

Ю.Д. Удалов, А.Т. Бетуганова, Т.А. Мартынова

ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГЕМОДИНАМИКЕ В АРТЕРИЯХ: ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ К ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Бетуганова Альбина Тимуровна: betuganova28@gmail.com

Резюме

В настоящей работе представлен комплексный историко-научный и биофизический анализ развития представлений о гемодинамике в артериальной системе. Рассматривается траектория научной мысли от эмпирических наблюдений традиционной медицины и эпохи Галилея до современных методов трехмерного компьютерного моделирования. Особое внимание уделено роли междисциплинарного синтеза физики, математики и медицины в формировании фундаментальных законов кровотока. На основе анализа предоставленного исторического материала и современных научных данных проводится критический разбор термина «объемная сфигмография», возникшего в советской медицинской литературе, и сопоставление его с международными клиническими рекомендациями. Статья демонстрирует, что современный этап характеризуется отказом от упрощенных одномерных моделей в пользу высокоразрешающих визуализирующих технологий и вычислительной гидродинамики

Ключевые слова: история медицины, гемодинамика, сфигмография

Для цитирования: Удалов Ю.Д., Бетуганова А.Т., Мартынова Т.А. Эволюция научных представлений о гемодинамике в артериях: от классической физики к вычислительному моделированию // Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна 2026. №2. С. 73–78 DOI: 10.33266/2782-6430-2026-2-73-78

Yu.D. Udalov, A.T. Betuganova, T.A. Martynova

Evolution of Scientific Concepts of Hemodynamics in Arteries: from Classical Physics to Computational Modeling

International Office, State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center
of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

Contact person: Betuganova Albina Timurovna: betuganova28@gmail.com

Abstract

This paper presents a comprehensive historical, scientific, and biophysical analysis of the development of concepts regarding hemodynamics in the arterial system. It examines the trajectory of scientific thought from the empirical observations of traditional medicine and the era of Galileo to modern methods of three-dimensional computer modeling. Particular attention is paid to the role of the interdisciplinary synthesis of physics, mathematics, and medicine in the development of fundamental laws of blood flow. Based on an analysis of the provided historical material and modern scientific data, a critical analysis of the term "volume sphygmography," which originated in Soviet medical literature, is provided and compared with international clinical guidelines. The article demonstrates that the current era is characterized by a rejection of simplified one-dimensional models in favor of high-resolution imaging technologies and computational fluid dynamics.

Keywords: history of medicine, hemodynamics, sphygmography

For citation: Udalov YuD, Betuganova AT, Martynova TA. Evolution of Scientific Concepts of Hemodynamics in Arteries: from Classical Physics to Computational Modeling. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin. 2026.2:73-78. (In Russian) DOI: 10.33266/2782-6430-2026-2-73-78

Введение

История изучения пульса и движения крови в организме человека насчитывает несколько тысячелетий. Традиционная китайская медицина на протяжении более чем 3000 лет опиралась на пальпацию радиального пульса как на центральный метод диагностики заболеваний. Одной из первых фундаментальных работ, посвященных анализу артериального пульса, является книга «Май Цзин», написанная Ван Шу-хэ в поздний период династии Хань

около 220 года нашей эры. Аналогичные древние традиции существовали в Индии, передаваясь преимущественно устно от учителя к ученику. В европейской античной традиции Гален описал 27 разновидностей пульса и их прогностическое значение. Проводя вивисекционные эксперименты, он правильно доказал, что артерии заполнены кровью, а не воздухом или «духами», как утверждали его предшественники. Тем не менее Гален ошибочно полагал, что артерии расширяются подобно кузнечным

мехам благодаря некой «пульсирующей силе», притягивая кровь, а не расширяются пассивно под давлением крови, поступающей из сердца.

Подлинное рождение гемодинамики как точной науки произошло в эпоху Возрождения и Нового времени, когда на смену натурфилософии пришли строгие количественные и экспериментальные методы. Галилео Галилей наиболее ярко охарактеризовал этот переход своим знаменитым правилом: «измерил – значит изучил». Преподавая математику в итальянской Падве на рубеже XVI и XVII веков, Галилей оказал колоссальное влияние на формирование новой научной парадигмы. Его лекции слушал Уильям Гарвей, прибывший в Италию из Англии в рамках многолетнего образовательного путешествия. Учителем Гарвея по праву считался Джироламо Фабрицио д'Аквапенденте, однако на выводы Гарвея о кровообращении фундаментальное влияние оказал именно количественный подход Галилея. Проведя расчеты, Гарвей установил, что за полчаса через сердце овцы проходит количество крови, равное ее весу. Это математически исключало возможность непрерывного образования крови в печени, как считалось ранее, и доказывало концепцию ее кругооборота. Поскольку микроскоп еще не был изобретен, Гарвей не видел капилляров, но дедуктивно вывел их существование. Это отражено в дошедшей до нас книге «Анатомическое эссе о движении сердца и крови», которая является всемирным достоянием [1]. Полный путь циркуляции был окончательно идентифицирован лишь в 1661 году, когда Марчелло Мальпиги описал капилляры в легких лягушки.

Физико-математические основы гемодинамики: от классической механики к гидродинамике

Дальнейшее развитие науки о кровообращении требовало привлечения фундаментальных законов физики. На рубеже XVII и XVIII веков существенный вклад в понимание природы жидкостей внес сэр Исаак Ньютон. В своих «Математических основах физики» он математически описал концепцию вязкости жидкости. Ньютон четко продемонстрировал, что силы, необходимые для перемещения слоев жидкости относительно друг друга, прямо пропорциональны градиентам скорости. Данная сила получила название напряжения сдвига, а константа пропорциональности – динамической вязкости жидкости [2]. Эти положения спустя столетия легли в основу изучения кровотока в артериях, в частности в оценке взаимоотношений давления, потока и сосудистого сопротивления.

Именно будучи президентом Королевского общества, Ньютон вдохновил преподобного Стивена Гейлза на написание книги «Гемостатика», изданной в 1733 году [3]. Гейлз был выдающимся ученым-самоучкой, успешно совмещавшим церковную деятельность и науку. Он стал первым, кто произвел прямые измерения артериального давления у животного (вставив канюлю с вертикальной стеклянной трубкой в сонную артерию лошади), и оценил физиологическую реакцию давления на острую кро-

вопотерю. Менее известным, но не менее важным достижением Гейлза стала формулировка концепции периферического сосудистого сопротивления. Кроме того, Гейлз сравнил артериальную систему с перевернутой заполненной воздухом камерой пожарной тележки, которая сглаживала пульсирующий поток воды, делая его непрерывным на выходе из сопла шланга. Он осознал, что артериальная система функционирует как буфер, а артериолы – как сопротивление. В немецком переводе его работы эта камера сжатия упоминалась как Windkessel. Данная модель и в современности описывает амортизирующую роль артериальной эластической системы [4]. Несколько позже Джованни Борелли, которого многие считают отцом биоинженерии за его глубокие исследования мышц и суставов, также описал емкостный эффект эластических артерий в сглаживании пульсирующего потока крови.

Развитие математического аппарата в XVIII веке заложило основы для современных гидродинамических подходов. Леонард Эйлер установил общие уравнения движения жидкости, которые мало чем отличаются от используемых в современной прикладной математике [5]. Его друг и коллега Даниил Бернулли сформулировал основополагающий закон, описывающий распределение давления в связке с превращениями потенциальной и кинетической энергии [6]. Следует подчеркнуть, что Эйлер и Бернулли в своих уравнениях пренебрегали касательными напряжениями и потерями энергии из-за вязкости. В современной медицинской практике при использовании их уравнений вязкостные потери энергии обязательно учитываются как фактор, подлежащий оценке.

В XIX веке полные трехмерные дифференциальные уравнения, описывающие течение реальной жидкости с учетом вязкости, были выведены независимо французским физиком Анри Навье в 1817 году и британским математиком Джорджем Стоксом в 1845 году [7]. Уравнения Навье-Стокса представляют собой законы движения и вязкости Ньютона, примененные к текущей сплошной среде. Ввиду того, что они являются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, на протяжении десятилетий ученые могли решать их лишь для предельно упрощенных геометрических и потоковых моделей. Данное ограничение на пути к пониманию артериального кровотока в реалистичной геометрии сосудов было преодолено лишь в последние десятилетия благодаря появлению высокоскоростных компьютеров [8].

Параллельно развивалось учение об упругости сосудов. Томас Юнг известен не только теорией цветного зрения, но и работами по скорости распространения пульсовой волны в зависимости от эластичности среды. Его изыскания предшествовали описанной в 1870-х годах Моенсом и Кортевеком фундаментальной взаимосвязи модуля упругости и скорости волны, а также более ранним классическим трудам братьев Веберов [4]. Эти исследования имеют колоссальное значение для современного компьютерного моделирования взаимодействия жидкости со структурой [8].

Инструментальная революция XIX века и эволюция сфигмографии

XIX век стал эпохой создания первых приборов для регистрации гемодинамических параметров. Жан Луи Мари Пуазейль начал исследования кровообращения еще будучи студентом-медиком. Его главным научным достижением стало установление математической взаимосвязи между потоком, градиентом давления и геометрическими размерами трубки (формула Хагена-Пуазейля). Пуазейль также предложил использовать для инвазивного измерения артериального давления U-образно изогнутую трубку (рисунок 1, А), заполненную ртутью, благодаря чему миллиметры ртутного столба стали общепринятой единицей измерения [9].

Манометр Пуазейля был дополнен кимографом Карла Фридриха Вильгельма Людвига (рисунок 1, В). Кимограф Людвига позволил осуществлять непрерывную механическую запись пульсовых колебаний давления, и его значение для развития физиологии сопоставляют со значением изобретения книгопечатания для цивилизации [10].

Дальнейшее развитие методов исследования артерий связано с появлением сфигмографа, предложенного Карлом фон Фирордтом в 1855 году. Фирордт продемонстрировал, что пульс может быть полностью пережат при помощи системы рычагов с аптекарскими грузами, создающими необходимое внешнее давление. Пульсация артерии при этом записывалась на вращающийся барабан кимографа Людвига. Как только масса грузов превышала определенный предел и кровоток в лучевой артерии прекращался, пульс на сфигмограмме пропадал [11].

Другой тип сфигмографа был разработан Этьеном-Жюлем Маре [12] в модификации, выполненной знаменитым часовщиком Абрахамом-Луи Бреге. Маре известен в истории также изобретением фотурюжя и фундаментальным вкладом в развитие кинематографа, а Бреге прославился изобретением турбийона для механических часов. В исторической литературе часто возникает терминологическая путаница: сфигмограф Маре ошибочно называют первой попыткой неинвазивного измерения давления. В действительности устройство Маре не измеряло давление, а лишь графически регистрировало пульсовую волну, позволяя визуализировать ее морфологические особенности (такие как *pulsus magnus* или *pulsus dicroticus*). Приборы Маре получили всемирное распространение благодаря внешней эстетике, приданной знаменитым часовщиком, но спустя несколько десятилетий вышли из употребления.

Метод Фирордта, основанный на пережатии артерии, напротив, получил активное практическое развитие (рисунок 1, Е и F). Разновесы из его устройства были заменены жидкостными камерами в аппарате Самуэля Зигфрида Карла фон Баша, а затем пневматической манжетой в изобретении Сципионе Рива-Роччи в 1896 году [11, 12]. Хотя графическая запись пульса в этих приборах поначалу сохранялась, их стали называть сфигмоманометрами, так как основной целью было измерение (μετρέω) противодействия, прекращающего биение пульса.

Маре также совершил прорыв в области прямого измерения кровотока, используя двойную трубку Пито и опираясь на закон Бернулли [13]. Его исторические записи удивительно похожи на современные доплерограммы, четко демонстрируя фазу обратного кровотока в нисходящей грудной аорте и бедренной артерии.

Для понимания физических явлений, использованных в медицине, важно подчеркнуть временной разрыв между открытием явления и его клиническим применением. Так, обоснование эффекта Доплера было представлено Кристианом Андреасом Допплером в 1842 году, а пьезоэлектрический эффект открыт Жаком и Пьером Кюри, однако в ультразвуковых датчиках эти явления стали массово применяться лишь в середине XX века [14]. В 1883 году Осборн Рейнольдс описал безразмерное отношение инерционных сил к силам вязкого трения (число Рейнольдса), определяющее возникновение турбулентности [15]. В то же время открытие рентгеновских лучей Вильгельмом Конрадом Рентгеном практически сразу повлекло за собой описание Йоханом Георгом Менкебергом артериосклероза с медиальной кальцификацией [16].

Математический анализ гемодинамики в XX веке и советская школа

Достижения XX века характеризовались ускоряющимся использованием прикладной математики и сосудистой биологии. Признание получили работы математика Джона Уомерсли, который совместно с Дональдом Макдональдом исследовал пульсирующий артериальный кровоток. Уомерсли решил уравнения Навье-Стокса для пульсирующего течения в жесткой цилиндрической трубке, определив безразмерный критерий подобия – число Уомерсли [17]. Квадрат этого числа в зарубежной физической литературе часто называют числом Стокса. В физическом смысле число Уомерсли выражает соотношение транзитной (нестационарной) силы инерции и силы вязкого трения. Когда данное число мало (равно единице или меньше), частота пульсаций достаточно низкая для того, чтобы в течение каждого сердечного цикла развивался параболический профиль скорости, а поток находился практически в фазе с градиентом давления. При больших значениях числа Уомерсли (более 10) профиль скорости становится плоским, а средний поток отстает от градиента давления на 90 градусов. В сосудистой сети человека число Уомерсли стремится к единице на уровне терминальных артерий.

Середина XX века стала временем зарождения диагностического ультразвука [14]. Быстро развивалась магнитно-резонансная томография (МРТ): от 1938 года, когда Исидор Исаак Раби заставил молекулярные пучки в магнитном поле излучать радиоволны, до первых МРТ-изображений человека прошло около 40 лет [18], а еще через 10 лет визуализация кровотока стала рутинной клинической практикой [19]. В 1957 году Дональд Фрай впервые ввел концепцию неблагоприятного воздействия силы сдвига жидкости на стенки сосудов,

доказав, что высокое напряжение сдвига на уровне 420 дин/см² вызывает гистологические и биохимические изменения в артериальных эндотелиальных клетках [20].

Неблагоприятные социальные процессы, мировые войны и последующая изоляция СССР привели к тому, что в XX веке лишь малое число отечественных ученых достигло всемирно признанных результатов в области гемодинамики. Безусловным лидером стал хирург Николай Сергеевич Коротков, чей короткий доклад в Императорской военно-медицинской академии в ноябре 1905 года об аускультативном способе измерения давления принес ему мировую славу [21]. Успехи Короткова в сосудистой хирургии, возможно, предшествовали трудам Рудольфа Матаса, которого с подачи Уильяма Ослера называют пионером этого направления.

Не исключено, что некоторые исследователи, публикующие свои труды в России в XX веке, не получили признания из-за случайности. Так, например, профессор из Швеции Петер Нильссон, считающийся одним из пионеров концепции старения артерий, утверждал, что таким пионером вполне мог быть не он, а Георгий Фёдорович Ланг.

Критический анализ концепции объемной сфигмографии

В более поздней советской медицинской литературе трудно обнаружить труды по гемодинамике, внесшие фундаментальный вклад в мировую науку. Некоторые сведения, признанные ошибочными, до сих пор преподносятся отдельными авторами как историческое наследие. Примером является классификация методов исследования гемодинамики, предложенная в 1965 году В.Л. Карпманом в книге «Фазовый анализ сердечной деятельности» [цит. по 22]. Известно, что Карпман разделял сердечный цикл на 12 фаз, объединенных в 4 периода (периоды напряжения и изгнания составляют систолу желудочков, а расслабления и наполнения – диастолу). В своей работе в области спортивной медицины он использовал преимущественно динамокардиографию и баллистокардиографию. Вероятно, лишь умозрительные заключения способствовали включению им в классификацию термина «объемная сфигмография». Предполагалось, что данный метод занимает промежуточное место между классической сфигмографией (считывающей точку пульса на поверхности тела) и плетизмографией (регистрирующей изменения объема части тела, связанные с динамикой кровенаполнения).

В современности данный термин, «объемная сфигмография», настойчиво распространяется среди русскоговорящей медицинской общественности, для обозначения способа «работы» устройств с пневматическими манжетами, служащими в качестве приёмников сигнала. Так, например, авторы, занимающиеся «новыми методами исследования» совершенно необоснованно, без аргументов, ведут речь о «массовом внедрении» «объемной сфигмографии» в практическое здравоохранение (якобы для измерения СПВ), обсуждая, однако, не клини-

ческие аспекты, а приводя технические описания многочисленных одноканальных (одноманжеточных) и многоканальных (многоманжеточных) устройств, и называя их «сфигмографами» [22].

Абсурдность ситуации заключается в том, что пневматическая манжета способна улавливать лишь очень сглаженные, бедные информацией и отличающиеся исключительно только амплитудой осцилляции [23], но никак не истинные сфигмограммы. Подобные осцилляции лежат в основе «осциллометрического» метода измерения давления, но не пригодны для качественного анализа пульсовой волны.

Европейское общество по гипертензии и Американская ассоциация сердца приняли жесткие стандарты: для измерения СПВ в практике могут рекомендоваться только каротидно-феморальные методы (кфСПВ), для которых пригодны аппланационные или ультразвуковые доплеровские датчики, но не манжеты [24]. Использование многоманжеточных систем (например, для расчета сердечно-лодыжечного сосудистого индекса CAVI) приводит к прохождению волной слишком протяженных и неоднородных участков артериального русла [25]. Это вызывает неинтерпретируемую неоднозначность пройденного волной пути и делает невозможным точное сопоставление полученных значений со СПВ в аорте [26]. Что касается одноманжеточных систем для суточного мониторинга СПВ, они базируются на необоснованных модельных предположениях и признаны экспертами непригодными для оценки субклинического поражения органов [28].

В мировой научной литературе термин «объемная сфигмография» отсутствует, за исключением публикаций отдельных русскоязычных авторов и старых работ, не вошедших в мировое научное наследие человечества.

Настоящее время: визуализация, вычислительная гидродинамика и перспективы

Современный этап исследований характеризуется не развитием разновидностей сфигмографов, а возникновением принципиально новых методов на основе мощного прогресса вычислительной техники. Внеофисные методы измерения давления, а именно домашнее мониторирование [29, 30], демонстрируют высокую прогностическую ценность при оценке вариабельности [31]. Исследования гемодинамики продолжают проникать в различные области знаний, включая такие ранее не существующие отрасли, как авиационная [32–34] и даже космическая кардиология.

Главным драйвером прогресса стал беспрецедентный рост диагностического значения визуализирующих методов: МРТ, компьютерной томографии (КТ), позитронно-эмиссионной томографии, трансторакального и внутрисосудистого УЗИ (ВСУЗИ), а также оптической когерентной томографии (ОКТ) [35]. Разрабатываются новые контрасты (например, микропузырьки из н-бутилцианоакрилата для локализации участков эндотелиальной дисфункции [36]) и гибридные технологии визуализации [37, 38].

Благодаря росту вычислительных мощностей получили развитие методы вычислительной гидродинамики (CFD), анализа конечных элементов

и моделирования взаимодействия жидкости со структурой (FSI). Они используются для подробной количественной оценки гемодинамических сил на основе реальных изображений сосудов. Устаревшие классические математические методы не позволяют выводить уравнения, описывающие сложные физические проблемы в артериях конкретного человека. В рамках вычислительного анализа геометрия просвета артерий представляется тысячами крошечных ячеек. Так, для точного расчета кровотока в типичной разветвляющейся артерии, такой как сонная артерия или брюшная аорта, обычно используют от 20 000 до 70 000 элементов трехмерной сетки. Дискретизированные фундаментальные уравнения механики жидкости решаются путем многократного сопоставления значений скоростей и давлений на каждом узле.

Компьютерные симуляции подтверждают, что геометрическая асимметрия ветвления сосудов и вариации их радиусов критически влияют на распределение пристеночного напряжения сдвига [39]. Внедрение подобных систем численного анализа в клиническую практику является главным вектором развития современной гемодинамики.

Заключение

Анализ многовековой эволюции представлений о движении крови в артериях демонстрирует последовательный переход от эмпирических и качественных суждений к строгим физическим и математическим моделям. Классические законы гидродинамики, сформулированные в XVIII–XIX веках, заложили теоретический фундамент дисциплины, однако их прямое аналитическое применение к сложной ветвящейся и эластичной сосудистой системе человека оказалось ограниченным. В XX веке инструментальное развитие позволило внедрить в клиническую практику прямые методы измерения артериального давления и ультразвуковой доплерографии. В то же время возникшие в советской медицине суррогатные концепции, такие как «объемная сфигмография», не выдержали испытания временем и современными стандартами доказательной метрологии. Настоящий этап исследований полностью базируется на междисциплинарном синтезе высокоразрешающих томографических методов и трехмерной вычислительной гидродинамики, что открывает широкие перспективы для персонализированной диагностики и прогнозирования сосудистых катастроф.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ/REFERENCES

- William Harvey, *Exercitation Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. Frankfurt: William Fitzer. 1628: 72 p. Available from: <https://archive.org>
- Sect. IX. De motu Circulari Fluidorum. B: Newton, Isaac, Sir. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Daniel Adee, 1846: 594 p. Available from: <https://archive.org>
- Stephen Hales. *Statical Essays: containing Haemastatics*. 2nd ed. London, 1740: 361 p. Available from: <https://archive.org>
- McDonald's Blood Flow in Arteries, 7th ed: Theoretical, Experimental and Clinical Principles. Edited By Wilmer W. Nichols, Michael O'Rourke, Elazer R. Edelman, Charalambos Vlachopoulos. CRC Press. 2022; 854 p. ISBN: 978-0-815-36884-7
- Demidov S.S. Mathematics in Russia at the Turns of History. Digest of articles. MTsNMO, 2021. 340 p. (In Russ) Демидов С.С. Математика в России на поворотах истории. Сборник статей. МЦНМО, 2021. 340 с. ISBN: 978-5-4439-1574-6
- Filobello-Nino U, Vazquez-Leal H, Huerta-Chua J, et al. A symmetric version of the Euler equations by using Generalized Bernoulli Method. *Heliyon*. 2023 Jun 7;9(6):e16947. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16947.
- Costa G, Barral A, Dubrulle B. Reversible Navier-Stokes equation on logarithmic lattices. *Phys Rev E*. 2023 Jun;107(6-2):065106. doi: 10.1103/PhysRevE.107.065106.
- He Y, Northrup H, Le H, Cheung AK, Berceli SA, Shiu YT. Medical Image-Based Computational Fluid Dynamics and Fluid-Structure Interaction Analysis in Vascular Diseases. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022 Apr 27;10:855791.
- Poiseuille JLM. *Recherches sur la Force du Coeur Aortique*. Dissertation, Paris: Didot le Jeune. 1828. 48 p. Available from: <https://archive.org>
- Meinertz T. Zu Unfairly Forgotten: Carl Ludwig: The Founder of Modern Physiology *Dtsch Med Wochenschr*. 2021;146(24-25):1599-1604. (In German) Meinertz T. Unrecht vergessen: Carl Ludwig, Begründer der modernen Physiologie. *Dtsch Med Wochenschr*. 2021;146(24-25):1599-1604. doi: 10.1055/a-1338-3898.
- Roguin A. Scipione Riva-Rocci and the men behind the mercury sphygmomanometer. *Int J Clin Pract*. 2006 Jan;60(1):73-9.
- Karamanou M, Papaioannou TG, Tsoucalas G, et al. Blood pressure measurement: lessons learned from our ancestors. *Curr Pharm Des*. 2015;21(6):700-4. doi: 10.2174/1381612820666141023163313
- Marey EJ. *Physiologie medicale de la circulation du sang*. Paris: Adrien Delahaye. 1863; 568 p. Available from: <https://archive.org>
- Nielsen MB, Sogaard SB, Bech Andersen S, et al. Highlights of the development in ultrasound during the last 70 years: A historical review. *Acta Radiol*. 2021 Nov;62(11):1499-1514. doi: 10.1177/02841851211050859.
- Lauder BE. First steps in modelling turbulence and its origins: a commentary on Reynolds (1895) 'On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion'. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2015 Apr 13;373(2039):20140231. doi: 10.1098/rsta.2014.0231.
- Yamamoto Y, Ishikawa Y, Shimpo M, Matsumura M. Mönckeberg's sclerosis. *J Gen Fam Med*. 2020 Sep 28;22(1):55-56. doi: 10.1002/jgf2.380
- Chen X, Zhuang J, Wu Y. The effect of Womersley number and particle radius on the accumulation of lipoproteins in the human aorta. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2020 Aug;23(10):571-584. doi: 10.1080/10255842.2020.1752681.
- Edelman RR. The history of MR imaging as seen through the pages of radiology. *Radiology*. 2014 Nov;273(2 Suppl):S181-200.
- Soulut G, McCarthy P, Markl M. 4D Flow with MRI. *Annu Rev Biomed Eng*. 2020 Jun 4;22:103-126. doi: 10.1146/annurev-bioeng-100219-110055.
- Maselli D, Garoffolo G, Cassanmagnago GA, et al. Mechanical Strain Induces Transcriptomic Reprogramming of Saphenous Vein Progenitors. *Front Cardiovasc Med*. 2022 May 27;9:884031. doi: 10.3389/fcvm.2022.884031.
- Andreev A.A., Ostroushko A.P. Nikolai Sergeevich Korotkov – a Russian surgeon, a pioneer of modern vascular surgery. To the 145th anniversary of the birth. *Vestnik eksperimental'noy i klinicheskoy khirurgii* 2019; 12:1: 83-83. (In Russ) Андреев А.А., Остроушко А.П. Николай Сергеевич Коротков – российский хирург, пионер современной сосудистой хирургии. К 145-летию со дня рождения. *Вестник экспериментальной и клинической хирургии* 2019; 12:1: 83-83. doi: 10.18499/2070-478X-2019-12-1-83-83
- Zairova A.R., Rogoz A.N. Volume sphygmography today. *Medical alphabet*. 2018;4(36):8-18. (In Russ.) Заирова А.Р., Рогоза А.Н. Объемная сфигмография сегодня. *Медицинский алфавит*. 2018;4(36):8-18. ISSN 2078-5631
- Posokhov IN, Moroz-Vadalazhskaya NN. Oscillometric method: what is it and is it suitable for measuring blood pressure in all patients? *Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2024;23(9):4075. (In Russ) Посохов И. Н., Мороз-Водолажская Н. Н. «Осциллометрический» метод: что это такое и всем ли пациентам он подходит для измерения артериального давления? *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2024;23(9):4075. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4075>.
- Mancia G, Kreutz R, Brunström M, et al. 2023 ESH Guidelines for the management of arterial hypertension The Task Force for the management of arterial hypertension of the European Society of Hyper-

- tension Endorsed by the European Renal Association (ERA) and the International Society of Hypertension (ISH). *J Hypertens*. 2023 Jun 21. Epub ahead of print. doi: 10.1097/HJH.0000000000003480.
25. Posokhov IN. Pulse wave velocity 24-hour monitoring with one-site measurements by oscillometry. *Med Devices (Auckl)*. 2013;6:11-5. doi: 10.2147/MDER.S42082.
 26. Segers P, Rietzschel ER, Chirinos JA. How to Measure Arterial Stiffness in Humans. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2020 May;40(5):1034-1043. doi: 10.1161/ATVBAHA.119.313132.
 27. Salvi P, Scalise F, Rovina M, et al. Noninvasive Estimation of Aortic Stiffness Through Different Approaches. *Hypertension*. 2019 Jul;74(1):117-129. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.119.12853.
 28. Chirinos JA, Segers P, Hughes T, Townsend R. Large-Artery Stiffness in Health and Disease: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol*. 2019 Sep 3;74(9):1237-1263. doi: 10.1016/j.jacc.2019.07.012.
 29. Posokhov IN. On the history of 24-hour blood pressure monitoring. A. I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin. 2023;4:62-5. (In Russ.) Посохов И.Н. К истории суточного мониторингирования артериального давления. Клинический вестник ФМБЦ им. А. И. Бурназяна. 2023;4:62-5. doi:10.33266/2782-6430-2023-4-62-65.
 30. Posokhov IN, Praskurnichiy EA. What's changed in home blood pressure monitoring over the decade? *Russian Journal of Cardiology*. 2024;29(3S):5966. (In Russ.) Посохов И.Н., Праскурничий Е.А. Что изменилось в домашнем мониторингировании артериального давления за десятилетие? Российский кардиологический журнал. 2024;29(3S):5966. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-5966>.
 31. Posokhov IN, Betuganova AT. Evolution and Advancements in Home Blood Pressure Variability: A Current State-of-the-Art Summary. *Am J Cardiol*. 2026 Feb 27;266:86-91. doi: 10.1016/j.amjcard.2026.02.047.
 32. Posokhov I. N., Praskurnichiy E. A., Lizunov V. Yu. Algorithm of medical decisions when planning air travel for passengers after cardiac surgery. *Aerospace and environmental medicine*. - 2025. - Vol. 59, No. 1. - P. 11-16. (In Russ) Посохов И. Н., Праскурничий Е. А., Лизунов В. Ю. Алгоритм врачебных решений при планировании авиаперелета пассажирами после кардиохирургических вмешательств. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. - 2025. - Т. 59, № 1. - С. 11-16. - <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2025-59-1-11-16>.
 33. Posokhov I.N., Praskurnichiy E.A. Evaluation of opportunity for air traveling of patients with cardiac arrhythmias. *Journal of Arrhythmology*. 2023;30(3):e11-e18. (In Russ.) Посохов И.Н., Праскурничий Е.А. Оценка пригодности к авиапутешествиям пациентов с нарушениями ритма сердца. *Вестник аритмологии*. 2023;30(3):e11-e18. <https://doi.org/10.35336/VA-2023-3-1196>
 34. Posokhov I.N., Praskurnichiy E.A. Assessment of medical risks in airline passengers with recent acute and chronic coronary syndromes. *Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2024;23(4):3916. (In Russ.) Посохов И.Н., Праскурничий Е.А. Оценка медицинских рисков у авиапассажиров с недавним острым и хроническими коронарными синдромами. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2024;23(4):3916. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-3916>
 35. Nishimiya K, Matsumoto Y, Shimokawa H. Recent Advances in Vascular Imaging. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2020 Dec;40(12):e313-e321. doi: 10.1161/ATVBAHA.120.313609.
 36. Schuurman AS, Vroegindewey M, Kardys I, et al. Near-infrared spectroscopy-derived lipid core burden index predicts adverse cardiovascular outcome in patients with coronary artery disease during long-term follow-up. *Eur Heart J*. 2018; 39:295–302. doi: 10.1093/eurheartj/ehx247
 37. Ughi GJ, Wang H, Gerbaud E, et al. Clinical characterization of coronary atherosclerosis with dual-modality oct and near-infrared autofluorescence imaging. *J Am Coll Cardiol*. 2016; 9:1304–1314. doi: 10.1016/j.jcmg.2015.11.020.
 38. Curaj A, Wu Z, Rix A, et al. Molecular ultrasound imaging of junctional adhesion molecule depicts acute alterations in blood flow and early endothelial dysregulation. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2018; 38:40–48 doi: 10.1161/ATVBAHA.117.309503.
 39. Simon Wu X, Shields A, Vanderbilt E, et al. Determining 3D Distributions of Pulsatile Blood Flow Using Orthogonal Simultaneous Bi-plane High-Speed Angiography (SB-HSA) with 1000 fps CdTe Photon Counting Detectors for 3D X-ray Particle Image Velocimetry (3D-XPIV) compared to Results Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2023 Feb;12468:124680N. doi: 10.1117/12.2653617.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 23.11.2025. **Принята к публикации:** 25.12.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 23.11.2025. **Accepted for publication:** 25.12.2025