

А. В. Станкевич, А. А. Ахапкина, И. А. Тихомирова

### Функциональные пробы в оценке резервных возможностей кровотока у спортсменов

В исследовании выполнена оценка информативности дыхательной и окклюзионной функциональных проб при изучении параметров и резервных возможностей микроциркуляторного русла у спортсменов методом лазерной доплеровской флоуметрии.

Ключевые слова: микроциркуляция, лазерная доплеровская флоуметрия, функциональные пробы, резервные возможности.

A. V. Stankevich, A. A. Akhapkina, I. A. Tikhomirova

### Functional tests in evaluation of spare capacity of athletes' blood flow

The information value of respiratory and occlusive functional tests was evaluated in the study of parameters and spare capacity of the microcirculatory bed in athletes by means of the Laser Doppler flowmetry method.

**Keywords:** microcirculation, the Laser Doppler flowmetry, functional tests, spare capacity.

Системе микроциркуляции принадлежит важная роль в процессе кислородного снабжения тканей, а также обеспечения необходимой теплоотдачи. При использовании метода лазерной доплеровской флоуметрии в исследовании системы гемомикроциркуляции кожи и выявления адаптационных резервов системы микроциркуляции, оценки состояния механизмов регуляции тканевого кровотока, а также общего функционального состояния микроциркуляторного русла применяют функциональные пробы [2]. Роль звена микроциркуляции и изменения его физиологических параметров при физических нагрузках изучены недостаточно. Известно, что вся деятельность кардиореспираторной системы направлена на обеспечение эффективности транскапиллярного обмена, что позволяет судить о лимитирующем значении адаптационных перестроек, охватывающих непосредственно микроциркуляторный уровень. [1, 5]

**Целью** нашего исследования являлась оценка информативности функциональных проб при исследовании адаптационных изменений параметров микроциркуляции у лиц, регулярно занимающихся физическими нагрузками.

#### Материалы и методы.

В исследование после получения добровольного информированного согласия были включены практически здоровые лица обоего пола, регулярно занимающиеся физическими нагрузками ( $n=23$ ), средний возраст которых составил  $20,3 \pm 3,2$  лет.

Оценку состояния микроциркуляции проводили методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью лазерного анализатора ЛАКК-02 (НПП «ЛАЗМА», Москва). Световодный зонд устанавливали в зоне Захарьина – Геда на подушечке II пальца. Оценивали уровень перфузии (ПМ), среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ), коэффициент вариации  $K_v$  и амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала. Расчетные параметры  $M$  (среднеарифметическое значение ПМ),  $\sigma$  и  $K_v$  дают общую оценку состояния микроциркуляции крови. По величинам амплитуд колебаний микрокровотока в конкретных частотных диапазонах возможно оценивать состояние функционирования определенных механизмов контроля перфузии [2]. Среди звеньев регуляции микрокровотока выделяют «пассивные» и «активные» механизмы, которые в полосе частот от 0,005 до 3 Гц формируют пять неперекрывающихся частотных диапазонов: 0,007–0,017 Гц – диапазон эндотелиальной активности; 0,023–0,046 Гц – диапазон нейрогенной (симпатической адренергической) активности; 0,05–0,145 Гц – диапазон миогенной (гладкомышечной) активности; 0,2–0,4 Гц – диапазон респираторного ритма; 0,8–1,6 Гц – диапазон кардиального ритма [2]. Регистрируемый в ЛДФ-грамме колебательный процесс является результатом наложения колебаний, обусловленных функционированием «активных» и «пассивных» механизмов [6].

С помощью вейвлет-анализа амплитудно-частотного спектра осцилляций микрокровотока оценивали функционирование активных (эндотелиальных, нейрогенных и миогенных) и пассивных (кардиальных и респираторных) факторов регуляции микроциркуляции в исходном состоянии [6]. С целью исследования резервных возможностей микрокровотока использовали окклюзионную и дыхательную пробы.

Окклюзионную пробу проводили путем пережатия плечевой артерии тонометром на две минуты с поддержанием давления в манжете 200 мм рт. ст. таким образом, чтобы вызвать остановку кровотока в исследуемой области. После декомпрессии происходит восстановление кровоснабжения и максимальное наполнение кровью капилляров. Проведение окклюзионной пробы позволяет изучить резервные возможности капилляров во время постокклюзионной гиперемии, а также показатель микроциркуляции во время артериального притока.

При проведении этой пробы фиксировали следующие показатели:  $M_{исх}$  – среднее значение показателя микроциркуляции (пф. ед) до окклюзии;  $M_{мин}$  – показатель микроциркуляции (минимальный) во время окклюзии;  $ПФ_{макс}$  – максимальное значение перфузии в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии; РКК – резерв кровотока, рассчитывали как  $(ПФ_{макс}/M_{исх}) \cdot 100\%$ .

При проведении дыхательной пробы регистрировали фоновую величину перфузии, а затем реакцию микрокровотока на задержку дыхания в течение 20 секунд на высоте глубокого резкого вдоха.

При проведении дыхательной пробы регистрировали следующие показатели:  $M_{исх}$  – исходная величина ПМ;  $ПФ_{мин}$  – минимальное значение ПМ при дыхательной пробе; РКК – резерв кровотока.

Для определения уровня физической работоспособности применяли велоэргометрический тест (Велоэргометр Kettler, X3) со ступенчато возрастающей нагрузкой 25 Вт, на основании результатов которого рассчитывали относительные и абсолютные показатели уровня физической работоспособности  $PWC_{170}$  и величину максимального потребления кислорода (МПК).

Физическая работоспособность в пробе  $PWC_{170}$  выражается в величинах той мощности физической нагрузки, при которой ЧСС достигает величины 170 уд/мин. Выбор именно этого значения ЧСС основан на следующих двух положениях. Первое положение заключается в том, что зона адекватного функционирования кардиореспираторной системы с физиологической точки зрения

ограничивается диапазоном изменения ЧСС от 100–110 до 170–180 уд/мин. Следовательно, с помощью этой пробы можно установить ту интенсивность физической нагрузки, которая «выводит» деятельность сердечно-сосудистой системы, а вместе с ней и всей кардиореспираторной системы, в область оптимального функционирования. Второе положение базируется на том, что взаимосвязь между ЧСС и мощностью выполняемой физической нагрузки имеет линейный характер у большинства здоровых людей вплоть до ЧСС, равной 170 уд/мин. При более высокой ЧСС линейный характер зависимости между ЧСС и мощностью физической нагрузки нарушается.

В начале исследования участникам предлагалось пройти ступенчатый тест  $PWC_{170}$ . Тест выполняли с предварительной физической разминкой на протяжении трех минут при пульсе, не превышающем 100 уд/мин и заданной мощности сопротивления 25 Вт. После восстановления ЧСС < 80 уд/мин, начинали проведение ступенчатого теста.

Начиная с сопротивления 50 Вт, прибавляли 25 Вт каждые три минуты, ЧСС фиксировали с помощью пульсометра Polar. Тест прерывали по достижению ЧСС=170 уд/мин, при этом фиксировалась окончательная мощность сопротивления, и высчитывался показатель  $PWC_{170}$  по формуле:

$$PWC_{170} = N1 + (N2 - N1) \cdot ((170 - f1) / (f2 - f1))$$

где: N1 – мощность первой нагрузки, N2 – мощность второй нагрузки, f1 – ЧСС в конце первой нагрузки, f2 – ЧСС в конце второй нагрузки.

Показатель МПК рассчитывали по формуле:

$$МПК = (1,7 \cdot PWC_{170} + 1240) / 1000$$

Статистическую обработку результатов проводили с использованием параметрических критериев после проверки выборки на соответствие нормальному распределению.

#### Результаты и обсуждение.

Большинство испытуемых, участвовавших в исследовании, не менее пяти лет занимались физическими нагрузками и имели спортивные разряды не ниже первого по различным видам спорта (легкая атлетика, полиатлон, велоспорт, самбо, настольный теннис).

Анализ результатов дыхательной пробы выявил различия в реактивности кожного кровотока на задержку дыхания. При быстром и глубоком вдохе запускается вазомоторный рефлекс, который вызывает констрикцию артериол и кратковременное уменьшение кожного кровотока у большинства людей [2]. При записи ЛДФ-грамм в ходе реализации дыхательной пробы в нашем исследовании было выявлено, что неко-

торые испытуемые из общей группы имеют нестандартную реакцию микроциркуляторного русла на задержку дыхания. У этих лиц (n=5) наблюдалось повышение перфузии во время 20-ти секундной задержки дыхания, тогда как у большинства испытуемых (n=18) было зафик-

сировано снижение перфузии. По этому признаку все испытуемые были разделены на две группы: группа 1 (n=18) и группа 2 (n=5).

Анализ показателей физической работоспособности (PWC 170 и МПК) не выявил достоверных различий между группами (табл. 1).

**Таблица 1. Показатели физической работоспособности и максимального потребления кислорода**

Показатель	Группа 1 (n=18)	Группа 2 (n=5)	Разница, %	p
PWC170 (кг·м/мин·кг)	20,6±4,3	17,2 ±4,3	-16,4	0,067
МПК(мл/кг·мин)	53,9±8,1	51,8±8,0	-7,08	0,18

МПК – наибольшее количество кислорода, которое организм в состоянии потреблять во время интенсивной мышечной работы. Эта величина является показателем аэробной производительности. Величина МПК зависит от взаимодействия многих систем организма и в первую очередь от систем дыхания, кровообращения и движения. Поэтому МПК является наиболее интегральным показателем, характеризующим способность организма при максимальном напряжении удовлетворять потребность тканей в кислороде, и выступает в качестве одного из наиболее важных количественных показателей здоровья [8].

Между группами обследуемых лиц не было выявлено и достоверных различий в показателях базального микрокровотока и механизмов его регуляции (табл.2).

Несмотря на то, что показатели достоверно не отличались, была отмечена выраженная тенденция к более высокому уровню перфузии у первой группы: показатель М был на 26,8 % выше, а вариабельность кровотока на 29,3 % ниже, чем у лиц второй группы. При оценке вклада активных и пассивных механизмов регуляции микрокровотока, не было выявлено достоверных различий между группами обследуемых. Однако для пульсовой волны отмечена выраженная тенденция к более высоким значениям в группе один как максимальной амплитуды (на 39,5 %), так и нормированной (на 21,8 %) и приведенной амплитуд (на 30,8 %) в сравнении с аналогичными показателями группы два.

**Таблица 2. Показатели микроциркуляции и механизмов ее регуляции**

Показатели	Группа 1 (n=18)	Группа 2 (n=5)	Разница, %	P
M (пф.ед)	15,7±5,5	11,5±3,4	-26,8	0,062
σ	1,99±0,86	2,07±1,14	4,14	0,431
Kv	15,1±8,7	19,5±11,5	29,3	0,179
<i>Эндотелиальные ритмы</i>				
Amax	1,07±0,53	1,1±0,5	3,07	0,451
Amax/3s·100%	17,6±6,1	18,1±5,3	2,73	0,437
Amax/M·100%	8,09±5,76	8,59±5,54	6,25	0,431
<i>Нейрогенные ритмы</i>				
Amax	0,949±0,376	1,01±0,34	6,17	0,378
Amax/3s·100%	16,3±5,6	17,7±6,5	8,66	0,318
Amax/M·100%	7,23±4,81	7,66±3,88	5,93	0,428
<i>Миогенные ритмы</i>				
Amax	0,678±0,226	0,792±0,252	16,8	0,170
Amax/3s·100%	12,0±4,6	14,7±7,0	22,3	0,159
Amax/M·100%	5,08±2,85	5,49±1,24	8,09	0,380
<i>Дыхательные ритмы</i>				
Amax	0,261±0,131	0,296±0,225	13,6	0,326
Amax/3s·100%	5,01±4,05	5,86±5,17	16,9	0,350
Amax/M·100%	1,72±0,74	1,85±0,76	7,69	0,364
<i>Сердечные ритмы</i>				
Amax	0,278±0,248	0,168±0,045	-39,5	0,172
Amax/3s·100%	3,88±1,99	3,04±1,16	-21,8	0,189
Amax/M·100%	1,73±1,22	1,19±0,42	-30,8	0,177

Достоверные различия между двумя группами выявлены при проведении функциональных проб (табл.3): при проведении окклюзионной пробы исходный уровень перфузии в первой группе был выше на 55,8 % ( $p < 0,05$ ), показатель ПФ<sub>макс</sub> на 26,7 % ( $p < 0,05$ ) превышал аналогичный показатель во второй группе. Резервные возможности микрокровотока во второй группе были на 77,9 % выше, чем в первой ( $p < 0,05$ ).

При дыхательной пробе более высокий исходный уровень перфузии также был зафиксирован в первой группе – на 39,9 % выше по сравнению со второй. Величина ДПМ, характеризующая состояние вегетативной регуляции, в первой группе на 42,7 % ( $p < 0,05$ ) превышала этот показатель во второй группе.

Таблица 3. Показатели микроциркуляции при функциональных пробах

Окклюзионная проба	Группа 1 (n=18)	Группа 2 (n=5)	Разница, %	P
M <sub>исх</sub>	14,6±5,7	6,46±4,72**	-55,8	0,005
M <sub>мин</sub>	1,23±0,71	0,954±0,322	-22,4	0,212
ПФ <sub>макс</sub>	21,7±5,3	15,9±4,0*	-26,7	0,019
M <sub>восст</sub>	15,7±5,00	10,4±5,0*	-33,7	0,027
РКК	172±104	306±110*	77,9	0,011
<b>Дыхательная проба</b>				
M <sub>исх</sub>	14,9±6,0	9,0±5,8*	-39,4	0,032
ПФ <sub>реакт</sub>	7,68±4,35	6,82±6,13	-11,2	0,361
M <sub>восст</sub>	14,9±5,3	9,27±4,87*	-37,6	0,024
РКК	50,4±13,9	74,5±30,5	47,9	0,423
ДПМ	49,6±13,9	28,4±27,5*	-42,7	0,012

Запускаемый при глубоком вдохе вазомоторный рефлекс имеет сложную природу и механизмы его до конца не изучены. Высказывались мнения, что рефлекс не связан с гипотензией на вдохе и с вовлечением барорефлекторной цепи каротидного синуса. Предполагалось, что это чисто спинальный рефлекс, а афферентные волокна входят в спинной мозг преимущественно в зоне верхнегрудных сегментов. Но полностью детали афферентных и эфферентных путей рефлекса неясны до сих пор [2].

Различная реакция системы микроциркуляции спортсменов, сравнимых по возрасту, физической работоспособности и показателям базального микрокровотока, на дыхательную пробу продемонстрировала информативность этого функционального теста в оценке адаптационных резервных возможностей микрокровотока в ответ на кратковременную гипоксию.

Физиологическая роль компрессионной пробы проявляется в прекращении поступления крови в плечевую артерию и соответственно в изменении кровенаполнения в тканях [2]. Изменение кровенаполнения от его минимальных значений во время компрессии до максимальных во время

реактивной гиперемии характеризует весь диапазон возможностей изменения кровенаполнения.

Согласно экспериментальным исследованиям, постокклюзионная реактивная гиперемия является нейрогенной реакцией, реализующейся преимущественно через высвобождение кокальцигенина и нейронального оксида азота, секретируемых афферентными ноцицептивными С-волокнами. Эти факторы индуцируют синтез NO эндотелием, который, в свою очередь, воздействуя на гладкую мускулатуру сосудов, вызывает вазодилатацию [2].

Таким образом, существенные различия в характеристиках РКК, зафиксированные при окклюзионной пробе в обследуемых группах, свидетельствуют в пользу того, что применение функциональных проб позволяет выявить адаптационные механизмы микроциркуляции, обеспечивающие поддержание кровоснабжения регионов в разных условиях. Включение в систему тестирования физической работоспособности методов оценки параметров микроциркуляции в сочетании с функциональными пробами позволит получить информацию об адаптации микроциркуляторного русла к физическим нагрузкам.

### Библиографический список

1. Ахапкина, А. А. Изменение макро- и микроциркуляция под влиянием дозированных мышечных нагрузок [текст] / А. А. Ахапкина, П. В. Михайлов, А. А. Муравьев, А. А. Овцынова, П. Ю. Буланов // Ярославский педагогический вестник. Том III (Естественные науки). – 2013. – № 1. – С.86–91.
2. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови [Текст]: руководство для врачей / под ред. А. И. Крупаткина, В. В. Сидорова. – М. : Медицина. – 2005. – 256 с.
3. Сидоров, В. В. Физические основы метода лазерной доплеровской флоуметрии и его применение в неврологической практике [Текст] / В. В. Сидоров [и др.] // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – № 12. – С. 26–35.
4. Сидоров, В. В., Сахно, Ю. Ф. Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии для оценки состояния микроциркуляции крови [Текст] / В. В. Сидоров, Ю. Ф. Сахно // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2003. – № 2. – С. 122–127.
5. Сиротин, Б. З., Жмеренецкий, К. В. Микроциркуляция при сердечно сосудистых заболеваниях [Текст] / Б. З. Сиротин, К. В. Жмеренецкий. – Хабаровск : ДВГМУ. – 2008. – 156 с.
6. Терехин, С. С. Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке половых отличий и возрастных изменений гемомикроциркуляции [Текст] / С. С. Терехин, А. В. Станкевич, И. А. Тихомирова, А. В. Муравьев // Ярославский педагогический вестник. Том III (Естественные науки). – 2013. – № 1. – С.100–106.
7. Тверитина, Е. С., Федорова, М. З. Реактивность микрососудов кожи у юношей и девушек с разным тонусом вегетативной нервной системы [Текст] / Е. С. Тверитина, М. З. Федорова // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2012. – Т. 11. – № 1 (41). – С. 45–51.
8. Уилмор, Дж. Х., Костилл, Д. Л. Физиология спорта [Текст] / Дж. Х. Уилмор, Д. Л. Костилл. – Киев : Олимпийская литература, 1997. – 504 с.

### Bibliograficheskiy spisok

1. Ahapkina, A. A. Izmenenie makro- i mikroциркуляcii pod vlijaniem dozirovannyh myshechnyh nagruzok [tekst] / A. A. Ahapkina, P. V. Mihajlov, A. A. Murav'jov, A. A. Ovcynova, P. Ju. Bulanov // Jaroslavskij pedagogicheskij vestnik. Tom III (Estestvennye nauki). – 2013. – № 1. – С.86–91.
2. Lazernaja doplerovskaja fluometrija mikroциркуляcii krvi [Tekst]: rukovodstvo dlja vrachej / pod red. A. I. Krupatkina, V. V. Sidorova. – M. : Medicina. – 2005. – 256 s.
3. Sidorov, V. V. Fizicheskie osnovy metoda lazernoj doplerovskoj floumetrii i ego primenenie v nevrologicheskoj praktike [Tekst] / V. V. Sidorov [i dr.] // Biomedicinskie tehnologii i radiojelektronika. – 2003. – № 12. – S. 26–35.
4. Sidorov, V. V., Sahnno, Ju. F. Vozmozhnosti metoda lazernoj doplerovskoj floumetrii dlja ocenki sostojanija mikroциркуляcii krvi [Tekst] / V. V. Sidorov, Ju. F. Sahnno // Ul'trazvukovaja i funkcional'naja diagnostika. – 2003. – № 2. – S. 122–127.
5. Sirotin, B. Z., Zhmereneckij, K. V. Mikroциркуляcija pri serdečno sosudistyh zabolevanijah [Tekst] / B. Z. Sirotin, K. V. Zhmereneckij. – Habarovsk : DVGMU. – 2008. – 156 s.
6. Terehin, S. S. Vozmozhnosti metoda lazernoj doplerovskoj floumetrii v ocenke polovyh otlichij i vozrastnyh izmenenij gemomicroциркуляcii [Tekst] / S. S. Terehin, A. V. Stankevich, I. A. Tihomirova, A. V. Murav'jov // Jaroslavskij pedagogicheskij vestnik. Tom III (Estestvennye nauki). – 2013. – № 1. – С.100–106.
7. Tveritina, E. S., Fedorova, M. Z. Reaktivnost' mikroциркуляcii kozhi u junoshej i devushek s raznym tonusom vegetativnoj nervnoj sistemy [Tekst] / E. S. Tveritina, M. Z. Fedorova // Regionarnoe krovoobrashhenie i mikroциркуляcija. – 2012. – Т. 11. – № 1 (41). – S. 45–51.
8. Uilmor, Dzh. H., Kostill, D. L. Fiziologija sporta [Tekst] / Dzh. H. Uilmor, D. L. Kostill. – Kiev : Olimpijskaja literatura, 1997. – 504 s.