

1. Предпосылки создания новой фундаментальной науки – кардиометрии

1.1 Исторически сложившаяся парадигма в кардиологии

Современные основы теории кардиологии закладывались с момента создания В. Эйтхо-венем электрокардиографа для регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) и ее использования в 1906 для диагностических целей. Это позволило начать исследовать в динамике функции сердца и систематизировать знания, ранее полученные анатомическим путем. С тех пор изменились технические средства регистрации ЭКГ, но и сегодня она является основным универсальным средством диагностики.

Данные, получаемые с помощью ЭКГ ложились в основу теории функционирования сердечно-сосудистой системы. Понятие электрокардиографии расширялись. Сформировался класс электрокардиографической аппаратуры, в который вошли фонокардиографы, реографы, балистокардиографы и более современные аппараты, такие как ультразвуковые сканеры и томографы. Появился метод синхронного анализа нескольких электрокардиосигналов, получивший название поликардиографический.

Получаемые данные о функционировании сердечно – сосудистой системы определили уровень знаний, который позволил создать теорию функционирования сердца. Стало считаться, что важными диагностическими критериями являются: ритм сердца, его анатомическое расположение в грудной клетке согласно угла наклона электрической оси, нарушение проводимости нервной системы сердца. Также стало общепринятым формировать базу данных различных форм ЭКГ.

Отмеченное явилось основой для создания теории кардиологии. Именно электрокардиологические сигналы явились источником информации для создания современной теории кардиологии.

Однако, полностью отсутствовали критерии оценки гемодинамики. Считалось, что оценкой гемодинамики являются величины систолического и диастолического артериального давления, измеряемые стандартными приборами косвенного измерения. Появление томографи-

ческого сканирования не расширило понимания гемодинамики.

Стандартизация кардиологических приборов не привела к единым принципам интерпретации кардиосигналов. В практику была введена доказательная медицина, основанная на статистических принципах доказательства. Но, она не решила проблему верификации диагнозов. Одни и те же изменения формы ЭКГ различными специалистами понимаются по-разному.

Необходимость лечения патологий привела к более интенсивному развитию фармакологии. Сформировавшаяся теория метаболических процессов в мышцах сердца позволила создать целый ряд кардиологических фармацевтических препаратов. Однако, в большинстве случаев они рекомендуются без учета оценки изменения процессов, контролируемых электрокардиосигналами.

Большой вклад в парадигму знаний в кардиологии продолжают вносить кардиохирурги. Уникальные операции на сердце возможны только высокопрофессиональными специалистами. Но их вклад в теорию гемодинамики не столь велик. Кардиохирургия основана на опыте, который передается из поколения в поколение. Если новые кардиологические теории вносят изменения в количественные показатели операций, то это может вызвать трудности в подготовке кадров и снижении качества операций. Это сложная проблема и ее надо решать очень осторожно.

Главной проблемой теории кардиологии является отсутствие адекватной математической модели гемодинамики. Именно этот факт повлиял на формирование парадигмы знаний в кардиологии. Принятый за основу объяснения процессов гемодинамики ламинарный режим течения не соответствует действительности. Все диагностические критерии, которые пытались создаваться на его основе, не подтвердились на практике. Это явилось основой глобальных противоречий, не позволивших обеспечить положительную динамику развития кардиологии.

1.2 Противоречия, не позволившие ввести в теорию кардиологии законы естествознания

Физиками были описаны два типа течения жидкости: турбулентный и ламинарный. Критерием их оценки является направление линий тока частиц при их движении в потоке в жестких трубках, которые направлены параллельно оси трубы. Поперечные смещения частиц отсутствуют. Такое движение может существовать без пульсаций скоростей и давлений.

Сразу возникает вопрос об адекватности этих условий в реальном пульсирующем кровотоке и изменяющемся давлении. Ответ однозначно отрицательный. Поэтому математики пытались описать различные граничные условия, способствующие эффективному течению крови в эластичных сосудах. Это не было успешным. Более того, это не позволило ввести законы физики в кардиологию. До сих пор не было ни одного математического уравнения для расчета каких-либо гемодинамических величин, которые бы служили критериями диагностики. Есть только соответствия признаков изменения форм кардиосигналов каким-то патологическим процессам. Полностью отсутствуют понятия гемодинамики [1].

При отсутствии законов физики нет возможности относить кардиологию к естественным наукам. Законы являются основой для познания природы через практику. Любое наблюдаемое явление необходимо логически анализи-

ровать и доказывать его соответствие истине. Любое изменение формы электрокардиосигнала должно быть логически обосновано и аналитически доказано соответствие истине, точнее говоря, процессам его вызвавшим. Для этого в естественных науках существует аксиоматика. В ее основе лежат законы, позволяющие формулировать утверждения, принимаемые в дальнейшем без доказательства, из которых выводятся теоремы и правила. При анализе данных важна логика анализа. Все рассуждения должны быть логически не противоречивы.

Отметим сложившиеся в кардиологии противоречия. Их много. В первую очередь нет единого и полного понимания фазовой структуры сердечного цикла. Логически нет обоснования, почему из десяти фаз сердечного цикла до сих пор не описано четыре основных? Нет объяснения сокращению мышц у изолированного сердца. Выявляемые нарушения проводимости в нервной системе сердца до сих пор не лечатся. При этом они могут наблюдаться в положении лежа и отсутствовать в положении стоя. Нет понимания природы экстрасистол. Можно продолжить этот перечень. Но результатом будет главный вывод: до сих пор нет теории здорового сердца, не определены граничные условия норма – патология.

1.3 Уровень понимания системной гемодинамики в кардиологии

Чтобы адекватно оценить уровень знаний, представленный в теории кардиометрии, целесообразно знать для сравнения уровень понимания системной гемодинамики в кардиологии.

Полезно исходить из понимания слова «гемодинамика». В «Большой медицинской энциклопедии» слово обозначает – «(греч. *haima* кровь + *dynamikos* сильный, относящийся к силе) – раздел физиологии кровообращения, использующий законы гидродинамики для исследования причин, условий и механизмов движения крови в сердечно-сосудистой системе» [2]. В тоже время термин «гемодинамика» понима-

ется по-разному, но интегральная оценка сводится к пониманию условий, обеспечивающих движение крови по сосудам.

Количество доступных врачам параметров для оценки гемодинамики всего два: артериальное давление и частота сердечных сокращений. Учитывая, что это далеко не главные критерии оценки гемодинамики, так как они не характеризуют формирование и поддержания структуры кровотока, то становится понятным, что в кардиологии существуют только эпизоды теории гемодинамики и соответственно такие же частные практические возможности диаг-

ностики, не отражающие многообразие связей сердечно – сосудистой системы.

Важно знать и понимать, что гемодинамику необходимо диагностировать не только на основе знаний анатомии, но и при наличии информации: о фазовой структуре сердечного цикла, о

метаболических процессах в мышцах сердца и функциях сердечно сосудистой системы.

Это возможно только при наличии адекватной математической модели гемодинамики, которой до настоящего времени не было создано.

1.4 Математическое моделирование в кардиологии

В последние десятилетия прошлого века уже была ясна необходимость в формировании междисциплинарного подхода к исследованию энергетически эффективных механизмов и других особенностей формирования и реализации кровообращения в условиях физиологической нормы и при различных патологиях [3-9].

Например, в [3] усилия участников этого важного для практической медицины процесса сравниваются с возведением своего рода «вавилонской башни» из-за сопряженной с ним проблемой «смещения языков», используемых математиками, физиками, биологами и врачами. Соответственно основной задачей, решаемой в [3-9] явилось создание своего рода толкового словаря, разрешающего хоть в какой-то степени эту языковую проблему.

Одновременно при этом дается уточнение границ применимости для использования классических гидромеханических и других математических моделей и методов в отношении биологических систем вообще и системы кровообращения в частности. Например, приближение сплошной среды используется в классической гидродинамике в пределе, в котором имеет смысл рассмотрение лишь таких масштабов движения сплошной среды, которые на много порядков превышают длину свободного пробега молекул [10]. Соответственно, определяется область применимости модели сплошной среды по отношению к крови и рассмотрению ее плотности как параметра такой среды, когда предлагается ограничиваться выбором достаточно больших объемов образца крови для определения ее плотности [9].

В [3-9], а также во многих других публикациях (см., например, [11-14]) рассматриваются конкретные упрощенные математические модели, направленные на усовершенствование диагно-

стических, терапевтических и хирургических методов практической медицины. В частности, в [14] предложена такая математическая модель гемодинамики сердечно-сосудистой системы (ССС), в которой используется квазиодномерное приближение вязкого течения крови на графе разветвленных эластичных сосудов с учетом параметризации работы сердца и капиллярного строения тканей. При этом в [14], как и в [3-9; 11-13], а также в других работах этого направления предлагается количественное моделирование функционирования ССС, что может иметь практическую значимость за счет возможности выработки количественных критериев определения этого функционирования в норме и при различных патологиях.

Конкретно, в [14] предложена упрощенная гидромеханическая математическая модель системы кровообращения в виде системы сосудов разных типов, соединяющих органы и ткани организма, обеспечивая их функционирование. При этом условно выделяется четыре класса элементов, составляющих объект математического моделирования. Это сердце, сосуды, узлы ветвления и ткани. Зона, в которой соединяется несколько сосудов, определяется как узел ветвления. Сосуды могут соединяться с тканями, моделирующими соответствующие органы. После прохождения тканей кровь по венозной сосудистой системе вновь поступает в сердце. При этом ССС моделируется графом, ребрами которого являются сосуды, а вершинами – сердце, узлы ветвления и ткани. Математическая постановка задачи состоит в записи уравнений сохранения массы, импульса (количества движения) и заданного закона изменения поперечного сечения сосуда на каждом ребре графа, предполагая линейную зависимость величины площади поперечного сечения сосуда от давления.

При этом требуется выполнение дополнительных условий сопряжения в узлах ветвления, в тканях и сердце. В частности, допустимо предполагать реализуемость движение частиц крови по инерции в области бифуркации сосудов, когда скорость кровотока описывается уравнением Хопфа (уравнение Эйлера с нулевой правой частью) при нулевом градиенте давления, которое считается при этом одинаковым во всей зоне ветвления. При моделировании сопряжения сосудов с тканями считается, что процесс прохождения крови через ткань подобен фильтрации жидкости через пористую среду с учетом возможности изменения результирующего потока крови за счет поглощения или выделения крови тканью. Для математического моделирования зоны сопряжения сердца с сосудами кровеносной системы на основе данных наблюдений принимается заданной закономерность изменения во времени объемной скорости потока крови на стыке сердца с аортой. В описываемой модели [14] предусмотрен также учет гравитационной силы и силы трения. При этом сила трения принимается пропорциональной квадрату скорости течения (с коэффициентом обратно пропорциональным радиусу поперечного сечения сосуда), что обычно характерно для турбулентного режима течения при достаточно больших числа Рейнольдса. Такое моделирование в зависимости от типа решаемой задачи допускает упрощенную форму, например, за счет априорного задания профилей скорости и давления.

Такое описательное моделирование ССС, как в [14], может быть полезным (допуская, в частности, модельную оценку функциональной активности важнейших узлов ССС – сердца, почек и др.), но не позволяет выявить базовые механизмы, обеспечивающие уникальную энергетическую эффективность, наблюдаемую в ССС при отсутствии патологий. Более общие подходы к моделированию кровотока на основе вариационных принципов развивались в [15], но при этом, как в [13, 14] и многих других модельных подходах в основу положено использование закона Пуазейля [10], применимость которого ограничена только ламинарными безвихревыми течениями.

В то же время, интерес к пониманию энергетически эффективных механизмов работы ССС существует уже со времен Леонардо да Винчи, обратившего внимание на энергетически эффективную роль именно вихревых неламинарных движений, обеспечивающих необходимое закрытие аортального клапана в конце систолы левого желудочка сердца. В настоящее время на основе данных цветной доплерометрии и МРТ – велосиметрии установлено наличие закрученной спиральной организации кровотока в магистральных отделах ССС [16]. Имеются данные о взаимосвязи между нарушениями такой структурно устойчивой организации кровотока, вызванных хирургическими вмешательствами, и многими послеоперационными осложнениями, обусловленными повышенным риском образования тромбов [16]. Механизм зарождения тромбов при этом связан с гидродинамической неустойчивостью деструктурированного потока крови относительно случайных турбулентных возмущений, возникающих обычно в зонах бифуркации сосудистой системы и на атеросклеротических образованиях в эндотелии сосудистой стенки. Гидромеханические основы формирования закрученной структурной организации, общие как для интенсивных атмосферных вихрей, так и для нормального режима кровотока в ССС, разработаны в [17-21].

Кроме закрученной структурной организации кровотока важную роль играет пульсационный режим переноса крови в ССС, обеспечивающий также эффективность функционирования ССС. На это впервые было обращено внимание Г.М. Поединцевым и О.К. Вороновой [22] и на основе точного нестационарного решения уравнения Навье – Стокса (обобщающего закон Пуазейля) установлено в [23], где дано развитие теории [24].

Исходя из предложенного в [22] алгоритма оценки объемов крови, поступающей в аорту в различные моменты сердечного цикла систола – диастола, в 2004 году был создан первый прибор для кардиометрии «Кардиокод», с помощью которого возможно синхронное измерение фазовой структуры ЭКГ и реограммы и получение количественных параметров, опре-

деляющих функциональное состояние ССС человека.

В отличие от модели [14], в [25] предложено не просто задавать произвольным образом пульсационный режим изменения площади поперечного сечения в модели кровеносного сосуда, а определять его, исходя из решения вариационной задачи на условный экстремум. В этой задаче закон изменения радиуса трубы во времени определяется из условия минимума энергии, требуемой для перекачки заданной величины объема жидкости за весь период растяжения и последующего сжатия радиуса трубы.

Кроме того, в [25] получено обобщение уравнения сохранения массы, предложенного в [26], а также предложено обобщение модели оптимального трубопровода работы [27] на случай замены закона Пуазейля его нестационарной модификацией, установленной в [23, 25].

Полученные в [25] выводы качественно подтверждают базисные положения теории Поединцева – Вороновой [22], что определяет новые возможности для развития соответствующего направления количественной кардиометрии.