

УДК 616.16-085:616.33-006

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МИКРОЦИРКУЛЯЦИОННОЙ, ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ И МАГИСТРАЛЬНОЙ ГЕМОДИНАМИКИ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЛОКАЦИИ СОСУДОВ

Иванов В.И., Иванов Н.И., Лазарчик А.Н.

НИИ ядерных проблем БГУ
Минск, Республика Беларусь

Принцип работы доплеровских систем диагностики сосудов и гемодинамики человека заключается в локации сосудов с последующей фильтрацией и обработкой доплеровских компонент сигналов обратного рассеяния, обусловленных доплеровским сдвигом частоты сигналов на подвижных структурах – эритроцитах крови. Как известно, частота доплеровского сигнала F_d определяется скоростью частиц V анализируемых потоков или различных подвижных структур:

$$F_d = 2 \frac{f_0 V \cos \alpha}{c}, \quad (1)$$

где f_0 – частота зондирующего излучения; c – скорость распространения излучения в среде; V – линейная скорость лоцируемого объекта; α – угол между направлением зондирования и вектором скорости лоцируемого объекта.

Анализ спектра доплеровских сигналов позволяет определять локализацию, скорость, направление и концентрацию эритроцитов, а также параметры состояния диагностируемых сосудов. Однако широкий диапазон скоростей и концентраций эритроцитов в различных сосудах: от нескольких микрометров в секунду и концентрации на уровне единичных эритроцитов – в капиллярных сосудах до 1 метра в секунду и высокой концентрации эритроцитов в магистральных сосудах, для обеспечения высокой чувствительности и разрешающей способности по скорости для всех сосудов человека потребовали применения как ультразвукового, так и лазерного зондирующих излучений.

Созданный комплекс для диагностики микроциркуляционной, периферической и магистральной гемодинамики разработан на базе двух систем: лазерного доплеровского флоуметра капиллярного кровотока (рисунок 1) и многочастотного ультразвукового доплеровского флоуметра периферического и магистрального кровотока (рисунок 2) объединенных общим программным обеспечением. Каждая из систем комплекса имеет также и индивидуальное программное обеспечение, что позволяет использовать данные системы и в автономном режиме. Системы сертифицированы и разрешены к применению в медицинской практике Минздрава Республики Беларусь [1,2].

При взаимодействии лазерного излучения с

тканью в отраженном сигнале имеется доплеровская составляющая частоты, обусловленная отражением от движущихся эритроцитов, пропорциональная скорости их движения. В результате обработки доплеровского сигнала в лазерном флоуметре формируется сигнал показателя микроциркуляции (ПМ):

$$ПМ = N_{эр} * V_{ср}, \quad (2)$$

где: $N_{эр}$ – количество эритроцитов в зондируемом объеме, $V_{ср}$ – средняя скорость эритроцитов.

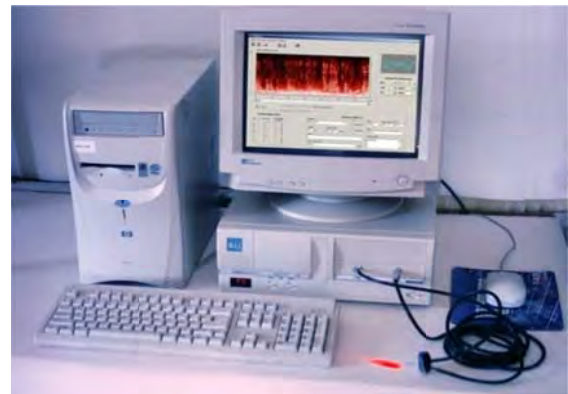


Рисунок 1 – Лазерный доплеровский флоуметр

Определение средних значений, амплитуд и долговременных трендов ПМ осуществляется в относительных или перфузионных единицах (ПФ), включающих в себя капиллярный гематокрит, количество эритроцитов и их скорость, а также количество функционирующих в данный момент микрососудов в исследуемом объеме.



Рисунок 2 – Ультразвуковой доплеровский флоуметр

Допплеровская составляющая в лазерном флоуметре выделяется методом оптического гетеродинамирования излучаемого и принимаемого излучений на приемной апертуре фотодетектора. Амплитуда доплеровской составляющей формируется от всех эритроцитов, находящихся в области зондирования, движущихся с разными скоростями и по-разному количественно распределенных в артериолах, капиллярах, венах и артериовенулярных анастомозах.

Анализ спектра и амплитуд ритмических колебаний капиллярного кровотока, обусловленных нейрогенной и миогенной модуляцией тонуса капилляров, дыхательной и сердечной компонент ритмов осуществляется методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) в 512 спектральных полосах в частотном диапазоне 0,01-2,0 Гц, а также методом эмпирической модовой декомпозиции Хуанга-Гильберта для дифференциальной оценки взаимосвязи ритмических компонент во времени.

Длина волны лазерного излучения в лазерном флоуметре (0,53-0,87) мкм, доставка и прием отраженного лазерного сигнала осуществляется трехканальным оптико – волоконным датчиком, имеется программируемый в диапазоне температур (26-44) °С теплостимулятор с накладным датчиком тепловой нагрузки для исследования резерва микроциркуляции. Лазерный флоуметр обеспечивает исследование параметров капиллярного кровотока в диапазоне скоростей эритроцитов от 1 мкм/с до 1 см/с с разрешающей способностью по групповой скорости 1 мкм/с.

Ультразвуковой флоуметр представляет собой компьютерный доплеровский 3-х частотный (2, 4 и 8 МГц) анализатор кровотока для неинвазивной диагностики периферических и магистральных сосудов, включая сосуды мозгового кровообращения методом ультразвуковой доплеровской локации в импульсном и непрерывном режимах с автоматическим расчетом основных параметров гемодинамики сосудистого русла и параметров стеноза. Ультразвуковые датчики импульсного, непрерывного и совмещенного типов выполнены на основе пьезокерамики ЦТС – 19 (цирконат титаната свинца), обеспечивают высокую чувствительность прибора на используемых частотах ультразвукового зондирования 2, 4 и 8 МГц: 2 МГц – зондирование глубоко залегающих магистральных сосудов и сосудов черепно-мозгового кровообращения; 4 МГц - зондирование среднезалегающих и крупных поверхностных сосудов; 8 МГц – зондирование мелких и крупных поверхностных сосудов.

Допплеровский сдвиг положителен, когда кровотоки движется навстречу излучателю $f_{отр} > f_0 = f_0 + F_d$ (прямая компонента вектора скорости кровотока) и отрицательный, когда кровотоки движется от излучателя $f_{отр} < f_0 = f_0 - F_d$ (обратная компонента вектора скорости кровотока). Одновременное выделение прямой и обратной доплеровских компонент отраженного сигнала осуществляется методами квадратурного детектирования путем гетеродинного смещения отраженного сигнала с синусоидальной и косинусоидальной компонентами опорного сигнала на частоте зондирующего излучения с последующей фильтрацией и многополосным спектральным анализом доплеровских компонент сигналов методами БПФ. Обратная компонента является важным диагностическим признаком для определения тромбообразования и параметров стеноза сосудов. Высокая динамика изменения скорости кровотока в пределах длительности сердечного цикла в среднем от 0 до 1 м/с требовала скоростного спектрального анализа доплеровских компонент со скоростью 30 циклов в секунду с оценкой спектра одновременно в 256-512 частотных полосах на каждом цикле длительностью ≈ 33 мс. При этом обеспечивается одновременное определение параметров прямого и обратного кровотока: средняя, мгновенная, систолические и диастолические показатели скорости, частотная мода скорости, стенотический показатель, индекс турбулентности (спектральное расширение), индекс резистентности, пульсовой индекс, время подъема пульсовой волны кровотока и др.

Разработанный диагностический комплекс обеспечивает возможность комплексной диагностики гемодинамики человека с многопараметрической компьютерной интерпретацией широкого спектра сосудистых патологий в тканях и слизистых оболочках, периферического и магистрального кровообращения для раннего обнаружения синдрома «диабетическая стопа», некротических изменений, приживаемости тканей при пересадках, проявлений атеросклероза, артериальной гипертензии, тромбообразования и стеноза сосудов, контроля воздействия медицинских препаратов и физиопроцедур.

1. Флоуметр лазерный доплеровский ФЛД-01. Регистрационное удостоверение Минздрава РБ ИМТ № ИМ – 7.2848.
2. Вазограф ультразвуковой доплеровский ВУД-01. Регистрационное удостоверение Минздрава РБ ИМТ № ИМ – 7.4534.