

Информативность метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке физической работоспособности

Ольга Александровна Овчинникова

Ярославский государственный педагогический университет имени К.Д. Ушинского, Ярославль, Россия

Аннотация. У здоровых добровольцев производили оценку физической работоспособности по тестам PWC₁₇₀, максимального потребления кислорода и состояния микроциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью компьютеризованного анализатора ЛАКК-02. Показатели работоспособности соответствовали нормам возрастной группы, при этом были выявлены значимые корреляционные связи с показателями, полученными при проведении ЛДФ, что подтверждает информативность метода.

Ключевые слова: лазерная Допплеровская флоуметрия, микроциркуляция, работоспособность, максимальное потребление кислорода

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2024-21-2-63-67>

Informativeness of the LDF method in assessing physical performance

Olga A. Ovchinnikova

Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia

Abstract. In healthy volunteers, physical performance was assessed according to PWC₁₇₀ tests, maximum oxygen consumption and microcirculation status by laser Doppler flowmetry (LDF) using a computerized LAKK-02 analyzer. The performance indicators corresponded to the norms of the age group, while significant correlations were revealed with the indicators obtained during the LDF, which confirms the informativeness of the method.

Keywords: laser Doppler flowmetry, microcirculation, efficiency, maximum oxygen consumption

В настоящее время все чаще поднимается проблема физической активности населения. Обеспечение эффективности функционирования организма в значительной мере определяется оптимальной работой сердечно-сосудистой и дыхательной систем, что обуславливает актуальность проблемы циркуляторного обеспечения транспорта кислорода для современной физиологии и медицины.

Сердечно-сосудистая и дыхательная системы являются ведущими звеньями в формировании реакции организма на воздействие различных факторов. Степень жизнедеятельности человека, или уровень его соматического (физического) здоровья, определяется в наибольшей степени развитием качества общей выносливости. Его физиологической основой являются аэробные возможности человека, отражающие способности организма доставлять и использовать кислород для энергопродукции при физической работе. Низкий уровень функционального резерва кардиореспираторной системы существенно снижает физическую и психическую работоспособность человека, вследствие чего возникают различные нарушения здоровья и сни-

жение жизненного тонуса, появляется неустойчивость к стрессам, снижается устойчивость организма к вредно действующим факторам, из-за чего появляется склонность к заболеваниям [1].

Каждое звено кардиореспираторной системы реальных условиях кровообращения является главным лимитирующим звеном при интенсивной мышечной работе. Напротив, дыхательный аппарат человека обладает «избыточным» резервом, который не используется даже при максимальной физической нагрузке, даже при самой тяжелой работе минутный объем дыхания очень редко доходит до уровня максимальной вентиляции легких. Учитывая, что сердечно-сосудистая система является одной из наиболее важных систем жизнеобеспечения организма и удобным объектом для врачебных наблюдений, она часто рассматривается как индикатор функционального состояния целостного организма [2].

Физическая работоспособность является интегративным выражением возможностей человека, входит в понятие его здоровья и характеризуется рядом объективных факторов. К ним относятся: телосложение

и антропометрические показатели, мощность, емкость и эффективность механизмов энергопродукции анаэробным и аэробным путем, сила и выносливость мышц, нейроэндокринная регуляция и психическое состояние [3]. Физическая работоспособность прямо пропорциональна количеству внешней механической работы, выполняемой с высокой интенсивностью.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценка физической работоспособности по тестам PWC_{170} , максимального потребления кислорода и состояния микроциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью компьютеризованного анализатора ЛАКК-02.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании приняли участие практически здоровые добровольцы, лица обоего пола, давшие добровольное согласие на проведение наблюдений за изменением параметров кровообращения при мышечной нагрузке, 12 женщин, ($24,3 \pm 5,1$) года, и 11 мужчин, ($22,3 \pm 2,9$) года.

Измерение артериального давления производили общеизвестным методом при помощи полуавтоматического тонометра (Microlife DP-50, Switzerland) для регистрации систолического (P_c) и диастолического (P_d) давления и частоты сердечных сокращений. Определение жизненной емкости легких (ЖЕЛ) осуществлялось с помощью устройства – спиротест УСПЦ-01 (МИТК-М, Россия). Для определения функциональных возможностей аппарата внешнего дыхания рассчитывали жизненный индекс (ЖИ) как отношение ЖЕЛ к массе тела. Измерение артериального давления производили общеизвестным методом при помощи полуавтоматического тонометра (Microlife DP-50, Switzerland) для регистрации систолического (P_c) и диастолического (P_d) давления и частоты сердечных сокращений.

В качестве дозированной мышечной нагрузки использовали велоэргометрический тест PWC_{170} (велоэргометр Kettler, модель 7685-000, Germany), на основании результатов рассчитывали относительные и абсолютные показатели уровня физической работоспособности $PWC_{170\text{абс}}$ и величину максимально потребления кислорода (Карпман В.Л., Белоцерковский З.Б. и др., 1988). Для увеличения объективности в оценке мощности выполненной работы при ЧСС, равной 170 уд./мин, следует исключить влияние весового показателя, что возможно путем определения относительного значения $PWC_{170\text{отн}} = PWC_{170\text{абс}}/m_{\text{тела}}$.

Показатель максимально потребления кислорода производился по формуле $MПК_{\text{абс}} = 2,2 PWC_{170} + 1070$, так же рассчитывали $MПК_{\text{отн}} = MПК_{\text{абс}}/m_{\text{тела}}$.

Оценку состояния микроциркуляции производили методом лазерной доплеровской флоуметрии

(ЛДФ) с помощью компьютеризованного анализатора ЛАКК-02 исполнение 4 (НПП «Лазма», Москва). Данный прибор сочетает две диагностические технологии – метод лазерной доплеровской флоуметрии и метод оптической тканевой оксиметрии, с помощью которых одновременно неинвазивно контролируются три параметра микроциркуляции крови: изменение перфузии ткани кровью (параметр ПМ), динамика изменения средней относительной кислородной сатурации крови (параметр SO_2) и показатель фракционного объемного кровенаполнения ткани в зоне измерения (параметр Vr) [4].

Тестировали кожу ладонной поверхности концевой фаланги II пальца кисти в течение 8 минут. Оценивали уровень перфузии (ПМ), среднее квадратичное отклонение (σ), коэффициент вариации K_v и амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала. 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 [4, 5, 6]. Регистрируемый в ЛДФ-грамме колебательный процесс является результатом наложения колебаний, обусловленных функционированием «активных» и «пассивных» механизмов.

Амплитудно-частотный спектр колебаний рассчитывали с помощью вейвлет-преобразования и оценивали вклад эндотелиальных (Э), нейрогенных (Н) и миогенных (М) компонентов тонуса микрососудов, а также дыхательных (Д) и сердечных (С) ритмов. Рассчитывали миогенный и нейрогенный тонус микрососудов и показатель шунтирования.

Ввиду разброса результатов измерений амплитуд колебаний осуществлять диагностику работы того или иного механизма регуляции только по величинам амплитуд затруднительно. Поэтому кроме A_{max} анализировали функциональный вклад каждого звена в модуляцию микрокровотока – $(A_{\text{max}}/3\sigma) \times 100\%$ и вклад в общий уровень тканевой перфузии – $(A/\text{ПМ}) \times 100\%$. Данные нормированные параметры рассчитывались в автоматическом режиме после определения значения A_{max} в соответствующем частотном диапазоне [5].

Используя спектрофотометрический канал прибора ЛАКК-02, из полученных данных рассчитывали:

1) индекс перфузионной сатурации кислорода в крови:

$$S_m = SO_2 / \text{ПМ},$$

где ПМ – средняя перфузия;

2) параметр удельного потребления кислорода тканями:

$$U = (100 - SO_2) / V_r$$

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием параметрических критериев (в случае нормального распределения); при отклонении распределения от нормального применяли непараметрические критерии, тесноту связей между переменными оценивали по коэффициентам ранговой корреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность функционирования организма в значительной мере определяется оптимальной работой кардиореспираторной системы, что обуславливает актуальность проблемы циркуляторного обеспечения транспорта кислорода для современной физиологии и медицины.

При сравнении показателей кардиореспираторной системы выявлено, что достоверно более высокое систолическое и пульсовое давление у мужчин на 16 и на 40 % соответственно ($p < 0,001$), по сравнению с женщинами. Поскольку давление в артериальной части кругов кровообращения является пульсирующим в соответствии с фазами работы сердца, для его гемодинамической характеристики принято использовать величину среднего давления, которая у мужчин была достоверно выше на 8 % ($p < 0,05$) по сравнению с женщинами.

У мужчин выявлены достоверно более высокие значения показателей абсолютной физической работоспособности ($PWC_{170\text{абс.}}$) на 29 % ($p < 0,01$), абсолютного значения максимального потребления кислорода (МПК) на 24 % ($p < 0,01$), жизненной емкости легких на 28 % ($p < 0,001$) по сравнению с женщинами. Относительные значения МПК и PWC_{170} не имели значимых отличий в группах сравнения.

Физическая работоспособность в тесте PWC_{170} выражается величиной мощности нагрузки, которую испытуемый может выдержать при частоте сердечных сокращений (ЧСС), равной 170 уд./мин. Выбор этой частоты основан на том, что зона оптимального функционирования сердечно-сосудистой системы находится в диапазоне 170–190 уд./мин. Таким образом, с помощью этого теста можно определить ту мощность нагрузки, при которой сохраняется оптимальное функционирование сердечно-сосудистой системы [7]. Показатели как абсолютной, так и относительной работоспособности, полученные в ходе нашего исследования, соответствовали нормальным значениям для здоровых лиц.

Корреляционные взаимосвязи: для всех испытуемых $PWC_{170\text{абс.}}$ коррелировало с нормированной

амплитудой миогенного ($r = -0,423$, $p < 0,05$) ритма кровотока, с жизненной емкостью легких ($r = 0,460$, $p < 0,05$), абсолютным значением максимального потребления кислорода ($r = 0,924$, $p < 0,01$) и миогенным тонусом ($r = 0,430$, $p < 0,05$). Таким образом, зафиксирована взаимосвязь показателя $PWC_{170\text{абс.}}$ с функционированием регуляторных механизмов микроциркуляторного русла, в частности функциональным вкладом кардиальных и миогенных ритмов в регуляцию микроциркуляторного русла артериальной крови пропорциональна показателю амплитуды сердечного ритма (Ac) и косвенно указывает на дилатацию артериолярных сосудов [5]. Установленная корреляционная взаимосвязь показателя $PWC_{170\text{абс.}}$ с нормированной амплитудой сердечного ритма ($r = 0,530$, $p < 0,05$), подтверждает способность выполнять физическую работу от количества артериальной крови, поступающей в микроциркуляторное русло.

Важность тонуса сосудистого русла в обеспечении работоспособности указывает и обратная зависимость показателя PWC_{170} от амплитуды миогенных осцилляций резистивных микрососудов и прямая взаимосвязь с их миогенным тонусом. В физиологической интеграции управления кровотоком именно миогенный тонус является последним звеном контроля микроциркуляции непосредственно перед капиллярным руслом.

Опубликованные данные указывают на однонаправленную реакцию сосудистого тонуса на физическую нагрузку, проявляющуюся в увеличении скорости распространения пульсовой волны в сосудах эластического и мышечного типа [8]. По всей видимости, эта реакция характерна не только для магистральных сосудов, но и реализуется на уровне системы микроциркуляции.

Величина максимальной аэробной производительности – величина максимального потребления кислорода (МПК) – является интегральным показателем функционального состояния организма и его физической работоспособности [9].

$MПК_{\text{абс.}}$ был взаимосвязан с нормированной амплитудой миогенного ритма ($r = -0,420$, $p < 0,05$) и миогенным тонусом ($r = 0,432$, $p < 0,05$). Установлена прямая взаимосвязь показателя $MПК_{\text{абс.}}$ с нормированными амплитудами сердечных ритмов ($r = 0,500$, $p < 0,05$) и обратная зависимость от нормированной амплитуды дыхательного ритма ($r = -0,436$, $p < 0,01$) указывает на обусловленность аэробной производительности эффективностью функционирования системы микроциркуляции.

Отмечена корреляция Sm с абсолютным значением физической работоспособности при пульсе 170 уд./мин ($PWC_{170\text{абс.}}$) у женщин ($r = -0,938$, $p < 0,01$) и у мужчин ($r = -0,624$).

Параметр удельного потребления кислорода (U) был связан с $PWC_{170\text{абс.}}$ и $PWC_{170\text{отн.}}$ у женщин ($r = -0,575$ и $r = -0,992$ соответственно, $p < 0,01$) и с аналогичными показателями у мужчин ($r = -0,593$ и $r = -0,982$ соответственно, $p < 0,01$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные взаимосвязи показателей $PWC_{170\text{абс.}}$ и индексом перфузионной сатурации кислородом крови говорят об информативности метода ЛДФ в оценке системы транспорта кислорода и ее важной роли в обеспечении физической работоспособности. Подтверждает это и тесная взаимозависимость как абсолютных, так и относительных показателей работоспособности (PWC_{170}) с параметром удельного потребления кислорода тканями (U), также полученного с помощью метода ЛДФ.

Таким образом, полученные данные подтвердили информативность и адекватность метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке состояния и функционирования системы гемомикроциркуляции и ее важный вклад в обеспечение физической работоспособности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власенко Р.Я., Балашова А.Д. Сравнительный анализ готовности к риску и аэробной производительности спортсменов с учетом их гендерных особенностей. *Вестник НовГУ*. 2021;3(124):11–16. doi: 10.34680/2076-8052.2021.3(124).11-16.
2. Рылова Н.В., Жолинский А.В., Биктимирова А.А. Метаболизм карнитина и максимальное потребление кислорода у юных спортсменов. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2019;5:209–2014. doi: 10.21508/1027-4065-2019-64-5-209-214.
3. Кузьмин А.А., Силантьев М.Н., Челышкова Т.В. Максимальное потребление кислорода и функция внешнего дыхания велосипедистов подросткового возраста. *Теория и практика физической культуры*. 2021;11:59.
4. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Руководство для врачей. Под ред. А.И. Курпаткина, В.В. Сидорова. М.: Медицина, 2005. 256 с.
5. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2010;9;1(33):49–60.
6. Szyguła R. The changes in cutaneous microcirculation in judo athletes before the preparation period and in the competition period. *Medicina Sportiva*. 2008;12(1):8–13.
7. Физическая культура. Врачебный контроль и самоконтроль занимающихся физическими упражнениями и спортом: учебно-методическое пособие. Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2021. 95 с. URL: <http://www.psu.ru/nauka/>

elektronnye-publikatsii/uchebnye-posobiya-i-metodicheskie-materialy/k-v-chedov-fizicheskaya-kultura-vrachebnyj-kontrol-i-samokontrol-zanimayushchikhsya-fizicheskimi-uprazhneniyami-i-sportom.

8. Головкин Н.Г., Божук Т.Н. Динамика пульсовой волны и сосудистые реакции при беговых нагрузках. *Наука – 2020*. 2017;1(12):98–104.

9. Волков В.В., Тамбовцева Р.В. Измерение максимального потребления кислорода: к вопросу о выборе протокола. *Современные вопросы биомедицины*. 2022;3(20):43–51. doi: 10.51871/2588-0500_2022_06_04_3.

REFERENCES

1. Vlasenko R.YA., Balashova A.D. Comparative analysis of the readiness for risk and aerobic performance among male and female athletes. *Vestnik NovGU = Vestnik NOV/SU*. 2021;3(124):11–16. (In Russ.) doi: 10.34680/2076-8052.2021.3(124).11-16.
2. Rylova N.V., Zholinsky A.V., Biktimirova A.A. Carnitine metabolism and maximum oxygen consumption in young athletes. *Rossiyskiy Vestnik Perinatologii i Pediatrii = Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2019;64(5):209–214. (In Russ.) doi: 10.21508/1027-4065-2019-64-5-209-214.
3. Kuzmin A.A., Silantsev M.N., Chelyshkova T.V. Maximum oxygen consumption and external respiratory function in adolescent cyclists. *Teoriya i praktika fizicheskoy kultury = Theory and practice of physical culture*. 2021;11:59. (In Russ.)
4. Laser Doppler fluometry of blood microcirculation. Guide for physicians. A.I. Kurpatkina, V.V. Sidorova (Eds). Moscow, Medicine, 2005. 256 p. (In Russ.)
5. Fedorovich A.A. The functional state of regulatory mechanisms of microvasculature in normal and arterial hypertension according to laser Doppler flowmetry. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2010;9;1(33):49–60. (In Russ.)
6. Szyguła R. The changes in cutaneous microcirculation in judo athletes before the preparation period and in the competition period. *Medicina Sportiva*. 2008;12(1):8–13.
7. Physical education. Medical control and self-control of those engaged in physical exercises and sports: educational and methodological manual. Perm State National Research University. Perm, 2021. 95 p. (In Russ.) URL: <http://www.psu.ru/nauka/elektronnye-publikatsii/uchebnye-posobiya-i-metodicheskie-materialy/k-v-chedov-fizicheskaya-kultura-vrachebnyj-kontrol-i-samokontrol-zanimayushchikhsya-fizicheskimi-uprazhneniyami-i-sportom>.
8. Golovko N. G., Bozhuk T. N. Dynamics of pulse wave in vascular reactions in cross-country loads. *Nauka – 2020*. 2017;1(12):98–104. (In Russ.)
9. Volkov V.V., Tambovtseva R.V. Maximum oxygen consumption and muscle mass working during the step test: a pilot study. *Sovremennye voprosy biomeditsiny = Modern Issues of Biomedicine*. 2022;3(20):43–51. (In Russ.) doi: 10.51871/2588-0500_2022_06_04_3.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Информация об авторе

О.А. Овчинникова – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и методики обучения биологии, Ярославский государственный педагогический университет имени К.Д. Ушинского, Ярославль, Россия; olechki-net@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.05.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2024; принята к публикации 10.06.2024.

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

Information about the author

O.A. Ovchinnikova – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Methods of Teaching Biology, Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia; olechki-net@yandex.ru

The article was submitted 24.05.2023; approved after reviewing 10.03.2024; accepted for publication 10.06.2024.