

Моделирование и диагностика сердечной деятельности

Н. В. Киреева¹, П. П. Щетинин², В. П. Демкин³, С. В. Мельничук⁴

Национальный исследовательский Томский государственный университет

¹natali@adrenaline.zone, ²isp@inbox.ru, ³demkin@ido.tsu.ru, ⁴osbereg@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время, несмотря на обилие существующих математических моделей сердечно-сосудистой системы человека и вычислительные возможности результаты численных экспериментов пока не стали основой для принятия врачебных решений. Это связано с тем, что система кровообращения, как одна из основных систем человеческого организма, весьма сложна в изучении механизмов функционирования и в значительной степени зависит от специфики организма: геометрии сосудистой системы, состава крови, физиологических процессов, реакции организма на психофизиологические нагрузки. В данной работе рассматривается новый подход к диагностике заболеваний сердца на основе исследования кардиоритма и определения характера его нарушений. Кардиоритм – процесс управления сократительной работой сердечной мышцы для обеспечения кровотока. Здоровое сердце имеет определенный кардиоритм, каждая часть которого отвечает за определенную фазу мышечной активности сердца и внутрисердечного кровотока. Сердечные расстройства будут отражаться на изменении кардиоритма. Эти изменения определенной части кардиоритма характеризуют тип расстройства (патологии) или нескольких патологий. Таким образом, кардиоритм отражает каждую часть мышечной активности. Нами проведен анализ кардиоритма сердца в условиях стеноза коронарных сосудов и разработана модель локальной гемодинамики и осуществлен численный эксперимент определения кровотока в левой коронарной артерии. Разработанная модель локальной гемодинамики коронарных сосудов в дальнейшем может быть использована как способ неинвазивной диагностики патологии в динамике сердечного цикла на основе математического моделирования коронарного кровотока.

Ключевые слова: кардиоритм; сердечно-сосудистая система; система кровообращения

I. ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В настоящее время, несмотря на обилие существующих математических моделей сердечно-сосудистой системы человека и вычислительные возможности результаты численных экспериментов пока не стали основой для принятия врачебных решений. Это связано с тем, что система кровообращения, как одна из основных систем человеческого организма, весьма сложна в изучении

Результаты исследования получены при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

механизмов функционирования и в значительной степени зависит от специфики организма: геометрии сосудистой системы, состава крови, физиологических процессов, реакции организма на психофизиологические нагрузки.

В данной работе рассматривается новый подход к диагностике заболеваний сердца на основе исследования кардиоритма и определения характера его нарушений.

Кардиоритм – процесс управления сократительной работой сердечной мышцы для обеспечения кровотока. Здоровое сердце имеет определенный кардиоритм, каждая часть которого отвечает за определенную фазу мышечной активности сердца и внутрисердечного кровотока. Сердечные расстройства будут отражаться на изменении кардиоритма. Изменения определенной части кардиоритма характеризуют тип расстройства (патологии) или нескольких патологий. В данной работе проведен анализ кардиоритма сердца в условиях стеноза коронарных сосудов и осуществлен численный эксперимент определения кровотока в левой коронарной артерии.

Как известно, электрокардиограмма (ЭКГ) содержит информацию об электрической, а, следовательно, и о мышечной активности сердца [1].

В условиях стеноза коронарных артерий на кардиоритме возникают особенности, которые в отличие от здорового сердца, имеют четко выраженный характер [2]. При этом заболевании возникает стенозирование (снижение просвета) одного или нескольких коронарных сосудов. При этом, возникающая ишемия приводит к замедлению процессов реполяризации в кардиомиоцитах и изменяет направление электрической волны в миокарде. При остром коронарном синдроме (ОКС) основные патологические изменения наблюдают в комплексе QRS и сегменте ST. Однако, на кардиограмме, прежде всего, происходит уширение, депрессия и/или изменение конфигурации сегмента ST, отражающего реполяризацию желудочков сердца. При этом, степень изменений зависит от обширности поражения миокарда и длительности ишемии.

Одним из ранних признаков недостаточности коронарного кровотока выступает появление отчетливой резкой границы перехода сегмента ST в зубец T. Дальнейший рост атеросклеротической бляшки усугубляет депрессию ST ниже изолинии. В отличие от острого коронарного синдрома при ишемической болезни сердца

(ИБС), изменения ST стабильны на протяжении месяцев и даже лет. При длительном течении ИБС на ЭКГ проявляется уширение зубца R. Это неблагоприятный прогностический признак относительно риска ОКС и мерцательной аритмии. Также наблюдают замедление электрической проводимости во время систолы желудочков (QT). Сердцу в условиях кислородного голодания, которое обусловлено снижением просвета сосудов, требуется все больше времени на сокращение. Из-за снижения венечного кровотока могут возникать аритмии и блокады. Все это, в конечном итоге, способно сказываться на работоспособности миокарда и на снижении объема сердечного выброса, нарушении нормальной гемодинамики.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕРДЕЧНОГО КРОВОТОКА

Для принятия решения об оперативном вмешательстве для устранения патологии сосуда необходимо оценить кровоток. В данной работе разработан подход к диагностике заболеваний сердца на основе определения фракционного резерва кровотока (*FFR*) в коронарных артериях, который определяется отношением давлений крови в артерии до и после стеноза. Измерение *FFR* методом внутрисосудистых датчиков сопряжено с вероятностью повреждения сосуда, поэтому весьма актуальным является проведение вычислительного эксперимента на основе локальной гемодинамики коронарных артерий. С определением *FFR* возможно диагностировать нарушения коронарной гемодинамики, а, следовательно, говорить о развитии нарушений в работе сердца, связанные с ишемией миокарда. *FFR* определяется как отношение максимального кровотока в суженной артерии к максимальному кровотоку в этом же сосуде без стеноза. Впервые этот показатель предложили измерять в начале 90-х годов XX века N. Pijls и B. De Bruyne [3–4]. Другими словами, *FFR* является отношением скоростей кровотока, которое также можно выразить как отношение давления (1).

$$FFR = \frac{P_d}{P_a}, \quad (1)$$

где P_a – давление в аорте, а P_d – давление в постстенотическом участке, измеренное при максимальной вазодилатации. В норме *FFR* должно быть равным 1 у всех пациентов, не зависит от кровотока в покое или изменения гемодинамических показателей, учитывает степень перфузии и наличие коллатералей, имеет четкий порог определения гемодинамической значимости стеноза – 0,75–0,80. Пороговая величина *FFR* степени ишемии миокарда определена в клинических исследованиях при сравнении с неинвазивными нагрузочными тестами. *FFR* <0,75 достоверно ассоциировано с индуцированной стрессом ишемией миокарда (специфичность – 100%, диагностическая ценность положительного результата теста – 100%, диагностическая ценность отрицательного результата теста – 88%). При этом при *FFR* >0,80 у большинства пациентов отсутствует индуцированная стрессом ишемия (чувствительность – 90%). В настоящее

время рекомендовано использовать в качестве пороговой величины *FFR* <0,80 [3].

В данной работе осуществлен численный эксперимент по оценке *FFR* в случае стеноза, что отражено на рис. 1.

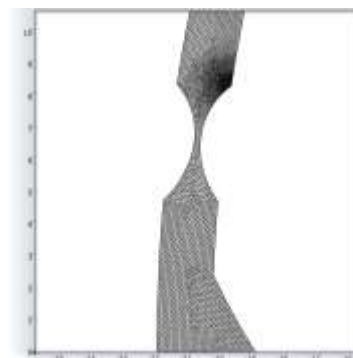


Рис. 1. Моделирование стеноза для проведения численного эксперимента

Расчеты проводились с использованием программного пакета COMSOL.

Результаты расчета приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что давление до стеноза повышено, а в месте стеноза резко уменьшается. Проведенные расчеты показывают, что отношение давления после стеноза к давлению до стеноза *FFR* составляет 0,65, что говорит о необходимости хирургического вмешательства.

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента могут служить основой для диагностики работы сердца. Разработанная модель локальной гемодинамики коронарных сосудов в дальнейшем может быть использована как способ неинвазивной диагностики патологии в динамике сердечного цикла на основе математического моделирования коронарного кровотока.

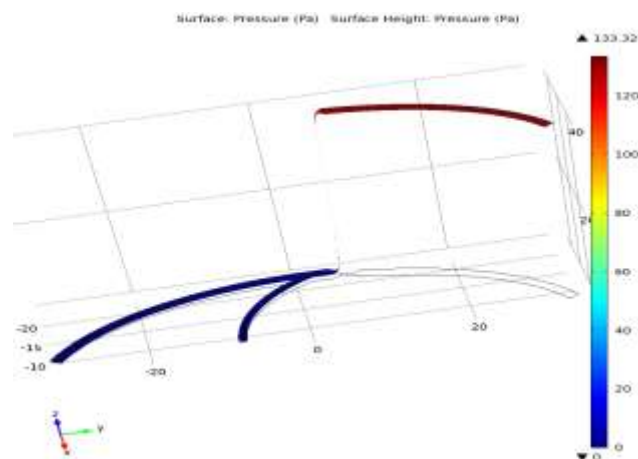


Рис. 2. Распределение давления на участке стенозированной артерии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мурашко В.В., Струтынский М. Электрокардиография: Учебное пособие. МедПресс-Информ, 2016. 345 с.
- [2] Ромм Я.Е., Соколов И.Н. Компьютерная диагностика ишемии на основе идентификации локально экстремальных особенностей электрокардиограмм // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11024> (дата обращения: 08.09.2019).
- [3] Астраханцев Е.В., Гидаснов В.Ю., Ревизников Д.Л. Математическое моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов // Математическое моделирование. 2005. Т. 17. № 8. С. 61–80.
- [4] Гурия Г.Т., Лобанов А.И., Старожилова Т.К., Николаев А.В., Чуличков А.Л. Моделирование роста оторвавшегося тромба в пристеночном потоке // Сб.: Компьютерные модели и прогресс медицины. М.: Наука, 2001. С. 250–263.
- [5] Gadcar T., Jeremic A. Mathematical modeling of blood flow in the presence of atherosclerosis // Excerpt from the Proc. of the COMSOL Users Conf. Boston. 2006. P. 879–886.