

УДК 612.135:616-072

А.И. ЖЕРЕБЦОВА
A.I. ZHEREBTSOVA

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ
И КОЖНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ОККЛЮЗИОННОЙ ПРОБЕ
THE INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES
OF CHANGES OF BLOOD MICROCIRCULATION
AND SKIN TEMPERATURE DURING THE OCCLUSIVE TEST**

В работе приведены результаты экспериментального исследования особенностей изменения микроциркуляции крови и кожной температуры на дистальных фалангах пальцев рук здоровых добровольцев. Рассмотрены некоторые параметры переходных процессов, происходящих во время проведения окклюзии плечевой артерии, а также в постокклюзионный период. Найдена корреляционная связь между параметрами микроциркуляции крови и температуры. Сделаны выводы о возможности применения полученных результатов в оценке функционального состояния микроциркуляторного русла.

Ключевые слова: микроциркуляция крови, лазерная доплеровская флоуметрия, кожная температура, окклюзионная проба.

The paper presents the results of experimental studies of change features in blood microcirculation and skin temperature at distal phalanges of fingers of healthy volunteers. It is considered some parameters of transient processes during occlusion of brachial artery, as well as in postocclusive period. It is founded a correlation between the parameters of microcirculation and temperature. There are conclusions about possibility of applying the obtained results in assessment of functional state of microvasculature.

Keywords: blood microcirculation, laser Doppler flowmetry, skin temperature, occlusive test.

Введение. Микроциркуляторное русло является одной из тех важнейших систем, в которых заболевания проявляются на ранних стадиях. Однако мониторинг микроциркуляторной функции весьма ограничен из-за небольшого числа имеющихся безопасных методов исследования и сложности интерпретации получаемых данных. Ограничения связаны с рядом требований, которым должны отвечать используемые методы: возможность и низкая стоимость массового внедрения, оперативность исследования, легкость автоматизации исследования, неинвазивность, комфорт для пациента, простота реализации при достаточной точности диагностирования. Указанным требованиям в полной мере удовлетворяет лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) – метод оптической неинвазивной диагностики, позволяющий оценивать интенсивность кровотока в микроциркуляторном звене кровеносного русла, а также обнаруживать и исследовать коллективные ритмические процессы системы микроциркуляции крови [1].

Для выявления адаптационных резервов системы микроциркуляции, оценки состояния механизмов регуляции тканевого кровотока, а также общего функционального состояния микроциркуляторного русла при ЛДФ-исследованиях применяют функциональные пробы. Одной из традиционно используемых и нашедших широкое применение на практике является окклюзионная проба (ОП), заключающаяся в создании условий искусственной ишемии тканей конечности с последующим открытием кровотока и наблюдением восстановления тонического состояния сосудов. Особенности реакции микрососудистого русла на окклюзию изучаются также с помощью метода инфракрасной термографии [2, 3].

Цель. Данная статья имеет своей целью более детальное изучение параметров переходных процессов изменения микроциркуляции крови и кожной температуры во время

проведения окклюзионной пробы, а также исследование связи между данными параметрами. Для достижения поставленной цели была проведена серия экспериментов, заключающихся в одновременной регистрации изменения показателя микроциркуляции крови (ПМ – результирующий параметр ЛДФ, измеряемый в перфузионных единицах – пф. ед.) и кожной температуры на дистальных фалангах пальцев рук условно здоровых добровольцев при проведении окклюзионной пробы.

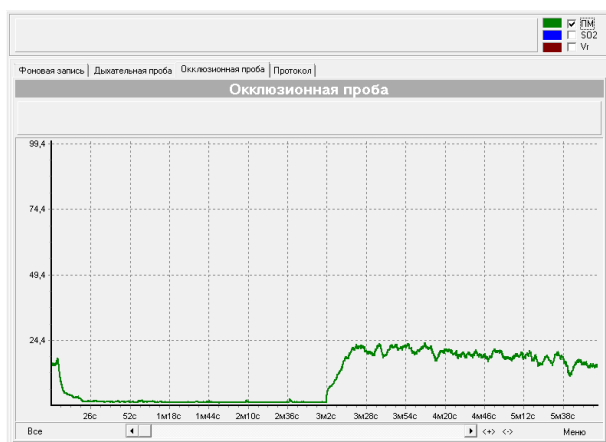
Материалы и методы. Регистрация показателя микроциркуляции велась с помощью канала ЛДФ лазерного анализатора микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК-ОП» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва). Измерения температуры осуществлялись с помощью макета канала кожной термометрии на основе платинового датчика температуры Heraeus M622 Pt 2000, включенного по четырехпроводной схеме. Всего было выполнено 18 экспериментов на 5 добровольцах.

Перед проведением исследований проводилась подготовка к работе и калибровка анализатора «ЛАКК-ОП» согласно инструкции. Испытуемый адаптировался к условиям лаборатории (нормальные комнатные условия) в течение 15-20 мин, затем садился таким образом, чтобы предплечье руки находилось на уровне сердца. На предплечье испытуемого одевалась манжета механического тонометра CS Medica CS-106. Манжета фиксировалась без пережатия кровообращения, не накачивалась. На третий палец руки устанавливался фиксатор со световодным зондом так, что палец полностью закрывал торец световодного зонда. Между первым (большим) и вторым пальцами правой руки испытуемый без приложения усилия удерживал термодатчик Heraeus M622 Pt 2000, обращенный чувствительной стороной ко второму пальцу.

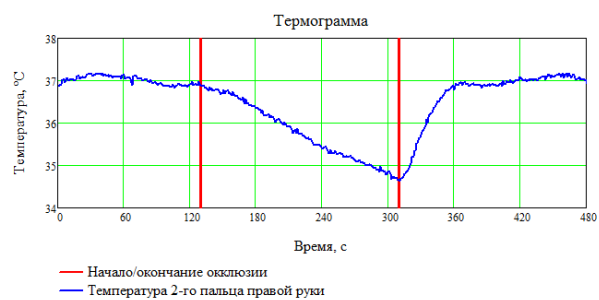
Далее исследования проводились по стандартному протоколу анализатора «ЛАКК-ОП», при этом регистрация температуры осуществлялась лишь при проведении ОП, а именно:

- в течение 2 мин производилась регистрация температуры;
- после истечения указанного времени в манжете тонометра создавалось и поддерживалось в течение 3 мин давление порядка 200 мм рт. ст., одновременно с окклюзией начиналась регистрация ПМ крови;
- по окончании окклюзии давление в манжете резко снижалось до исходного, после чего запись ПМ и температуры продолжалась еще в течение 3 мин.

Результаты. Примеры типичных ЛДФ- и термограмм представлены на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1 – Примеры типичных ЛДФ- и термограмм при проведении ОП на условно здоровых добровольцах: а) окно «Окклюзионная проба» штатного

программного обеспечения анализатора «ЛАКК-ОП»; б) термограмма, полученная с помощью канала кожной термометрии на основе платинового датчика температуры

Представленные на рисунке 1 зависимости свидетельствуют о том, что результаты, полученные при совместной регистрации сигналов ЛДФ и термометрии при ОП, носят неслучайный характер, т.е. колебания перфузии и температуры непосредственно связаны с моментами начала и окончания окклюзии.

Для количественного описания процессов, происходящих во время проведения ОП, вычислялись следующие параметры [1, 2]:

ПМ – среднее значение ПМ до окклюзии, пф. ед.;

ПМ₀ – среднее значение ПМ в процессе окклюзии («биологический ноль»), пф. ед.;

ПМ_{max} – максимальное значение ПМ после снятия окклюзии, пф. ед.;

t_{max} – время от момента снятия окклюзии до достижения ПМ_{max}, с;

РКК – резерв капиллярного кровотока, %, рассчитываемый по формуле (1):

$$РКК = \frac{ПМ_{max}}{ПМ} \cdot 100\%; \quad (1)$$

T₁ – среднее значение температуры до окклюзии, °С;

T₂ – минимальное значение температуры в процессе окклюзии, °С;

T₃ – максимальное значение температуры после снятия окклюзии, °С;

ΔT₃₁ – разность температур T₃ и T₁, °С;

V – скорость изменения температуры после снятия окклюзии, °С/с, рассчитываемая по формуле (2):

$$V = \frac{T_3 - T_2}{t}, \quad (2)$$

где t – время изменения температуры от T₂ до T₃;

τ₁ – постоянная времени охлаждения биоткани в процессе окклюзии, мин;

τ₂ – постоянная времени нагрева биоткани после снятия окклюзии, с.

На рисунке 2 представлены схемы, поясняющие алгоритм нахождения вышеперечисленных параметров.

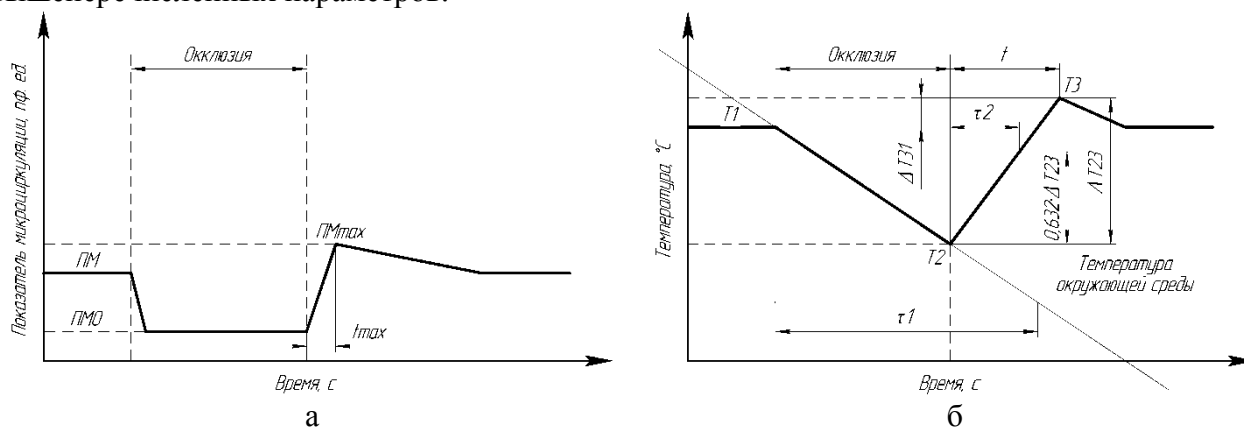


Рисунок 2 – Схемы, поясняющие алгоритм нахождения характеризующих ОП параметров: а) микроциркуляции крови; б) кожной температуры

Для вычисления постоянной времени τ_1 принималась гипотеза об экспоненциальном характере снижения температуры после начала артериальной окклюзии и полном завершении переходного процесса по достижении исследуемой областью температуры окружающей среды. Однако в реальных условиях эксперимента при 3-х минутной окклюзии наблюдать завершившийся переходной процесс нет возможности, и регистрируется лишь отрезок экспоненты. Полученный отрезок аппроксимируется прямой и принимается в дальнейшем в качестве касательной в начальной точке экспоненты. Постоянную времени τ_1 в этом случае определяли следующим образом: через точку начала окклюзии проводили прямую, параллельную оси ординат; отрезок, полученный между точками пересечения этой прямой и касательной экспоненты с прямой уровня температуры окружающей среды, численно равен постоянной времени τ_1 .

Восстановление кровотока в артерии в момент декомпрессии и последующее развитие реактивной гиперемии с максимальным заполнением кровью сосудов микроциркуляции можно представить в виде реакции системы на единичный скачок. Очевидно, что температурный отклик будет иметь характер, схожий с откликом системы микроциркуляции крови. Отсюда постоянную времени τ_2 найдем как промежуток времени, в течение которого прирост температуры в постокклюзионный период достигает 63,2% своего максимального значения.

Значения основных параметров переходных процессов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сводная таблица параметров переходных процессов, происходящих в дистальных фалангах пальцев правой руки здорового добровольца при окклюзионной пробе

№ эксперимента	Параметры ПМ крови					
	ПМ, пф.ед.	ПМ ₀ , пф. ед.	ПМ _{max} , пф.ед.	РКК, %	t_{max} , с	Тип МЦ по РКК
1	12,4	5,0	22,5	182	34	спастич.
2	19,4	3,9	22,2	115	49	гиперем.
3	21,3	2,7	20,5	96	97	гиперем.
4	22,8	6,9	28,2	123	121	норм.
5	16,3	5,7	24,6	150	64	норм.
6	22,4	5,1	21,8	97	140	гиперем.

Продолжение таблицы 1

№ эксперимента	Параметры кожной температуры							
	T_1 , °C	T_2 , °C	T_3 , °C	ΔT_{31} , °C	V , °C/с	τ_1 , мин	τ_2 , с	Тип МЦ по ΔT_{31}
1	29,8	29,3	33,2	3,4	0,04	15,1	57	спастич.
2	34,5	33,0	35,1	0,6	0,02	17,0	37	норм.
3	36,3	34,1	36,8	0,5	0,02	15,4	32	норм.
4	37,3	35,1	37,5	0,2	0,02	19,2	38	норм.
5	37,0	34,7	37,2	0,2	0,02	17,4	32	норм.
6	36,4	34,3	36,4	0,0	0,05	17,3	26	гиперем.

На основании вычисленных параметров (РКК и T_{31}) определялась одна из важных характеристик периферического кровообращения – гемодинамический тип микроциркуляции (тип МЦ). В зависимости от характера реакции капиллярного кровотока на артериальную окклюзию различные авторы выделяют от 3 до 5 и более (включая

смешанные) типов МЦ. Однако наиболее четко и наглядно проявляющими себя являются гиперемический, нормотонический и спастический типы микрогемодинамики.

При обработке экспериментальных данных ЛДФ принималось, что значение РКК менее 115 % соответствует гиперемическому типу МЦ, РКК в диапазоне 115-170 % – нормотоническому, а свыше 170 % – спастическому.

Стоит отметить, что определение типа МЦ возможно также и по результатам кожной термометрии. При этом если за время постокклюзионного периода температура достигает уровня, не превышающего средний уровень температуры предокклюзионного периода ($T_{13} \leq 0$), то судят о гиперемическом типе МЦ, если за время постокклюзионного периода температура поднимается выше среднего уровня температуры предокклюзионного периода не более чем на 2 °С ($0 < T_{13} \leq 2$), то судят о нормотоническом типе микроциркуляции, если за время постокклюзионного периода температура достигает уровня, превышающего средний уровень температуры предокклюзионного периода более чем на 2 °С ($T_{13} > 2$), то судят о спастическом типе микроциркуляции [4].

Обсуждение.

Изменение параметров, описывающих переходные процессы при проведении ОП, может служить индикатором различных патологических состояний микроциркуляторного русла. Значения ПМ и ПМ_{max} позволяют вычислить резерв капиллярного кровотока – параметр, характеризующий адаптационные резервы системы микроциркуляции и лежащий в основе определения типа МЦ. Увеличение РКК может наблюдаться при увеличении притока крови в микроциркуляторное русло, при явлениях стаза и застоя крови в венулах, уменьшение – при наличии спазмов приносящих микрососудов. Однако пока нет единого мнения о значении РКК в норме у здоровых людей, в разных литературных источниках можно встретить значения от 80-150 % [5] до 200-300 % [6]. Поэтому имеются предпосылки для дальнейшего изучения данного параметра и исследования его изменений при различного рода патологических состояниях.

ПМ₀ («биологический ноль») характеризует броуновское движение остаточной крови при окклюзии [1]. Повышение ПМ₀ может свидетельствовать о стазических явлениях крови в микроциркуляторном русле. Опыт проведения подобных экспериментов позволяет утверждать, что правильное определение данного параметра зависит от создания заведомо избыточного давления в окклюзионной манжете и поддержания заданного уровня давления на протяжении всего периода компрессии.

Показатель t_{max} характеризует реактивность сосудов микроциркуляторного русла и определяется количеством сосудистых блоков и степенью ишемии исследуемого участка тела. В норме t_{max} составляет 10-20 с [6], однако в проведенных экспериментах его значение вошло в границы нормы лишь в одном единственном случае. Теоретически можно допустить, что остальные условно здоровые добровольцы имеют сосудистые нарушения, но данному факту есть другое объяснение, связанное с особенностями приборной реализации ЛДФ. Суть в том, что при определении параметра t_{max} могут возникнуть ошибки, связанные с чрезвычайной чувствительностью приборов ЛДФ к артефактам движения. Резкое снижение давления в окклюзионной манжете зачастую сопровождается произвольным движением испытуемого, которое фиксируется на ЛДФ-грамме в виде пика большой амплитуды. Используемый в работе анализатор «ЛАКК-ОП» имеет пальцевый фиксатор, что значительно снижает чувствительность прибора к артефактам подобного рода. По всей видимости, это привело к значительному рассогласованию установленной в [6] нормы с полученными экспериментальными данными.

Параметр T_{31} лежит в основе определения типа МЦ по реакции кожной температуры на артериальную окклюзию. Как видно из таблицы, 1 данные о типе МЦ совпадают более чем в 60% экспериментов. Расхождения связаны, в основном, с определением гиперемического и нормотонического типов, что служит основанием для проведения дополнительных исследований с целью пересмотра границы между ними.

Скорость нарастания температуры V в постокклюзионный период может служить индикатором наличия сосудистых патологий, связанных со снижением эндотелий зависимой дилатации [2]. Другим объяснением подобной реакции является уменьшение теплопроводности кожных покровов, которое может быть следствием гиперкератоза (сопровождающего, в том числе, и некоторые сосудистые заболевания, например, вибрационную болезнь). Однако, в отличие от ПМ, после декомпрессии манжеты резкого скачка температуры не наблюдается и, как правило, функция изменения температуры в течение 3-х минутного постокклюзионного периода не является линейной, что при обработке результатов эксперимента приведет к заведомо неверному нахождению параметра V . В таких случаях целесообразно пользоваться постоянной времени τ_2 , которая характеризует тенденцию восстановления температуры и позволяет более точно описывать переходной процесс.

Подобный физический смысл несет и постоянная времени τ_1 . В отсутствие возможности наблюдения завершившегося переходного процесса, τ_1 описывает тенденцию снижения температуры во время артериальной окклюзии конечности. При этом необходимо отметить, что совокупности параметров τ_1 и τ_2 в рамках одной серии экспериментов (№ 1-6 и № 7-12) имеют меньший коэффициент вариации (отношение СКО к среднему арифметическому), чем совокупность параметра V . Полученные значения коэффициента вариации τ_1 и τ_2 позволяют судить о том, что совокупности данных параметров являются однородными.

В процессе обработки полученных экспериментальных данных была обнаружена корреляция между параметрами ПМ и τ_2 . Так, к примеру, для правой руки испытуемого №1 коэффициент корреляции составил -0,76. Т.е. чем выше перфузия до окклюзии, тем быстрее восстанавливается температура после снятия окклюзии. Корреляция была обнаружена также между параметрами ПМ_{max} и τ_1 . Для правой руки испытуемого №1 коэффициент корреляции составил 0,82. Т.е. чем медленнее падает температура, тем выше уровень перфузии ткани кровью после снятия окклюзии. Полученные данные закладывают предпосылки для дальнейшего изучения взаимозависимостей параметров микроциркуляции крови и кожной температуры при функциональных пробах.

Выводы. В результате исследования зарегистрирована реакция микроциркуляции крови и кожной температуры области дистальных фаланг пальцев на окклюзию плечевой артерии для группы условно здоровых добровольцев. Проведено количественное описание и физиологическая интерпретация переходных процессов, имеющих место при окклюзионной пробе. Сформулированы выводы о возможностях применения вычисленных параметров в оценке функционального состояния микроциркуляторного русла. Выявлены корреляции между параметрами микроциркуляции крови и кожной температуры, которые могут быть использованы при математическом моделировании теплопередачи при окклюзионной пробе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность [Текст]: руководство для врачей / Крупаткин А.И., Сидоров В.В. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.: ил. – ISBN 978-5-397-03943-7

2. Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу [Текст] / Д.А. Усанов [и др.] // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2009. – Т.5. – № 4. – С. 554-558.

3. Дунаев, А.В. Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектрофотометрии в функциональной диагностике [Текст] / А.В. Дунаев, А.И. Егорова, Е.А. Жеребцов, Д.С. Макаров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6-2 (284). – С. 95-101.

4. Способ диагностики функционального состояния периферических сосудов [Текст]: пат. 2405416 Рос. Федерация: МПК А 61 В 5/01/ Усанов Д.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского». – № 2009117567/14, заявл. 12.05.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 34. – 8 с: ил.

5. Козлов, В.И. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови [Текст]: методическое пособие для врачей / В.И. Козлов, Г.А. Азизов, О.А. Гурова, Ф.Б. Литвин. – М.: Российский университет дружбы народов, ГНЦ лазерной медицины, 2012. – 32 с.: ил.

6. Применение лазерной доплеровской флоуметрии. у больных кардиологического профиля [Текст] / А.А. Федорович [и др.] // Материалы IV Всероссийского симпозиума «Применение лазерной доплеровской флоуметрии в медицинской практике». – 2007. – С. 159-169.

Жеребцова Ангелина Ивановна

ФГБОУ ВПО "Государственный университет – УНПК", г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел.: +79534713639

E-mail: angelok1100@rambler.ru