Cardiol.* 1983; 3: 159–169. DOI: 10.1016/0167-5273(83)90032-3

37. Rutishauser W., Nosedá G., Bussmann W.D., Preter B. Blood flow measurement through single coronary arteries by roentgen densitometry. Right coronary artery flow in conscious man. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med.* 1970; 109: 21–24. DOI: 10.2214/ajr.109.1.21

38. Tu S., Barbato E., Kłoszegi Z. et al. Fractional flow reserve calculation from 3- dimensional quantitative coronary angiography and TIMI frame count: a fast computer model to quantify the functional significance of moderately obstructed coronary arteries. *JACC Cardiovasc Interv.* 2014; 7: 768–777. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.03.004 PMID: 25060020

39. Schuurbiers J.C., Lopez N.G., Ligthart J., et al. In vivo validation of CAAS QCA-3D coronary reconstruction using fusion of angiography and intravascular ultrasound (ANGUS). *Catheter Cardiovasc Interv.* 2009; 73: 620–626. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.03.004

40. Migliavacca F., Petrini L., Massarotti P., Schievano S., Auricchio F., Dubini G. Stainless and shape memory alloy coronary stents: a computational study on the interaction with the vascular wall. *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2004; 2: 205–217. DOI: 10.1007/s10237-004-0039-6 PMID: 15029511

41. Wu W., Wang W., Yang D., Qi M. Stent expansion in curved vessel and their interactions: a finite element analysis *J. Biomech.* 2007; 40: 2580–2585. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2006.11.009 PMID: 17198706

42. Djukic T., Saveljic I., Pelosi G., Parodi O., Filipovic N. Numerical simulation of stent deployment within patient-specific artery and its validation against clinical data. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2019; 175: 121–127. DOI: 10.1016/j.cmpb.2019.04.005 PMID: 31104701

43. Djukic T., Saveljic I., Pelosi G., Parodi O., Filipovic N. A study on the accuracy and efficiency of the improved numerical model for stent implantation using clinical data. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2021; 207: Article 106196. DOI: 10.1016/j.cmpb.2021.106196 PMID: 34091419

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов:

Породиков А.А., Барулина М., Арутюнян В.Б. – концепция и дизайн исследования.

Азимов Ф.Ф., Иванов Я.А. – сбор и обработка материала.

Азимов Ф.Ф., Породиков А.А. – написание текста.

Биянов А.Н., Породиков А.А. – редактирование.

Все авторы одобрили окончательную версию текста статьи.

Ограничение исследования. Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо, и правила обращения с животными в случаях их использования в работе.

Поступила: 25.03.2025

Одобрена: 17.07.2025

Принята к публикации: 21.07.2025

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Возможности применения искусственного интеллекта при математическом моделировании коронарного кровотока / А.А. Породи́ков, А.Н. Би́янов, В.Б. Ару́тюнян, Ф.Ф. Ази́мов, М.А. Бару́лина, Я.Н. Ива́нов // Пермский медицинский журнал. – 2025. – Т. 42, № 4. – С. 41–54. DOI: 10.17816/pmj42441-54

Please cite this article in English as: Porodikov A.A., Biyanov A.N., Arutyunyan V.B., Azimov F.F., Barulina M.A., Ivanov Ya.N. Application of artificial intelligence in mathematical modeling of coronary blood flow. *Perm Medical Journal*, 2025, vol. 42, no. 4, pp. 41-54. DOI: 10.17816/pmj42441-54