

УДК 681.2.082:615.849.19

П.М. БЕЛЫХ, И.Н. НОВИКОВА, А.В. ДУНАЕВ
P.M. BELYKH, I.N. NOVIKOVA, A.V. DUNAEV

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ БИОТКАНЕЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОРТОПЕДИЧЕСКОГО СРЕДСТВА
ASSESSMENT OF CHANGES OF THE PARAMETERS MICROCIRCULATORY-TISSUE SYSTEMS OF BIOLOGICAL TISSUES IN THE APPLICATION OF ORTHOPEDIC SUPPORT

Данная работа посвящена оценке эффективности применения ортопедического средства в виде варежки, применяемой при синдроме Рейно, вибрационной болезни и ряде других заболеваний микроциркуляторно-тканевых систем организма. Приведена методика проведения эксперимента, описаны расчётные параметры и представлены результаты исследований изменений параметров микроциркуляторно-тканевых систем до и после использования ортопедического средства.

Ключевые слова: лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая тканевая оксиметрия, пульсоксиметрия, флуоресцентная спектроскопия, ортопедическое средство, микроциркуляторно-тканевые системы.

This work is devoted to the assessment efficiency of application of orthopedic support. The article describes the methodology of experiments, the results of studies of changes of the parameters microcirculatory-tissue systems before and after use of orthopedic support and analyses of obtained data.

Keywords: laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry, pulse oximetry, fluorescence spectroscopy, microcirculatory-tissue system, orthopedic devices

В последнее время в медицине значимой становится проблема диагностики и лечения заболеваний, связанных с нарушением микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма, а именно таких, как болезнь Рейно, вибрационная болезнь, последствия травм и переломов и другие патологии. Для лечения подобных заболеваний всё чаще применяют различные ортопедические средства, эффективность которых обуславливается особенностью их конструкции и свойствами наполнителя.

Современный рынок медицинских изделий широко представлен различными ортопедическими средствами, например, ортопедическое изделие (варежка) производства ООО «Альсария» (г. Орёл, Россия), представленное на рисунке 1.



Рисунок 1 – Ортопедическое средство на основе микросфер (варежка) (ООО «Альсария», г. Орел)

Особенность данного ортопедического изделия в том, что оно состоит из наполнителя, который представляет собой смесь из микростеклосфер (микросфер): натриевоборосиликатного стекла размерами 15-200 мкм и микростеклосфер из калий-натриевого стекла размерами 50-160 мкм с кремнийорганическим покрытием, который находится в двух чехлах (внутреннем и внешнем). Структура смеси микростеклосфер во внутреннем чехле представлена на рисунке 2 [1].

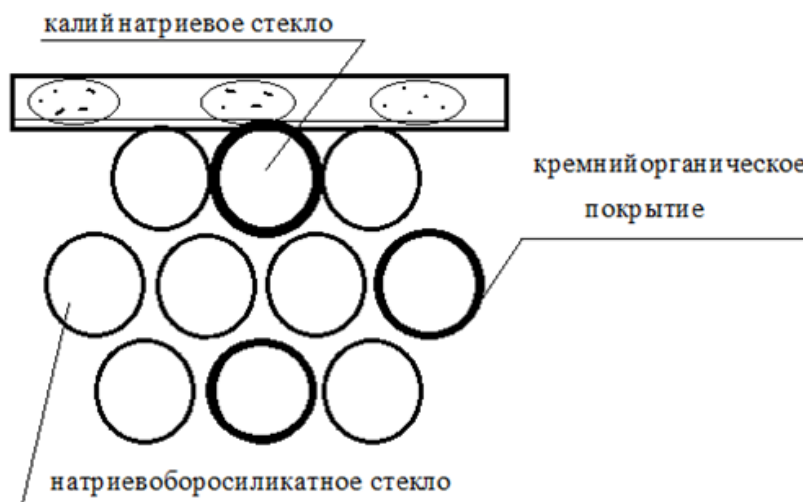


Рисунок 2 – Структура смеси микростеклосфер во внутреннем чехле ортопедического средства

За счет наличия микросфер ортопедическое средство, по мнению производителя обладает рядом специфических свойств, а именно: эффектом псевдоневесомости; эффектом отражения, обеспечивающим воздействие лечебным инфракрасным излучением и так называемым «эффектом биорезонанса», а также saniрующим и антиаллергическими эффектами [2].

Эффект псевдоневесомости реализуется благодаря схожести свойств наполнителя со свойствами жидкости, такими, как внутренний коэффициент трения (или вязкость), благодаря которому наполнитель не оказывает никакого сопротивления изменению формы при неизменном объёме и сохраняет способность при воздействии внешнего давления передавать это давление по всем направлениям одинаково [1]. Данное свойство приводит к улучшению кровоснабжения органов и тканей, происходит стимуляция системы микроциркуляции крови, улучшается трофика, что обеспечивает более интенсивное протекание репаративных процессов. Псевдоневесомость также способствует максимальному расслаблению мышц при применении ортопедических свойств.

Эффекты отражения позволяют распределять в процессе проведения процедуры (применение ортопедического средства) инфракрасное тепло человеческого тела. Инфракрасное излучение проникает в глубокие слои биоткани и может приводить к прогреванию всей толщи кожных покровов и подкожных тканей, в результате может происходить повышение потенциальной энергии клеток организма, может повышаться деятельность специфических клеточных структур, расти уровень иммуноглобулинов, увеличиваться активность ферментов и эстрогенов [1,2]. Увеличение температуры может вызвать увеличение локального кровотока, как следствие, возрастает объем крови

циркулирующей в тканях, ускоряются обменные процессы. Активация микроциркуляторного русла и повышение проницаемости сосудов может способствовать дегидратации воспалительного очага и удалению продуктов распада клеток. Использование данного ортопедического средства может приводить к ускорению заживления ран и трофических язв за счет активации пролиферации и дифференцировки фибробластов.

Нанесения на поверхность микросфер кремнийорганического покрытия, по мнению производителя [2], приводит к повышению содержания щелочных компонентов в составе стекла, что обеспечивает стерильность воздуха, проходящего через стекломикрошарики. Стекланные микросферы, являющиеся неорганическим веществом, исключают размножение пылевых клещей и других паразитов, являющихся сильнейшим аллергеном.

Таким образом, применение данных ортопедических средств на основе микросфер может приводить к значительным положительным изменениям в состоянии МТС биотканей, связанных в первую очередь с состоянием периферического кровотока и динамикой утилизации кислорода тканями. Оценка отклика данных систем на внешнее воздействие является актуальной и важной задачей при использовании ортопедического средства и анализе эффективности его применения. Следует отметить, что ранее уже предпринимались попытки (например, [3]) оценить изменения параметров системы микроциркуляции крови при применении данного ортопедического средства с помощью лазерной доплеровской флоуметрии. Однако, оценка изменений комплексных параметров МТС (тканевое дыхание и др.) не была проведена.

Целью данной работы явилось оценить изменения комплексных параметров микроциркуляторно-тканевых систем биотканей в результате применения ортопедического средства в виде варежки из микросфер.

В настоящее время для исследования МТС широкое применение получили различные оптические неинвазивные технологии такие, как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), оптическая тканевая оксиметрия (ОТО), пульсоксиметрия (ПО) и флуоресцентная спектроскопия (ФС) [4].

Метод ЛДФ основан на неинвазивном зондировании ткани лазерным излучением и регистрации отраженного и рассеянного излучения от движущихся эритроцитов в диагностическом объеме (около 2-3 мм³ при зондировании ИК-излучением). Основным регистрируемым параметром является показатель микроциркуляции, измеряемый в перфузионных единицах, который определяется следующим выражением [4]:

$$PM = K \cdot N_{\text{эп}} \cdot V_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где PM – показатель микроциркуляции;

K – коэффициент пропорциональности;

$N_{\text{эп}}$ – среднее количество эритроцитов;

$V_{\text{ср}}$ – средняя скорость эритроцитов в зондируемом объеме.

Значение данного параметра варьируется в зависимости об анатомической области и зависит от пространственной ориентации направлений основных потоков крови.

Метод оптической тканевой оксиметрии основан на спектрофотометрическом анализе различных фракций гемоглобина при зондировании биоткани излучением двух диапазонов длин волн (красного 630 нм и зеленого 530 нм). Основными регистрируемыми параметрами являются тканевая сатурация (S_tO_2), определяемая выражением (2), которая показывает долю фракций оксигемоглобина по отношению к различным фракциям гемоглобина, и уровень объемного кровенаполнения, который рассчитывается по формуле (3) и показывает

процентное содержание различных фракций гемоглобина в диагностируемом объеме биоткани [4, 5]:

$$S_t O_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $S_t O_2$ – тканевая сатурация;

C_{HbO_2} – молярная концентрация оксигемоглобина;

C_{Hb} – молярная концентрация дезоксигемоглобина.

$$V_b = \frac{C_{HbO_2} + C_{Hb}}{C_{HbO_2} + C_{Hb} + C_{other}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где V_b – объемное кровенаполнение;

C_{other} – молярная концентрация всех остальных (других, то есть сторонних) оптических поглотителей в ткани.

Как известно, метод пульсоксиметрии основан на способности гемоглобина связанного (HbO_2) и не связанного с кислородом (Hb), абсорбировать свет различной длины волны. Измеряя разницу между количеством света, абсорбируемого во время систолы и диастолы, данный метод позволяет определить процентное содержание (сатурацию) оксигемоглобина в артериальной крови [6].

Флуоресцентная спектроскопия основана на зондировании биообъекта излучением в видимой области спектра с целью возбуждения эндогенных и экзогенных флуоресцирующих биомаркеров кожи (NADH, флавины, липофусцины, порфирины и др.) и регистрации спектров флуоресценции. Данный метод позволяет регистрировать и анализировать *in vivo* прижизненное содержание в тканях и органах веществ, определяющих метаболизм и жизнеспособность клеток и тканей [4].

Для оценки изменений параметров МТС при применении данного ортопедического средства на основе микросфер была проведена серия тестовых экспериментов на добровольце мужского пола в возрасте 25 лет с использованием многофункционального лазерного неинвазивного диагностического комплекса (МЛНДК) «ЛАКК-М» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленного на рисунке 3. Данный комплекс предназначен для совместного исследования в одном диагностируемом объеме биоткани параметров ее жизнедеятельности (МТС) всеми рассмотренными выше неинвазивными оптическими методами (ЛДФ, ОТО, ПО, ФС).

Эксперимент включал в себя регистрацию базового теста ЛДФ- и ОТО-грамм длительностью 3 мин, измерение артериальной сатурации с помощью ПО и интенсивности флуоресценции биомаркеров (NADH, флавины) при помощи ФС до и после применения ортопедического средства в двух областях биоткани: в области с артерио-венозными анастомозами (АВА) – мякиш среднего пальца правой руки, которая наиболее подвержена различным регуляторным механизмам, и в области без АВА (предплечье правой руки), которая является менее чувствительной и характеризует, прежде всего, нутритивный кровоток. Измерения проводились в дневное время суток, в состоянии физического и психического покоя, с предварительной адаптацией испытуемого к температуре помещения 20-23 °С. Всего было проведено 6 экспериментов (по 3 для каждой области исследований).

Длительность применения ортопедического средства (время экспозиции) составляла 15 мин, длительность одного эксперимента с учётом всех измерений на 2-х областях – около 30 мин.

Таким образом, при проведении экспериментов производилась регистрация показателя микроциркуляции (I_m), тканевой сатурации (S_tO_2), уровня объёмного кровенаполнения (V_b), артериальной сатурации (S_aO_2) и амплитуд интенсивности флуоресценции коферментов биоткани (NADH и флавинов). С использованием встроенного программного обеспечения производился амплитудно-частотный анализ (непрерывное вейвлет-преобразование) ЛДФ- и ОТО-грамм. На основании измеренных параметров производился расчет комплексных параметров МТС биотканей, таких, как: индекс относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке (S_m), индексы удельного потребления кислорода в ткани (U_1, U_2), показатель тканевого кислородного метаболизма – редокс-отношение (RR), рассчитываемый как отношение амплитуд интенсивности флуоресценции NADH (длина волны 490 нм) к флавином (длина волны 550 нм). В соответствии с методикой [7] производился расчет параметров тканевого дыхания, а именно – сатурации венозной крови (S_vO_2), показателя шунтирования (BI), величины нутритивного кровотока (I_{mnutr}), показателя экстракции кислорода (OE) и скорости потребления кислорода (OC). Результаты экспериментальных исследований в виде измеренных и расчётных комплексных параметров МТС биотканей в двух областях (с АВА и без) до и после применения ортопедического средства представлены в таблице 1.

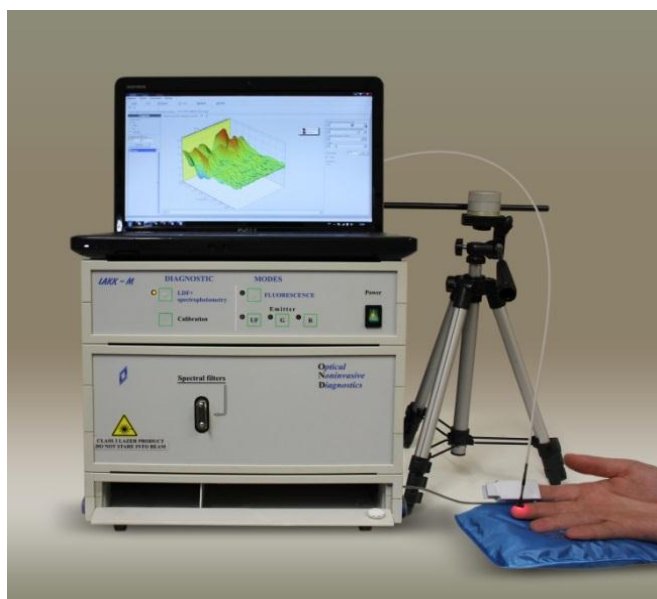


Рисунок 3 – МЛНДК “ЛАКК-М” (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва)

Анализ полученных данных показал, что после применения ортопедического средства в области с АВА наблюдается тенденция к увеличению значения общей перфузии ($6,1 \pm 2,3$ пф.ед. и $11,8 \pm 4,4$ пф.ед.), а также наблюдается уменьшение показателя шунтирования ($5,1 \pm 1,3$ отн.ед. и $3,5 \pm 0,8$ отн.ед.), уровня венозной сатурации ($67,2 \pm 1,8$ % и $66,5 \pm 4,3$ %) и увеличение нутритивного кровотока ($1,4 \pm 0,9$ пф.ед. и $3,3 \pm 0,6$ пф.ед.), что может свидетельствовать о том, что большая часть кровотока движется в нутритивном русле, минуя шунтирующие сосуды. Следовательно, увеличение кровотока в нутритивном русле приводит к увеличению скорости потребления кислорода ($53,5 \pm 51,4$ отн.ед. и $105,1 \pm 30,0$ отн.ед.). Кроме того, как видно из данных таблицы, использование ортопедического средства

приводит к изменению комплексного параметра МТС биотканей, а именно индекса относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке ($14,02 \pm 4,23$ отнд.ед. и $7,73 \pm 3,29$ отн.ед.).

Таблица 1 – Результаты экспериментов с использованием ортопедического средства в виде варежки с микрофферами

№ п/п	Параметр	С АВА (n=3)		Без АВА (n=3)	
		до	после	до	после
1	I_m , пф.ед.	$6,1 \pm 2,3$	$11,8 \pm 4,4$	$1,6 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,4$
2	$S_t O_2$, %	$75,7 \pm 0,2$	$77,0 \pm 4,1$	$75,7 \pm 1,9$	$67,0 \pm 5,7$
3	V_b , %	$9,50 \pm 1,02$	$9,57 \pm 1,05$	$8,2 \pm 0,3$	$6,0 \pm 0,2$
4	$S_a O_2$, %	$98 \pm 0,6$	$98 \pm 0,6$	$98 \pm 0,6$	$98 \pm 0,6$
5	BI , отн.ед.	$5,1 \pm 1,3$	$3,5 \pm 0,8$	$3,3 \pm 1,4$	$2,1 \pm 0,9$
6	$S_v O_2$, %	$67,2 \pm 11,8$	$66,5 \pm 4,3$	$63,6 \pm 10,6$	$53,1 \pm 13,2$
7	I_{mnutr} , пф.ед.	$1,4 \pm 0,9$	$3,3 \pm 0,6$	$0,6 \pm 0,2$	$1,7 \pm 1,0$
8	S_m , отн.ед.	$14,0 \pm 4,2$	$7,7 \pm 3,3$	$49,1 \pm 6,8$	$25,5 \pm 6,0$
9	U_1 , отн.ед.	$1,30 \pm 0,003$	$1,28 \pm 0,07$	$1,30 \pm 0,03$	$1,47 \pm 0,13$
10	U_2 , отн.ед.	$2,4 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$	$5,2 \pm 0,9$
11	RR , отн.ед.	$3,9 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,3$
12	OE , отн.ед.	$0,3 \pm 0,1$	$0,32 \pm 0,04$	$0,35 \pm 0,11$	$0,46 \pm 0,13$
13	OC , отн.ед.	$53,5 \pm 51,4$	$105,1 \pm 30,0$	$19,6 \pm 11,5$	$83,9 \pm 60,3$

Как показывают полученные данные, тенденция к изменениям параметров МТС биотканей наблюдается и для области без АВА, которые приводят к увеличению скорости потребления кислорода ($19,6 \pm 11,5$ отнд.ед. и $83,9 \pm 60,3$ отн.ед.). Данные изменения носят более выраженный характер, чем для области с АВА, что, вероятнее всего, связано с наличием у добровольца синдрома холодных рук и при проведении экспериментальных исследований следовало в этом случае увеличить длительность применения ортопедического средства.

Таким образом, исходя из проанализированных первичных данных можно сделать вывод о том, что применение ортопедического средства приводит к улучшению кровотока и тканевого дыхания в целом. Использование оптических неинвазивных методов диагностики позволяет объективно оценивать эффективность применения ортопедических средств, а также индивидуализировать оптимальное время экспозиции (время, проведенное с надетой варежкой) для обеспечения положительных результатов лечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шураева, Е.В. Ортопедическое устройство / Е.В. Шураева, Е.П. Семина // Патент №2393752 РФ на изобретение МПК А 47 G 9/10. Оpubл. 03.03.2009, Бюл. № 13.
2. Описание продукции для ортопедии фирмы «Альсария» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alsariya.com/>
3. Дунаев А.В., Иножарская О.В., Шураева Е.В. Исследование возможностей лазерной доплеровской флоуметрии для оценки эффективности применения ортопедических средств // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011. – №5 (289). – С.114-120.

4. Крупаткин А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.

5. Рогаткин Д.А. Физические основы оптической оксиметрии. Лекция // Медицинская физика. – 2012. – №2. – С. 97-114.

6. Шурыгин И.А. Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия. – СПб.: «Невский Диалект»; М.: «Издательство БИНОМ», 2000. – 301 с.

7. Крупаткин А.И. Неинвазивная оценка тканевого дыхания у человека с использованием вейвлет-анализа колебаний сатурации крови кислородом и кровотока в микрососудах кожи // Физиология человека, 2012. – Т. 38. – №4. – с. 67 – 73.

Белых Павел Михайлович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл, Россия

Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

E-mail: Belics-ru@yandex.ru

Новикова Ирина Николаевна

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл, Россия

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», инженер-исследователь научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»

E-mail: i.n_novikova@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орёл, Россия

Ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

E-mail: dunaev@bmecenter.ru