

На правах рукописи

Козлов Игорь Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И УСТРОЙСТВА ЛАЗЕРНОЙ
ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ИНТЕНСИВНОСТИ КОМПОНЕНТОВ КОЖНОГО КРОВОТОКА**

Направление 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской выпускной квалификационной работы

Орёл, 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный руководитель:

доцент кафедры
«Приборостроение, метрология и сертификация», доцент, к.т.н.
Дунаев Андрей Валерьевич

Официальный рецензент:

генеральный директор
ООО НПП «ЛАЗМА», к.т.н.
Сидоров Виктор Васильевич

Защита состоится 27 июня 2017 г в 9 часов на заседании Государственной аттестационной комиссии по адресу: 302020, РФ, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться на кафедре ПМиС ФГОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С.Тургенева».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной клинической практике является крайне актуальной практика интегральной оценки состояния микроциркуляции крови и тестирования микроциркуляторных расстройств при диагностике самых различных заболеваний. Особенно это важно при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, в кардиологии, в диабетологии, при онкологических заболеваниях, а также при нарушениях микроциркуляции в дерматологии, стоматологии, хирургии и реаниматологии. Расстройства микроциркуляции весьма разнообразны как по своему патогенезу, так и по клиническим проявлениям. Поэтому в клинике различных заболеваний и экстремальных состояний, а также при коррекции микроциркуляторных нарушений необходимы методы как оперативной оценки состояния кровотока на тканевом уровне, так и длительного его мониторинга. Одним из таких методов является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ).

Среди факторов, определяющих гемоциркуляцию в организме, одним из главных является строгое соответствие между объемом функционирующего сосудистого русла и объемом циркулирующей по нему крови. Сбалансированность энергетического обмена и доставки кислорода в тканях достигается при условии эффективного перераспределения потоков крови в микрорегионе органа. Аэробный метаболизм поддерживается при условии такого перераспределения потоков крови в органах и тканях, в результате которого достигается первоочередное и достаточное обеспечение функционально нагруженных структур за счет тех, которые в это время находятся в менее активном состоянии. Перераспределение потоков крови в тканях осуществляется посредством активных ритмических сокращений стенки микрососудов, называемых вазомоциями. С вазомоциями также сопряжено изменение гидростатического давления в капиллярах, которое в фазу констрикции снижается, а в фазу дилатации повышается, определяя тем самым направленность трансмуральных потоков жидкости между кровью и интерстицием. При торможении активных вазомоций, что практически наблюдается при любых нарушениях микроциркуляции, микрососуды как бы превращаются в пассивные проводники крови. В результате ряд сосудистых путей оказывается в стратегическом отношении более предпочтительным. Такими оказываются те микрососуды, которые имеют больший диаметр, меньшее число узлов ветвления, меньшую протяженность или более пологий угол отхождения от материнского ствола. В силу этих морфофункциональных особенностей в них поступает большая часть потока крови. Поэтому при прекращении активных вазомоций, в значительной части микроциркуляторного русла объемный кровоток сокращается, и в тканях появляются признаки застоя крови и стаза. Таким образом, потеря вазомоции ведет к, так называемому, шунтированию кровотока, в результате которого большая часть крови, поступающей в микроциркуляторное русло, движется по меньшей части капилляров, «обкрадывая» в метаболическом отношении соседние области микрорегиона.

Применение ЛДФ с возможностью регистрации интенсивности компонентов кожного кровотока сигнала позволит оценивать состояние микроциркуляции крови, через оценку и, тем самым, повысить качество диагностики различных заболеваний, обнаруживать их на более ранних стадиях, а также, создать базу для более глубокого понимания патогенеза возникающих расстройств микроциркуляции, осуществлять объективный контроль за проводимыми лечебными мероприятиями и индивидуальным подбором фармакологических средств.

Цель и задачи исследований. Целью выполненной выпускной квалификационной работы является разработка метода и устройства для регистрации интенсивности компонентов кожного кровотока по частотам доплеровского сдвига на основе метода лазерной доплеровской флоуметрии.

Задачи исследования:

- обзор и анализ возможностей лазерной доплеровской флоуметрии в оценке функционального состояния микроциркуляции крови, ритмов микроциркуляторного русла, а также математических моделей обработки сигнала;
- разработка принципа построения устройства для вычисления показателя микроциркуляции, реализация алгоритма обработки сигнала в среде визуального программирования NI LabVIEW;
- проведение экспериментальных исследований для изучения спектров доплеровского уширения, зарегистрированных в течение функциональных тестов;
- создание метода визуализации распределения показателя микроциркуляции;
- разработка технологического процесса сборки печатного блока устройства, а также оценка соответствия методики поверки разработанного устройства согласно нормативным актам.

Объектом исследования является микроциркуляция крови в кожных покровах человека.

Предметом исследования является метод и устройство для регистрации и анализа обратно-рассеянного излучения, поступающего от компонентов кожного кровотока;

Методы исследования. При выполнении исследований применялись методы математической статистики, основы математического анализа и обработки сигнала, теория алгоритмов.

Научная новизна.

- применение спектров доплеровского уширения для оценки локализации кровотока в структурных единицах микроциркуляторного русла при проведении функциональных нагрузочных тестов;
- метод визуализации распределения показателя микроциркуляции по частотам доплеровского сдвига, позволяющий выявлять нарушения в работе микроциркуляторного русла на более ранних стадиях.

Практическая значимость:

- предложен инструментарий для анализа интенсивности компонентов кожного кровотока, позволяющий выявлять нарушения в микроциркуляторном русле, например, при заболеваниях ревматологического или эндокринологического профилей;
- предложен принцип построения устройства для регистрации показателя микроциркуляции по частотам доплеровского сдвига, повышающий информативность технологии лазерной доплеровской флоуметрии и её более широкому применению в медицинской практике.

Личный вклад автора заключается в проведении обзора актуальной научной литературы в области лазерной доплеровской флоуметрии, сборка макета устройства, создание необходимого программного обеспечения, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных данных и оформление результата.

Положения, выносимые на защиту:

- метод регистрации интенсивностей компонентов кожного кровотока, основанной на визуализации распределения показателя микроциркуляции по частотам доплеровского сдвига;
- анализ нестационарных процессов в каждом кровотоке, происходящих на поддиапазонах доплеровского сдвига во время проведения функциональных нагрузочных тестов;
- принцип построения устройства для регистрации интенсивностей компонентов кожного кровотока, основанный на непосредственной оценке спектра мощности обратно-отражённого излучения из кожных покровов.

Апробация результатов. Основные результаты работы доложены на Всероссийском Конгрессе молодых Учёных (СПб) в 2014, 2015, 2017 годах,

международных конференциях ФРЭМЭ-2016 (г. Суздаль), Saratov Fall Meeting 2016 (г. Саратов) и PhysicaSPb 2016 (СПБ), на международной школе Summer School of Optics and Photonics (г. Оулу, Финляндия), а также на студенческих научно-технических конференциях «Неделя Науки» 2014, 2015, 2017,

Публикации:

- 2 статьи, индексируемые в БД Web of Science/Scopus;
- 1 статья в журнале ВАК;
- 2 статьи в прочих изданиях;
- 7 тезисов докладов.

Структура и объем выпускной квалификационной работы:

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников, 6 приложений и изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы исследования, сформулированы теоретические предпосылки и описан объект исследования (микроциркуляция кожи). Отмечено, что исследования в области неинвазивной диагностики микроциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии находят своё применение в медицинской практике и научных исследованиях.

В первой главе представлен теоретический обзор возможностей технологии лазерной доплеровской флоуметрии с точки зрения физиологического значения записываемого показателя микроциркуляции. Также, систематически изложен теоретический базис технологии и рассмотрены оптические характеристики. Известно, что метод ЛДФ основывается на зондировании тканей лазерным излучением и анализе

рассеянного и отражённого от движущихся в тканях эритроцитов излучения.

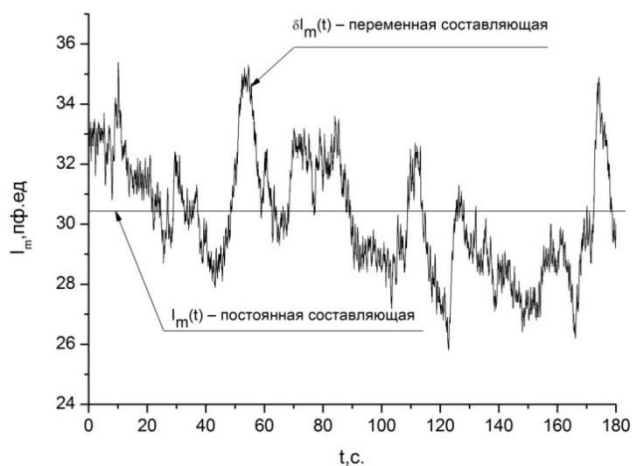


Рисунок 1 – Пример ЛДФ-граммы

Переменная составляющая отраженного сигнала определяется двумя факторами: концентрацией эритроцитов в зондируемом объеме и их скоростью. Пример регистрируемой ЛДФ-граммы представлен на рисунке 1.

Выходной сигнал в лазерной доплеровской флоуметрии, в общем, зависит от множества параметров: содержания меланина, толщина эпидермиса, содержание воды, соотношение окси- и дезоксигемоглобина в зондируемом объеме ткани (рисунок 2).

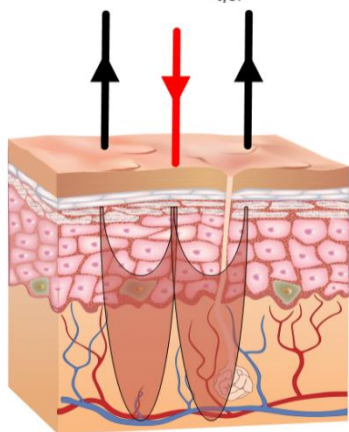


Рисунок 2 – Регистрация рассеянного излучения в диагностическом объеме

Все эти параметры должны учитываться при математическом моделировании биологического

объекта. Другим важным параметром является фактор анизотропии – величина, определяемая средним косинусом угла рассеяния, которая отражает неравномерность распространения

электромагнитной волны. Далее, были рассмотрены анатомо-топографические участки кожи человека, наиболее предпочтительные для измерения показателя микроциркуляции. Например, на пальцах кисти уровень ПМ в коже дорсальной и вентральной поверхности существенно отличается. При исследовании кожной микроциркуляции в разных сегментах верхней и нижней конечностей наблюдалось снижение значений базовых показателей ЛДФ в проксимальных сегментах конечностей (плечо и бедро, соответственно) по отношению к показателям кровотока в коже туловища. По мере приближения к дистальным сегментам конечностей показатели микроциркуляции возрастают.

Колебания ПМ во времени представляют собой случайную функцию с гармоническими составляющими. Методами частотного анализа (преобразования Фурье, вейвлет-анализ) можно выявить данные частотные составляющие, различающиеся по амплитуде и частоте.

В следующем подразделе рассмотрены известные из литературы математические модели для вычисления показателя микроциркуляции. Представлены их структурные схемы и математические зависимости.

Далее, более подробно рассматриваются ритмы показателя микроциркуляции и их биофизическая интерпретация. Излагается роли этих ритмов в процессах регуляции микрокровотока и их диагностическое значение.

Во второй главе произведён расчёт канала усиления записанного фототока и сформирована структурная схема устройства (рисунок 3).



Блок питания 9, передаёт питающее напряжение на драйвер лазерного излучения 6, который запускает лазерный излучатель 3.

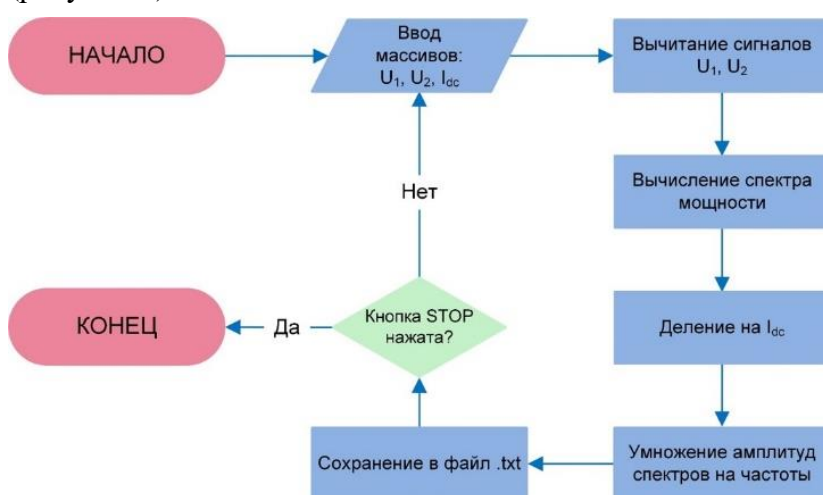
Лазерное излучение, отражённое от биологического объекта и претерпевшее доплеровский сдвиг на движущихся эритроцитах, поступает в фотодиоды 1,2 и попадает в преобразователи ток-напряжение 4,5.

Далее, сигнал поступает на усилитель 7,8 и фильтр нижних частот 10,11.

Фильтры высоких частот 12,13 подавляют высокочастотную составляющую сигнала. Дополнительные полосовые фильтры 14, 15 осуществляют выделение полезной составляющей.

На следующем этапе, сигнал попадает на плату сбора данных 16. Для осуществления нормирования на постоянную составляющую фототока производят отведение постоянной составляющей после блоков 4,10 и её оцифровывание на плате сбора данных. Дальнейшая математическая обработка осуществляется на персональном компьютере 17 с установленной средой визуального программирования LabVIEW 2015.

Обработка сигнала осуществляется согласно следующему реализованному алгоритму (рисунок 4).



Программа принимает массив данных с двух каналов обработки сигнала, и постоянную составляющую фототока в реальном времени.

Рисунок 4 – Блок-схема алгоритм обработки сигнала, реализованной в среде NI LabVIEW

На следующем этапе происходит вычитание

переменных составляющих и вычисление спектра мощности этой разности. Далее, получившиеся значения нормируются на постоянную составляющую фототока. Для получения показателя микроциркуляции, каждое амплитудное значение спектра перемножается на соответствующую частоту. Согласно структурной схеме и техническим параметрам излучателя были подобраны и рассчитаны электрорадиоэлементы. Произведён расчёт каскада усиления и фильтрации с амплитудно-частотными и фазо-частотными характеристиками. Для реализации устройства были рассчитаны конструктивные параметры платы, толщина проводников и другие параметры, произведён расчёт надёжности электронного блока устройства.

В третьей главе был разработан технологический процесс сборки печатного блока устройства. В данной главе обосновывается выбор технологических режимов и материалов, выбираются припой, флюс, отмывочные жидкости и инструментарий для проведения монтажа.

В четвёртой главе проводится PEST-анализ влияющих факторов в регионе, с привлечением экспертов и источников информации из региональных и федеральных СМИ и электронных новостных сайтов.

В пятой главе приводится научный задел магистерской диссертации. В цикле статей рассмотрены аспекты функционирования устройства лазерной доплеровской флоуметрии с цифровой обработкой сигнала с технической и медицинской точек зрения.

В подразделе «Возможности лазерной доплеровской флоуметрии в оценке состояния микрогемолимфоциркуляторного русла» изложена научная работа, описывающая возможность совместного анализа микроциркуляции и лимфоциркуляции с использованием лазерной доплеровской флоуметрии. Лимфатическая система тесно связана с венозным руслом, осуществляет дополнительный, коллатеральный к венам дренаж органов и одновременно очищение дренируемой тканевой жидкости. Несмотря на свою важность, данная подсистема в настоящее время изучена недостаточно хорошо из-за отсутствия качественных диагностических методов, пригодных для неинвазивной оценки *in vivo* лимфоциркуляции. В этой связи с диагностической точки зрения наиболее эффективно проводить одновременное исследование микроциркуляции кровотока и лимфотока. На этапе постановки задачи было сделано предположение, что при применении стандартных для метода ЛДФ функциональных проб (дыхательная, окклюзионная и т.д.) изменения в микрокровотоке приводят к перераспределению

спектральной мощности переменного сигнала в разные частотные диапазоны доплеровского сдвига, что позволяет неинвазивно оценивать распределение рассеивающих частиц по скоростям в диагностическом объеме. В экспериментальной части работы был проведен ряд тестовых измерений на условно-здоровых добровольцах с одновременной записью ЛДФ-грамм на разработанном макете лазерного доплеровского флоуметра при дыхательной пробе с интегрированием по различным частотным поддиапазнам (рисунок 5).

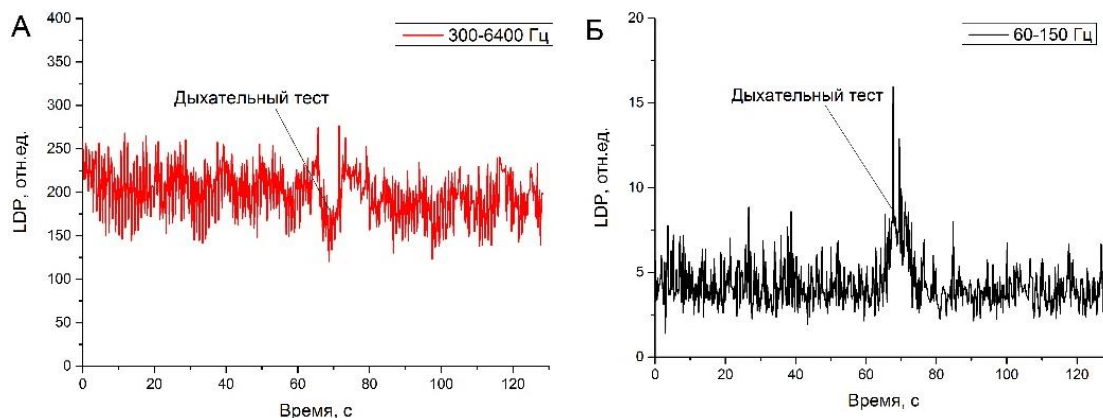


Рисунок 5 – Пример ЛДФ-грамм, записанных с помощью экспериментального макета на поддиапазонах спектра 300-6400 Гц (А) и 60-150 Гц (Б) при проведении дыхательного теста

Для исследования был выбран диапазон 60-6400 Гц. Данное ограничение частотного диапазона выбрано, исходя из того, что мощность сигнала на более высоких частотах мало влияет на выходной сигнал.

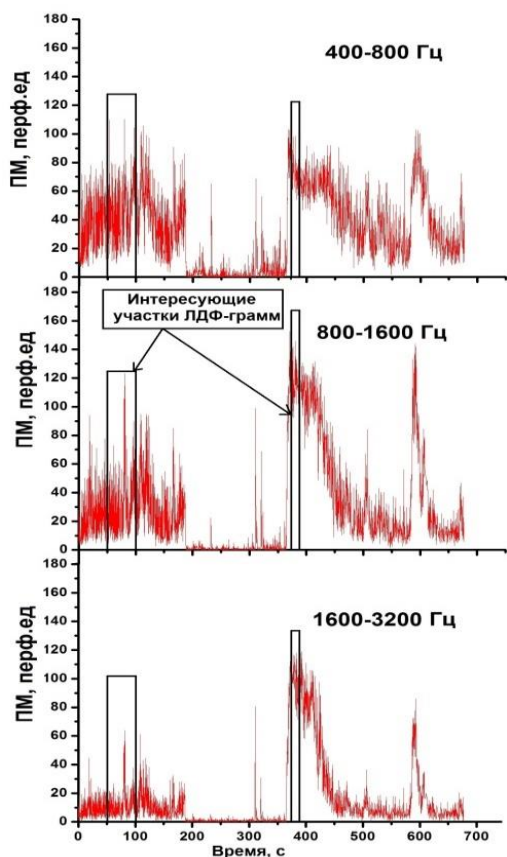
Также в исследованиях использовался анализатор «ЛАЗМА МЦ-1» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия). В течение экспериментов осуществлялась одновременная запись ЛДФ-грамм для двух частотных диапазонов: 300-10000 Гц – для регистрации микрокровотока; 20-150 Гц – для регистрации сигнала от микролимфотока. Для устранения высокочастотных и среднечастотных компонент в канале лимфотока анализатора была включена фильтрация приемного сигнала по доплеровскому сдвигу с отсечением сигналов от движущихся частиц со скоростями, характерными для микрососудов крови. Все записи проводили в коже ладонной поверхности дистальной фаланги 3-го пальца кисти (в зоне богатой артериоло-венулярными анастомозами).

На анализаторе «ЛАЗМА МЦ-1» для выявления взаимосвязи кровотока и лимфотока были проведены экспериментальные исследования на условно-здоровых добровольцах 25 ± 3 лет с применением различных функциональных тестов. При проведении дыхательной пробы осуществлялась 15-секундная задержка дыхания на высоте глубокого вдоха, способствующая констрикции артериол и кратковременному уменьшению кожного кровотока. Для проведения локального холодого и электростимуляционного тестов применялся температурный пробник и электростимуляционный пробник блока «ЛАЗМА-ТЕСТ» (НПП «ЛАЗМА», Россия). Регистрацию ЛДФ-граммы проводили непосредственно в зоне контакта пробников с кожей. При локальной холодной пробе кожа охлаждалась до 10 С в течение 30 с. При электростимуляции сила тока подбиралась индивидуально до порога минимальной боли для активации симпатических волокон, и составила 5 мА. Электростимуляция осуществлялась в течение 20 с. При венозной окклюзионной пробе создавалось

увеличение посткапиллярного давления с помощью компрессионной манжеты, которая не препятствовала артериальному притоку крови. Манжета накладывалась на плечевую артерию и нагнеталось давление 80 мм рт. ст. в течение 1 мин.

Также с помощью математического аппарата вейвлет-анализа определяли амплитуды осцилляций кровотока и лимфотока в момент проведения теста с венозной окклюзией. Для кровотока определяли показатели активного тонус-формирующего диапазона частот (эндотелиального, связанного с NO-активностью, 0,0095-0,02 Гц; нейрогенного симпатического 0,02-0,046 Гц; миогенного 0,07-0,145 Гц) и пассивных частотных диапазонов (кардиального или сердечного 0,8-1,6 Гц, дыхательного 0,2-0,4 Гц). Вейвлет-анализ проводился также и для записей оценки микролимфотока, где предполагалось, что границы частот 0,02-0,046 Гц соответствуют работе пейсмекеров лимфососудов. При проведении исследований с другими функциональными тестами на анализаторе «ЛАЗМА МЦ-1» также наблюдалось разнонаправленная реакция показателя микроциркуляции в разных частотных диапазонах. Стоит отметить, что наблюдаемая картина поведения сигнала ЛДФ при функциональных нагрузках может быть связана с рядом причин. Эффект спазмирования кровеносных артериол ведёт к увеличению количества медленно движущихся эритроцитов и, как следствие, увеличению показателя микроциркуляции, локализованного в низкочастотных поддиапазонах доплеровского сдвига. Кроме того, при спазме в венах и венулах, уменьшении дистального перфузионного давления снижается активность веноулярного дренажа, что приводит к росту давления в интерстиции и, как следствие, к росту лимфооттока.

Результаты вейвлет-анализа зарегистрированных ЛДФ-сигналов при проведении венозной окклюзии показали, что колебания потока лимфы в микрососудах кожи человека характеризуются отчетливым доминированием пейсмекерных фазных осцилляций в период восстановления после окклюзии. В целом в записи вейвлет-спектра присутствовали осцилляции других частотных диапазонов (миогенных и дыхательных).



Основным выводом работы является потенциальная полезность данного подхода для регистрации лимфотока, т.к. в диапазоне кардиальных ритмов на записях ЛДФ, полученных в низкочастотном поддиапазоне отсутствует значительная амплитуда сигнала. Тем самым, можно сделать вывод о соответствии данного поддиапазона лимфатической системе, так как, как известно, что пульсовая волна не модулирует лимфоток.

При анализе полученных записей выделялись временной участок 50 с до окклюзии и 15 секунд в непосредственный момент после снятия окклюзии (рисунок 6). На данных участках вычислялись значения среднего и СКО.

Рисунок 6 – Пример ЛДФ-грамм, записанных по поддиапазонам частот

При усреднении полученных статистических оценок по данным 6 добровольцев было зарегистрировано увеличение сигнала ЛДФ в диапазонах более высоких частот (поддиапазоны

800-1600 Гц, 1600-3200 Гц) и уменьшение в низкочастотном диапазоне (60-400 Гц) (рисунок 7). Данный результат может быть объяснен увеличением доли эритроцитов, имеющих большую скорость в период постокклюзионной гиперемии.

В дальнейшем, предполагается проведение экспериментов по описанному выше алгоритму в группе пациентов с нарушениями функций микроциркуляции крови и сравнение полученных данных с данными условно-здоровых добровольцев с целью создания на основе данной информации новых диагностических критериев.

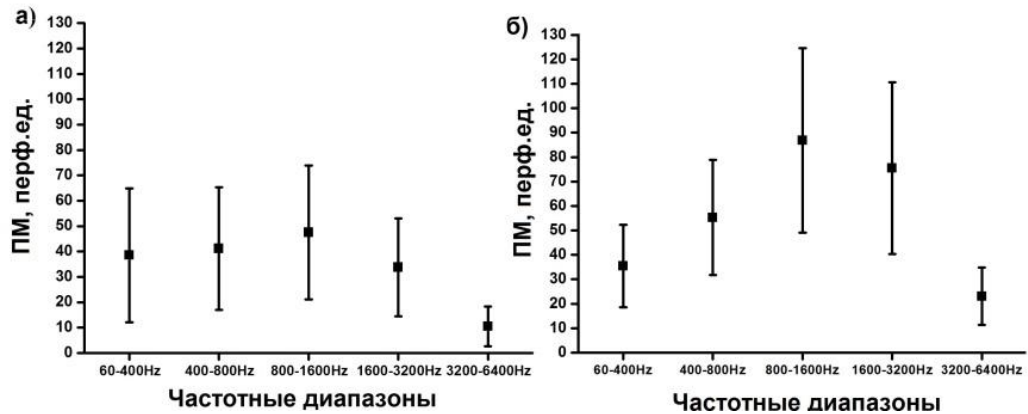


Рисунок 7 – Статистические показатели ЛДФ-грамм, рассчитанных при фоновой записи (а) и после снятия окклюзионной пробы (б)

В подразделе «Получение и исследование доплеровских спектров в течение эксперимента с локальным нагружением» представлен метод представления записанных спектров, на которых хорошо визуализировано явление перераспределения показателя микроциркуляции в другие частотные диапазоны при убывании/возрастании значения показателя микроциркуляции. На рисунке 8 хорошо заметно, что после достижения давления около 5 кПа частотный диапазон сигнала начинает снижаться, при этом амплитудные значения показателя микроциркуляции в области менее 1000 Гц начинают расти.

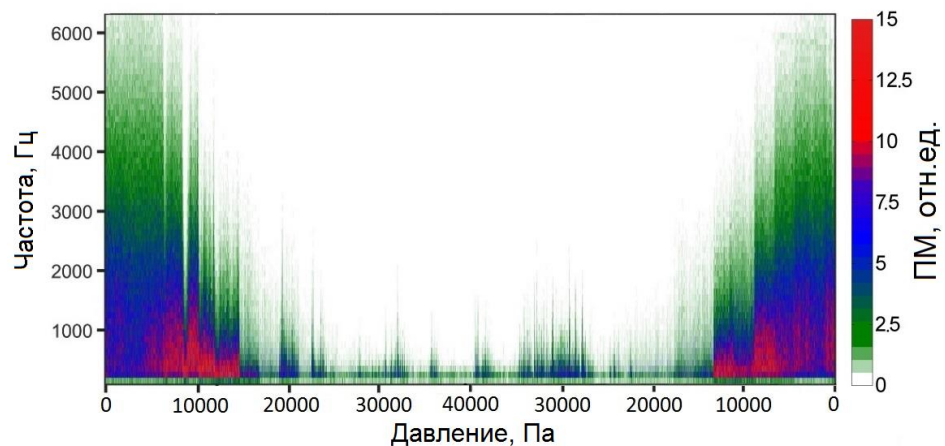


Рисунок 8 – Распределение показателя микроциркуляции по частотам доплеровского сдвига для эксперимента с локальным нагружением

Данный эффект можно объяснить тем, что возрастающее давление замедляет скорость микротока, что увеличивает значение сигнала, формируемого в более низких областях доплеровского сдвига.

В подразделе «Оценка параметров кровотока при совместном использовании методов капилляроскопии и лазерной доплеровской флоуметрии» описаны синхронные

эксперименты с использованием методов лазерной доплеровской флоуметрии и капилляроскопии. Методы анализа параметров капиллярного кровотока широко используются в медицине с целью исследования патологических изменений в микрокровотоке при заболеваниях, таких как сахарный диабет, системный склероз, синдром Рейно, разнообразные виды артритов, псориаз. Для исследования совместной работы устройств в анализе динамики микрокровотока были проведены совместные измерения на представленном капилляроскопе и разработанном лазерном доплеровском флоуметре. Измерения на лазерном доплеровском флоуметре проводились на среднем пальце руки, а капилляроскопия проводилась на ногтевом ложе безымянного пальца руки. Были проведены эксперименты с окклюзионным тестом, согласно следующему протоколу: запись фоновой перфузии и скорости кровотока (0,25-0,5 мин), окклюзионный тест (1-1,5 мин), пост-окклюзионный период (0,1-1 мин) (рисунок 9).

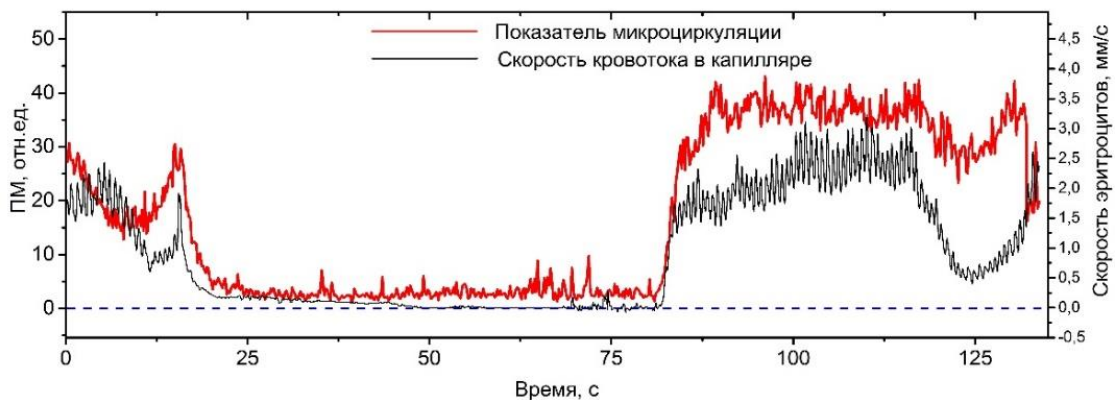


Рисунок 9 – Пример совместного измерения показателя микроциркуляции и скорости эритроцитов

Окклюзионное давление в течение экспериментов достигало 220 мм рт.ст. Результаты экспериментальных исследований демонстрируют существенную связь показателя микроциркуляции и скорости кровотока. Подобные совместные исследования помогут улучшить интерпретацию данных в лазерной доплеровской флоуметрии.

Данное исследование является обоснованием подхода к эмпирическому подтверждению соотношения между скоростью кровотока в отдельном капилляре и перфузией, оцениваемой методом лазерной доплеровской флоуметрии. Также, запланированы дальнейшие эксперименты с другими провокационными факторами. Одним из возможных направлений является подтверждение соответствия биологических ритмов в выделенном капилляре с интегральной оценкой микрокровотока.

В шестой главе изложен педагогический раздел, в котором разработаны методические указания к лабораторному практикуму «Исследование распределения микрокровотока по диапазонам скоростей с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии» для направления подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Анализ общего состояния проблем в лазерной доплеровской флоуметрии и анализе сигнала показал, что проблема эффектов, которые могут происходить с показателем микроциркуляции на поддиапазонах частот в течение функциональных нагрузочных тестов не достаточно исследована.

2) Предложенный метод записи показателя микроциркуляции на поддиапазонах частот признан перспективным для оценки состояния микроциркуляторного русла человека.

3) Исследованы спектры доплеровского уширения лазерного излучения и обнаружен факт нестационарного распределения показателя микроциркуляции по частотным диапазонам доплеровского сдвига при проведении функциональных тестов.

4) Создан метод визуализации распределения показателя микроциркуляции и проведена апробация данного метода.

5) Исследована связь показателя микроциркуляции со скоростью кровотока, объективно измеренной методом видеокапилляроскопии.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 Volkov M.V., Kostrova D.A., Margaryants N.B., Gurov I.P., Erofeev N.P., Dremin V.V., Zharkikh E.V., Zherebtsov E.A., Kozlov I.O., Dunaev A.V. Evaluation of blood microcirculation parameters by combined use of the laser Doppler flowmetry and the video capillaroscopy methods // Proc. SPIE 10336, 2017, 1033607.

2 Dremin V.V., Zherebtsov E.A., Makovik I.N., Kozlov I.O., Sidorov V.V., Krupatkin A.I., Dunaev A.V., Rafailov I.E., Litvinova K.S., Sokolovski S.G., Rafailov E.U. Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis // Proc. SPIE 10063, 2017, 1006303.

3 Козлов И.О., Жеребцов Е.А. Технические и методические аспекты анализа гемолимфоциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4803/4803.pdf>

4 Kozlov I.O., Zherebtsov E.A., Zherebtsova E.A., Dremin V.V., Dunaev A.V. Investigation of Doppler Spectra of laser radiation scattered inside hand skin during occlusion test // PhysicA.SPb/2016 - Book of abstracts (November 1-3, 2016), St. Petersburg, Russia

5 Zherebtsov E.A., Kandurova K.Y., Seryogina E.S., Kozlov I.O., Dremin V.V., Zherebtsova A.I., Dunaev A.V., Meglinski I. The influence of local pressure on evaluation parameters of skin blood perfusion and fluorescence // Saratov Fall Meeting 2016 – Symposium: Optics and Biophotonics – IV (September 27-30, 2016), Saratov, Russia

6 Волков М.В., Кострова Д.А., Маргарянц Н.Б., Гуров И.П., Ерофеев Н.П., Дрёмин В.В., Козлов И.О., Жарких Е.В., Жеребцов Е.А., Дунаев А.В. Исследование динамики капиллярного кровотока при артериальной окклюзионной пробе методами видеокапилляроскопии и лазерной доплеровской флоуметрии // Экспериментальные и клинические аспекты микроциркуляции и функции эндотелия: материалы II международной научно-практической конференции – Смоленск, Россия, 16-17 ноября 2016 / Под ред. О.В. Молоткова, О.В. Халепо. С.256-259.

7 Козлов И.О., Жеребцов Е.А., Дрёмин В.В., Жеребцова А.И., Дунаев А.В. Получение и исследование референсных спектров доплеровского уширения лазерного излучения, рассеянного в коже рук при окклюзионной пробе // 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2016» – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, Книга 2. С.123-126.

8 Козлов И.О. Исследование алгоритмов обработки лазерного доплеровского сигнала в среде NI Labview // Труды IV Всероссийского конгресса молодых ученых. – (Санкт-Петербург, апрель 2015 г.). – СПб: Университет ИТМО, 2015.

9 Козлов И.О., Жеребцов Е.А., Дунаев А.В., Подмастерьев К.В. Новые принципы построения устройств для контроля технического состояния приборов лазерной доплеровской флоуметрии // Биотехносфера. – СПб.: Политехника, 2015. – №2(38). – С. 10-14.

10 Козлов И.О., Жеребцов Е.А., Жеребцова А.И., Дунаев А.В. Анализ алгоритмов обработки сигнала лазерной доплеровской флоуметрии в среде NI LabVIEW // ИСиТ-2015. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2015.

11 Kozlov I.O., Zherebtsov E.A., Zherebtsova A.I., Dunaev A.V. The analysis of processing algorithms of laser Doppler signal in LabVIEW software // Symposium Proceedings of 2nd International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE." 2015. (St.Petersburg, Russia, 22 June - 03 July 2015). - P. 225-227.

12 Козлов И.О. Возможные подходы к построению тест-объектов для проверки работоспособности приборов лазерной доплеровской флоуметрии // Труды III Всероссийского конгресса молодых ученых. – (Санкт-Петербург, апрель 2014 г.). – СПб: Университет ИТМО, 2014. – С. 254-255.