

Многоточечная термометрия как метод визуализации сосудистых реакций в режиме реального времени

К. Е. Санарова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

kсениya.sanarova@mail.ru

Аннотация. Оценка функционального состояния периферического кровообращения и вегетативной регуляции сосудистого тонуса является сложной диагностической задачей, особенно в динамике нагрузочных тестов. Традиционные методы часто не позволяют непрерывно отслеживать реакцию микроциркуляторного русла на стресс. В данной работе рассматривается возможность применения многоточечной непрерывной термометрии в качестве инструмента визуализации сосудистых реакций в реальном времени. В ходе исследования регистрировался температурный градиент у здоровых добровольцев до, во время и после дозированной физической нагрузки. По результатам эксперимента была выявлена зависимость характера температурных изменений от функционального типа сосудистой зоны.

Ключевые слова: термометрия; состояние пациента; нагрузочное тестирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Основная функция сердечно-сосудистой системы заключается в обеспечении перфузии органов и тканей, завершающим этапом которой выступает микроциркуляция [1]. В системе микроциркуляции за счёт транскапиллярного обмена происходит снабжение тканей кислородом и выведение метаболитов. Структура микроциркуляторного русла включает артериолы, капилляры, вены, артериоловеноулярные шунты и лимфатические капилляры, которые отвечают за дренаж избыточной межклеточной жидкости, продуктов метаболизма и медиаторов воспаления.

Ключевым параметром микроциркуляции является линейная и объемная скорость кровотока в сосудах разного диаметра, поскольку именно эти показатели определяют уровень оксигенации тканей в физиологических условиях и при гипоксических состояниях. Возможность регистрации перфузионных показателей и анализа их колебаний в различных ритмических режимах составляет существенное преимущество современных физиологических исследований. Интенсивность кровоснабжения ткани определяется ее метаболической активностью и функциональной значимостью для организма. Жизненно важные органы, включая мозг и сердце, обеспечиваются кровью в первую очередь, в то время как кожный кровоток отличается выраженной изменчивостью, реагируя на различные факторы окружающей и внутренней среды. В структуре микроциркуляторного русла особое место занимает эндотелий, который выполняет функцию регуляции сосудистого тонуса,

гемостаза и воспалительных процессов. Эндотелиальная дисфункция, лежащая в основе большинства сердечно-сосудистых заболеваний, обуславливает развитие расстройств периферической гемодинамики. Нарушения микроциркуляции, развивающиеся на этом фоне, сопровождаются локальной гипотермией тканей вследствие снижения линейной и объемной скорости кровотока в микрососудистом русле. В связи с этим локальные изменения температуры [2] тканей могут рассматриваться как косвенный индикатор эффективности периферической оксигенации.

Таким образом, регистрируемые в различных сосудистых зонах температурные градиенты могут отражать характер сосудистых реакций, что позволяет рассматривать многоточечную термометрию как перспективный метод неинвазивной оценки реактивности сосудов при функциональных нагрузках.

Целью данной работы является изучение пространственно-временной динамики распределения температуры тела у участников исследования в ходе дозированной физической нагрузки и последующего восстановительного периода. Исследование направлено на выявление температурных паттернов, отражающих характер сосудистых реакций и особенности регуляции сосудистого тонуса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработан протокол эксперимента, предусматривающий применение системы многоканальной локальной термометрии в условиях велоэргометрического нагрузочного теста, а также проведены анализ и интерпретация полученных данных.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 8 здоровых добровольцев, сопоставимых по полу и возрасту. Среди 8 добровольцев было 3 мужчины и 5 женщин в возрасте от 24 до 45 лет. Критерии включения: отсутствие хронических заболеваний, индекс массы тела в пределах нормы или чуть ниже. Критерии исключения: курение, прием лекарственных препаратов, влияющих на сосудистый тонус, острые инфекционные заболевания на момент исследования.

Всем участникам проводился нагрузочный тест на велоэргометре в положении сидя в режиме ступенчато возрастающей нагрузки до достижения субмаксимальной толерантности. Регистрация температуры проводилась непрерывно на трех этапах: исходное состояние (2 минут в покое), период нагрузки (от начала до завершения

велозергометрии – 16 минут, по 2 минуты на каждый уровень нагрузки) и восстановительный период (3 минут после окончания нагрузки). Исследование выполнялось натошак в помещении с постоянной температурой воздуха 22–24 °С. Перед началом исследования всем участникам проводилось измерение артериального давления с помощью механического тонометра. У испытуемых, чьи антропометрические показатели соответствовали нижней границе нормы (ИМТ менее 18,5 кг/м²), отмечалась тенденция к артериальной гипотензии. На протяжении всего исследования осуществлялся мониторинг сатурации крови (SpO₂) методом пульсоксиметрии.

А. Измерительный комплекс

Для оценки температурной динамики применялась оригинальная 4-канальная система многооточечной непрерывной термометрии [3]. Термомонитор включал модули регистрации и передачи данных по радиоканалам. Измерения температуры проводились с помощью миниатюрных цифровых датчиков TMP117 с частотой дискретизации 1 Гц (одно измерение в секунду). Передача данных осуществлялась непосредственно на персональный компьютер с использованием технологии Bluetooth.

Прием и обработку сигналов обеспечивало разработанное приложение, которое в реальном времени отображало температурные кривые в виде графиков и автоматически заполняло таблицу Microsoft Excel поступающими данными. Это позволяло одновременно визуализировать динамику температуры в ходе нагрузочного теста и формировать структурированный массив данных для последующего статистического анализа.

Миниатюрные цифровые датчики TMP117 фиксировались на теле испытуемых в четырех точках при помощи медицинских тейпов.

В. Локализация датчиков

Датчики фиксировались в четырех анатомических точках. Точка А располагалась над лучевой артерией на запястье для регистрации артериального притока к кисти. Точка В находилась в локтевом сгибе в проекции латеральной подкожной вены для оценки венозного оттока от предплечья и кисти. Точка С размещалась на тыльной стороне предплечья как зона, репрезентативная для оценки терморегуляторных реакций кожного и мышечного кровотока. Точка D фиксировалась на тыльной стороне плеча в качестве проксимальной зоны сравнения, отражающей кровоснабжение области, близкой к туловищу. Пример расположения температурных датчиков на теле испытуемого представлен на рис. 1.

С. Статистическая обработка

Статистический анализ полученных данных был выполнен с использованием программного обеспечения «IBM SPSS Statistics», версия 29.0.2.0. Результаты были представлены в виде медианы, 25-го и 75-го перцентилей (Me (Q_{0,25}; Q_{0,75})). Нормальность распределения полученных данных проверялась с помощью критерия Шапиро-Уилка.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Все восемь участников завершили протокол нагрузочного тестирования. Среднее время достижения субмаксимальной нагрузки составило 12 ± 2 минуты.

При анализе индивидуальных данных выявлена гетерогенность температурной реакции в точке А (проекция лучевой артерии). У 5 из 8 испытуемых (62.5%) зарегистрировано снижение температуры в данной зоне при переходе от покоя к нагрузке (отрицательный прирост ΔТ), тогда как у оставшихся 3 участников (37.5%) наблюдалось повышение температуры (положительный прирост ΔТ). Медианные значения ΔТ в точке А для этих подгрупп составили - 0,463 [-0,774; -0,281] и + 0,602 [0,41; 0,701] соответственно.



Рис. 1. Фиксация температурных датчиков на теле испытуемого

Аналогичная картина, что и в точке А, зафиксирована в точке В (латеральная подкожная вена) – у 5 испытуемых наблюдалось снижение температуры, а у 3 ее повышение. Медианные значения ΔТ - 0,625 [-1,062; -0,481] и + 1,265 [0,211; 2,215] соответственно.

Вариабельной оказалась и реакция в точке С (тыльная поверхность предплечья): у 5 испытуемых зарегистрировано снижение температуры, у 3 — ее повышение. При этом данное распределение не совпадало с паттернами, наблюдавшимися в точке А, что указывает на независимую регуляцию кровотока в разных сосудистых зонах одной конечности.

У 100% испытуемых температура в точке D (тыльная поверхность плеча) повышалась при переходе от покоя к нагрузке, что отражает закономерную активацию мышечного кровотока и усиление системной гемодинамики. Медиана составила 0,96 [0,207; 1,549].

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленная гетерогенность температурной реакции в проекции лучевой артерии, вероятно, обусловлена различным балансом между симпатической вазоконстрикцией и метаболической вазодилатацией у отдельных индивидов. У 62.5% испытуемых преобладание симпатических влияний привело к снижению кожного кровотока и, как следствие, к локальной гипотермии в зоне артерии. У остальных участников доминирующим механизмом явилась рабочая гиперемия, сопровождавшаяся повышением температуры.

Подтверждением физиологичности выявленных изменений служат данные пульсоксиметрии: у испытуемых с отрицательным приростом температуры в точке А значения периферической сатурации оставались стабильными (96–98%) на протяжении всего теста, тогда как в подгруппе с положительным приростом отмечалась тенденция к более высоким значениям сатурации на пике нагрузки (98–99%). Это позволяет исключить системную гипоксемию как причину температурных различий и подтверждает, что наблюдаемые изменения обусловлены именно локальными сосудистыми реакциями.

Полученные данные согласуются с известными представлениями о гетерогенности вегетативных реакций у здоровых лиц и могут отражать индивидуальные особенности регуляции сосудистого тонуса, связанные с уровнем тренированности или исходным вегетативным статусом. Можно предположить, что выявленные различия могут быть связаны с особенностями телосложения испытуемых, в частности, у лиц астенического телосложения с исходно более низким сосудистым тонусом спастические реакции могут проявляться ярче [4]. Однако для подтверждения данной гипотезы требуется расширение выборки и учет антропометрических показателей.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была достигнута поставленная цель — изучена пространственно-временная динамика распределения температуры тела у здоровых добровольцев в условиях дозированной физической нагрузки и восстановительного периода. Разработанный протокол эксперимента с применением системы многоканальной локальной термометрии позволил в реальном времени регистрировать

температурные изменения в четырех сосудистых зонах верхних конечностей на всех этапах нагрузочного тестирования. В заключении подводятся итоги исследования.

Результаты эксперимента подтверждают, что многоканальная локальная термометрия является информативным методом оценки функционального состояния периферического кровообращения, позволяющим дифференцировать реакцию магистральных сосудов и микроциркуляторного русла в ответ на функциональные нагрузки. Выявленные температурные паттерны могут служить основой для разработки диагностических критериев оценки сосудистой регуляции у здоровых лиц и, в перспективе, у пациентов с сердечно-сосудистой патологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тихомирова И.А. Реология крови и микроциркуляция // Успехи физиологических наук, 2023. Т. 54, № 1, с. 3-25. – DOI 10.31857/S0301179823010071.
- [2] Потехина Ю.П., Голованова М.В. Причины изменения локальной температуры тела // Медицинский альманах, 2010. Номер 2(11), с. 297-298.
- [3] Мбазумутима Э., Шаповалов С.В., Чиков А.Е., Куцало А.Л., Санарова К.Е., Семенова Е.А., Красичков А.С. Разработка и испытание многоканального устройства регистрации температуры тела для оценки функционального состояния человека // Медицинская техника, 2025. Номер: 5(353), с. 9-12.
- [4] Тимофеева А.В., Климова Т.М., Михайлова А.Е., Захарова Р.Н., Винокурова С.П., Тимофеев Л.Ф. Характеристика соматотипа и функционального состояния системы кровообращения студенческой молодежи Северо-Востока России // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины, 2015. Номер 23(5), с. 19-22.