

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Кафедра медицинской физики

**Исследование микроциркуляции кровотока при воздействии импульсов
электрического тока**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4021 группы

Направления 03.03.02 «Физика»

Компьютерные технологии в медицинской физики

Прохоровой Вероники Дмитриевны

Научный руководитель

к.ф.-м. н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

16.06.2025

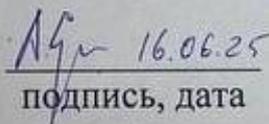
А.П. Рытик

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

16.06.25

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение

Исследование микроциркуляции крови проводится с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии, который обладает высокой чувствительностью к изменениям кровотока в сосудах и позволяет оценить работу механизмов управления кровообращением. Этот метод также позволяет изучить влияние электростимуляции на микроциркуляцию крови. Электростимуляция, в свою очередь, представляет собой метод физиотерапии, основанный на применении импульсных токов через электроды, и обладает рядом положительных свойств, таких как ускорение регенерации нервов, предотвращение мышечной атрофии и восстановление активности нервно-мышечной системы.

В нашем исследовании была использована электростимуляция мышц предплечья руки. При использовании аппарата Лазерной доплеровской флоуметрии, можно изучить момент импульса и рассмотреть, как менялись пассивные и активные факторы, воздействующие на микроциркуляторную систему и дать более точное описание, как электростимуляция мышц воздействует на сосудистую систему.

Как известно при диагностике ЛДФ мы получаем ЛДФ-грамму, представляющую собой сложный колебательный процесс, включающий в себя активные и пассивные факторы.

Активными называются факторы, воздействующие на микроциркуляторную систему, к таким можно отнести: миогенный, нейрогенный, эндотелиальный механизмы регуляции. Они реализуются через мышечный компонент сосудистой стенки и в результате чередования сокращения и расслабления мышц, создают поперечные колебания кровотока.

Пассивными являются факторы, которые могут вызвать продольные колебания кровотока вне микроциркуляторной системы. Они характеризуют изменение объема крови в сосуде и попадают в зондируемую систему как пульсовая волна со стороны артериол и как рабочий ритм дыхательного насоса со стороны венул.

Актуальность выбранной темы определяется высокой распространенностью сердечно-сосудистых патологий, являющихся ведущей причиной смертности населения в современном обществе.

Новизна: предложен новый метод исследования микроциркуляции при воздействии электрическими импульсами на человека.

Целью настоящей работы явилось исследование функционирования периферических сосудов при воздействии электрических импульсов.

В рамках выполнения дипломной работы были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать поведение сосудов до воздействия электрических импульсов, во время и после, а также переходный импульс после включения и выключения;
2. Провести сравнительный анализ полученных результатов;
3. Выполнить критический обзор литературы.

Методы исследования: обзор доступных источников, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

Описание структуры:

Глава 1. Микроциркуляция кровотока

1.1 Микроциркуляторное русло

1.2 Модель кровеносного сосуда Кельвина-Фойгта

1.3 Вязкоупругая модель пульса типа «упругий резервуар»

1.4 Основы электрофизиологии сердца

Глава 2. Метод лазерной доплеровской флоуметрии

2.1 Физические основы метода ЛДФ

2.2 Диагностическое значение ритмов колебаний кровотока в микроциркуляторном русле

3 Практическая часть

Основное содержание работы

Микроциркуляция кровотока

Микроциркуляторное русло – это сложно устроенная система, которая находится в состоянии постоянной регуляции, осуществляющейся путем вазомоций – непрерывных изменений сосудистого диаметра. Использование Вейвлет-преобразования ЛДФ-граммы позволяет анализировать амплитудно-частотные характеристики данных вазомоций. Считается, что частоты колебаний сосудов лежат в определенных границах в зависимости от происхождения этих колебаний. Так, самыми низкочастотными считаются эндотелиальные колебания (0,0095–0,02 Гц), затем следуют нейрогенные (0,021–0,046 Гц), миогенные (0,047–0,145 Гц), дыхательные (0,2–0,4 Гц) и сердечные (0,8–1,6 Гц).

Клетки сердца выполняют ряд важных функций, обеспечивающих нормальную работу органа:

1. Автоматизм: Сердце способно самостоятельно сокращаться благодаря специальным структурам, называемым синусовым узлом (СА-узел), атриовентрикулярному узлу (АВ-узел) и волокнам Пуркинье. Эти структуры генерируют и проводят электрические сигналы, регулируя ритм сокращения.

2. Возбудимость: Клетки сердца способны реагировать на внешние раздражители путем формирования электрических сигналов. После возникновения возбуждения наступает период временной невосприимчивости к новым сигналам (так называемый рефракторный период). Затем сердце снова становится способным к возбуждению.

3. Рефрактерность: Способность клеток сердца временно терять возможность реагировать на новые импульсы. Этот механизм предотвращает повторное преждевременное возбуждение.

4. Проводимость: Возможность передавать электрические импульсы между различными участками сердца, обеспечивая согласованное сокращение всех отделов.

5. Сократимость: Способность клеток сердца сокращаться в ответ на возбуждение, что обеспечивает перекачивание крови по организму. Эти функции обеспечивают эффективную координацию деятельности сердца и адаптацию его активности к потребностям организма.

Модель Кельвина-Фойгта представляет собой вязкоупругую систему с параллельно расположенными вязким и упругим элементами и запаздывающей упругой реакцией. Если приложить постоянную силу, то пружина растянется, но вязкий элемент не позволит этому процессу произойти быстро: поршень будет постепенно вытягиваться. Если снять нагрузки, то пружина будет сжиматься постепенно, так как быстрому сжатию будет мешать вязкий элемент.

Поведение тела Кельвина-Фойгта, описанное дифференциальным уравнением:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_n = E_\varepsilon + n_\varepsilon$$

σ -напряжение (const)

E-эластичная модель материала

ε -деформация

n-вязкость материала

То есть, вся энергия, создаваемая сердцем во время систолической фазы, делится между упругими и вязкими элементами сосудов. В результате выброса крови из левого желудочка формируется волна повышенного давления, которая распространяется по аорте и артериям. Эту волну называют пульсовой.

Пульсовой волне будет соответствовать пульсирование скорости кровотока в крупных артериях, однако скорость крови существенно меньше скорости распространения пульсовой волны.

Метод лазерной доплеровской флоуметрии

Лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) представляет собой безопасный и удобный метод, позволяющий исследовать состояние микроциркуляции крови в тканях организма. Преимуществом метода является его неинвазивность, отсутствие вреда для здоровья пациента и высокая точность измерений.

Принцип работы ЛДФ основан на применении лазерного луча, направляемого в ткань, и последующей регистрации отраженных световых волн. Поскольку эритроциты находятся в постоянном движении, взаимодействие света с ними вызывает изменение частоты излучения, которое фиксируется устройством. Глубина проникновения лазера в ткани варьирует от 0,5 до 2 мм, позволяя оценивать изменения кровотока в мелких сосудах кожи и слизистых оболочках.

Основной показатель, определяемый методом ЛДФ, называется перфузией. Перфузия отражает скорость движения эритроцитов и их концентрацию в исследуемой области. Полученный сигнал отображается графически в виде кривой (ЛДФ-граммы), которую затем анализируют специалисты. Распространенным способом анализа является расчет средних значений перфузии, стандартного отклонения и коэффициента вариации за заданный промежуток времени.

Для повышения диагностической ценности метода дополнительно применяют функциональные пробы, такие как воздействие тепла, холода или лекарственных препаратов, позволяющие оценить реакцию сосудов на внешнее раздражение.

Клиническое применение ЛДФ особенно актуально при изучении нарушений кровообращения в коже, мышцах и внутренних органах. Метод активно применяется для диагностики и мониторинга эффективности терапии таких состояний, как сахарный диабет, артериальная гипертензия, заболевания периферических артерий и сосудистые патологии различного происхождения.

Обширные научные публикации подтверждают важность метода ЛДФ в исследованиях микроциркуляции при заболеваниях, сопровождающихся нарушением кровоснабжения тканей, что подчеркивает его роль в современной медицине.

Система регуляции микроциркуляторного русла функционирует на нескольких уровнях и основана на принципах обратной связи. Саморегуляция кровотока осуществляется посредством взаимодействия различных факторов, включая активность эндотелиальных клеток, нейрогенную регуляцию и миогенные реакции сосудов, а также влияния дыхательного и сердечного циклов. Механизмы обратной связи играют ключевую роль в поддержании гомеостаза и адаптации к изменениям условий окружающей среды.

Активизация механизмов контроля обусловлена нуждами тканей в конкретный момент времени. Например, уменьшение нейрогенного тонуса (особенно симпатической активности) может снизить тонус артериол, вызывая расширение сосудов и увеличение притока крови, что повышает давление и усиливает пульсовую волну.

При значительном повышении перфузионного давления запускается следующая последовательность реакций:

- Миогенная реакция ведет к сужению просвета прекапилляров, уменьшая диаметр сосуда.

Повышение напряжений сдвига на стенках сосудов стимулирует выделение оксида азота (NO) эндотелием, предотвращающего дальнейшее сужение сосудов и помогающего предотвратить тканевую гипоксию.

Это демонстрирует сложный характер взаимодействия механизмов контроля микроциркуляции, направленных на поддержание оптимального кровоснабжения органов и тканей.

Практическая часть

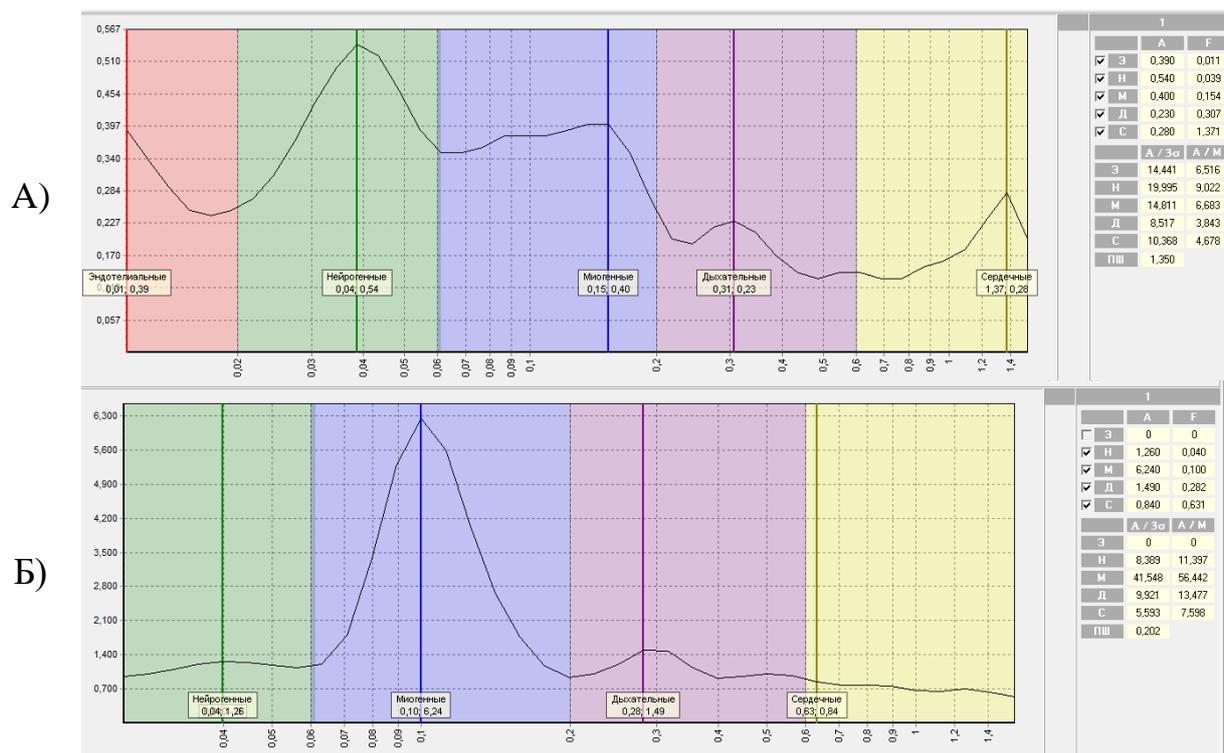
Для проведения исследования выбиралась группа добровольцев из числа студентов в количестве 30 человек. Проводили анализ амплитуды частотных

компонент сигнала ЛДФ с сегментацией по составляющим: нейрогенный, дыхательный, миогенный и сердечный.

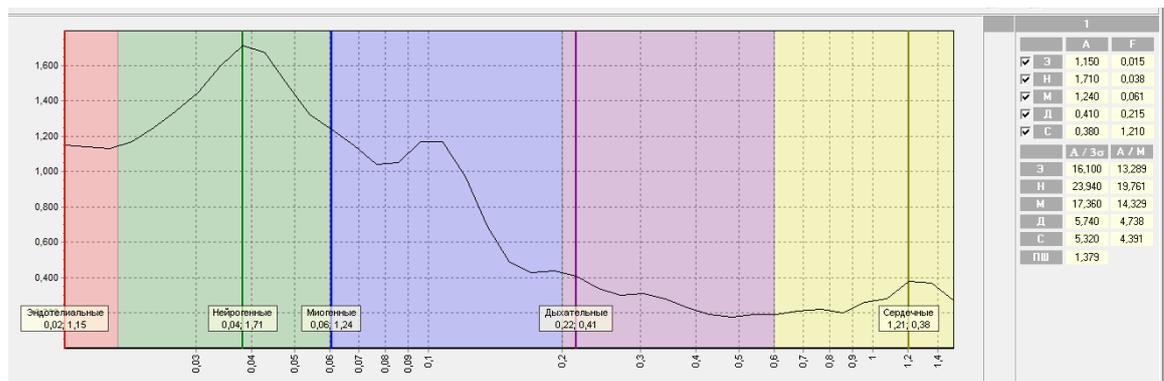
Испытуемый располагался удобно в кресле и в течении 10 минут находился в расслабленном состоянии. По истечению времени «отдыха» записывалась фоновая проба ЛДФ продолжительностью в 7 минут. После этого накладывали электроды прибора (электростимулятора) на предплечье правой руки, и проводили воздействие токовых импульсов.

Проводили запись до воздействия токовых импульсов, в процессе токовых импульсов, сразу после воздействия и еще в течение нескольких минут для доказательства существования кумулятивного эффекта(эффект после выключения воздействия импульсов).

На рисунке 2 представлены спектры амплитуды колебаний ЛДФ-граммы.



В)



Как видно из рис.2 А, в фоновом режиме наблюдались умеренные показатели активных и пассивных факторов колебаний кровеносных сосудов. Во время электростимуляции наблюдается значительная амплитуда колебаний кровеносных сосудов в миогенном диапазоне (рис.2 Б). После электростимуляции наблюдалось значительное увеличение активных относительно пассивных факторов колебаний кровеносных сосудов (рис.2 В).

Заключение

Из результатов исследований можно заключить, что наибольшее увеличение наблюдается у миогенной компоненты спектра, что говорит о стимуляции гладких мышц сосудов импульсами тока. При этом включаются механизмы: изменение работы ионных каналов клеток, тканей мускулатуры и сокращение сосудистой стенки. В совокупности это увеличивает сосудистый тонус и сопротивление, что ведет к повышению миогенного ответа.

В ходе исследования было выявлено:

- В большинстве случаев при воздействии электрических импульсов, повышается амплитуда миогенной компоненты спектра функционирования сосудистой стенки. Все остальные гармоники спектров изменялись относительно слабо.
- Результаты данного исследования могут находиться в основе создания физиопроцедуры при электростимуляции гладких мышц периферических сосудов.
- Кроме того, показано, что эффективность метода электростимуляции количественно можно оценивать методом ЛДФ, при этом каждую компоненту кровотока можно оценить отдельно.