

*П.В. Михайлов, Р.С. Остроумов, И.А. Тихомирова, А.В. Муравьев,
И.А. Осетров*

ГЕМОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОСОСУДИСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА У ЛИЦ С РАЗНЫМ АЭРОБНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ОРГАНИЗМА

Аннотация. Для оценки аэробного потенциала человека часто используют величину максимального потребления кислорода, которая преимущественно определяется возможностями системы транспорта кислорода. На сегодняшний день к наименее изученным отделам этой функциональной системы относят уровень микроциркуляции. В статье представлен сравнительный анализ микрососудистых характеристик и гемореологических параметров у лиц с разным уровнем максимального потребления кислорода.

Ключевые слова: максимальное потребление кислорода, микроциркуляция, вязкость крови, агрегация эритроцитов, деформируемость эритроцитов.

*P.V. Mikhailov, R.S. Ostroumov, I.A. Tikhomirova, A.V. Muravyev,
I.A. Osetrov*

HEMORHEOLOGICAL AND MICROVASCULAR MECHANISMS OF OXYGEN TRANSPORT IN INDIVIDUALS WITH DIFFERENT AEROBIC POTENTIAL

Abstract. To assess the aerobic potential of a person, the maximum oxygen consumption is often used, which is mainly determined by the capabilities of the oxygen transport system. To date, the least studied departments of this functional system include the level of microcirculation. The article presents a comparative analysis of microvascular characteristics and hemorheological parameters in individuals with different levels of maximum oxygen consumption.

Keywords: maximum oxygen consumption, microcirculation, blood viscosity, erythrocyte aggregation, erythrocyte deformability.

Введение. Одним из основных показателей, используемых для оценки аэробного потенциала человека, является максимальное потребление кислорода (МПК) [1–2]. МПК характеризует предельно достижимую мощность аэробной энергопродукции, и зависит от трех основных компонентов: минутного объема кровообращения, кислородной емкости крови и функции митохондрий [3]. При этом систему транспорта кислорода выделяют в качестве ключевого звена, определяющего аэробную производительность организма [4, 5]. На сегодняшний день системный уровень интеграции гемодинамики относят к наиболее изученным отделам кровообращения, а уровень микроциркуляции (МЦ), включающий сосудистые факторы и реологические свойства крови остается недостаточно исследованным.

С учетом выше сказанного **целью** настоящего исследования был сравнительный анализ комплекса показателей центральной гемодинамики, гемореологии и микроциркуляции у лиц с разным уровнем максимального потребления кислорода.

Материал и методы

В исследовании приняли участие практически здоровые мужчины-добровольцы в возрасте 20-30 лет. Все испытуемые были разделены на три группы в соответствии с величиной МПК, которую определяли с использованием прямого газоанализа при проведении велоэргометрического теста со ступенчато возрастающей нагрузкой. В группу 1 включали лиц с величиной МПК 30-40 мл/мин./кг (n=14), в группу 2 – 41-50 мл/мин./кг (n=24), в группу 3 – 51-60 мл/мин./кг (n=15). Параметры МЦ регистрировали с применением биомикроскопии ногтевого ложа. Оценивали плотность функционирующих капилляров (ПФК) и диаметр их переходной части (ДК). С помощью метода лазерной доплеровской визуализации (ЛДВ) определяли перфузию кожи на середине предплечья (ПМ). Регистрацию всех параметров МЦ проводили в покое и сразу после окончания велоэргометрического теста. Показатели вязкости крови, плазмы и суспензии эритроцитов определяли с помощью ротационного вискозиметра Брукфилда. Агрегацию эритроцитов регистрировали агрегометром Murgene. Для оценки деформируемости эритроцитов определяли индекс их удлинения (ИУЭ) в проточной микрокамере [6]. Для проверки различий в трех группах наблюдения использовали критерий Краскела-Уоллиса. За уровень статистически значимых принимали изменения при $p < 0,05$. Уровень взаимосвязи различных параметров выявляли при помощи

ранговой корреляции Спирмена. Числовые данные в группах представляли в виде медианы (Me), нижнего и верхнего квартилей 25% и 75% соответственно (Q1; Q3).

Результаты

По данным биомикроскопии были установлены статистически значимые различия между группами в значениях ДК кожи в состоянии покоя ($p < 0,05$) (табл. 1). У лиц группы 3 он был больше на 33%, чем в группе 1, а разница между группами 1 и 2 составила 13%. При этом ПФК существенно не различалась. В условиях покоя также не было выявлено значимых различий в перфузии кожи.

Таблица 1

Показатели микроциркуляции и реологии крови у лиц с разным уровнем МПК (Me (Q1; Q3))

Показатели	Группа 1 (n=14)	Группа 2 (n=24)	Группа 3 (n=15)
ПФК покой, 1/мм ²	61,5 (54,5; 70,5)	57,4 (51,8;64,3)	58,0 (52,0; 62,5)
ПФК нагрузка, 1/мм ²	67,0 (57,8; 79,8)	64,0 (56,0; 75,0)	62,0 (59,0;66,5)
ПФК изменения, %	8,4 (5,0; 11,1)	9,6 (7,8; 15,7)	10,0 (7,9; 14,5)
ДК покой, мкм	13,9 (13,2; 15,6)	15,7 (15,0; 18,6)	18,5 (16,9; 20,8)*
ДК нагрузка, мкм	15,3 (14,0; 16,8)	18,3 (15,2; 20,3)	18,6 (16,6; 20,1)*
ДК изменения, %	6,4 (3,5; 8,6)	4,3 (0,5; 25,8)	0,6 (-3,3; 4,0)*
ВК, мПа·с	2,97 (2,74; 3,27)	2,70 (2,61; 2,75)	2,54 (2,41; 2,86)*
ВП, мПа·с	1,96 (1,92; 2,02)	1,93 (1,88; 2,05)	1,88 (1,79; 1,98)
Нст, %	48,5 (47,0; 48,9)	48,0 (46,0; 49,0)	47,0 (46,0; 48,0)
ПАЭ, отн.ед.	30,1 (26,8; 32,9)	23,0 (20,7 (24,5)	21,0 (17,3; 36,6)*
ИУЭ, отн.ед.	1,99 (1,91; 2,15)	2,05 (1,84; 2,23)	2,15 (2,05; 2,24)
ВС, мПа·с	3,08 (2,03; 3,41)	3,07 (1,58; 3,32)	2,41 (1,46; 3,32)

Обозначения: * - межгрупповые различия статистически значимы при $p < 0,05$; ПФК – плотности функционирующих капилляров; ДК – диаметр капилляров; ВК – вязкость крови при скорости сдвига ($>100 \text{ с}^{-1}$); ВС – вязкость суспензии эритроцитов (Hct=40%) при скорости сдвига ($>100 \text{ с}^{-1}$); ВП – вязкость плазмы; Hct – гематокрит; ПАЭ – показатель агрегации эритроцитов при скорости сдвига 3 с^{-1} ; ИУЭ – индекс удлинения эритроцитов; ВС – вязкость суспензии эритроцитов с гематокритом 40% и вязкостью суспензионной среды $1,1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

После интенсивной мышечной работы было зарегистрировано сходное по величине и статистически значимое увеличение ПФК во всех группах наблюдения (8-10%; $p < 0,05$), при этом выраженность изменений ДК различалась. В первой и второй группах увеличение ДК составило 6% и 4% ($p < 0,05$) соответственно, а в группе 3 ДК практически не изменился. Важно отметить, что несмотря на указанные различия в изменениях ДК в ответ на мышечную нагрузку, у лиц групп 2 и 3 он оставался на 20-22% больше, чем в группе 1 ($p < 0,05$). Была найдена корреляционная взаимосвязь между ПФК и ДК в объединенной группе ($-0,55$; $p < 0,05$). Наиболее выраженные и статистически значимые различия в комплексе микроциркуляторных показателей были выявлены в резервах кожного кровотока. Прирост ПМ после мышечной нагрузки у лиц группы 1 был наименьшим и составил 35%, в группе 2 – 67%, а в группе 3 – 80% (рис. 1А).

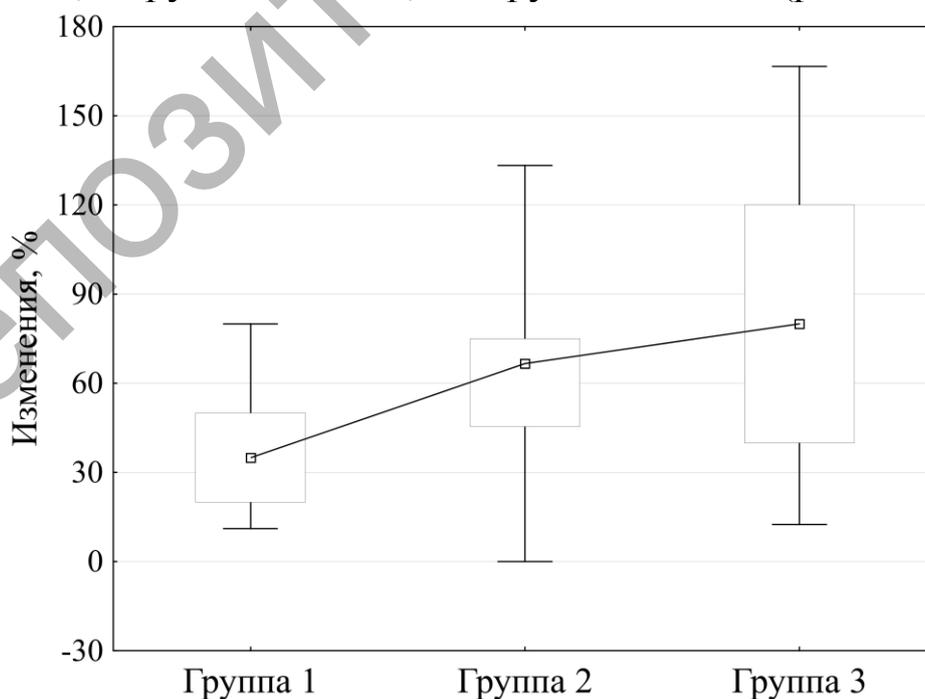


Рис. 1 А

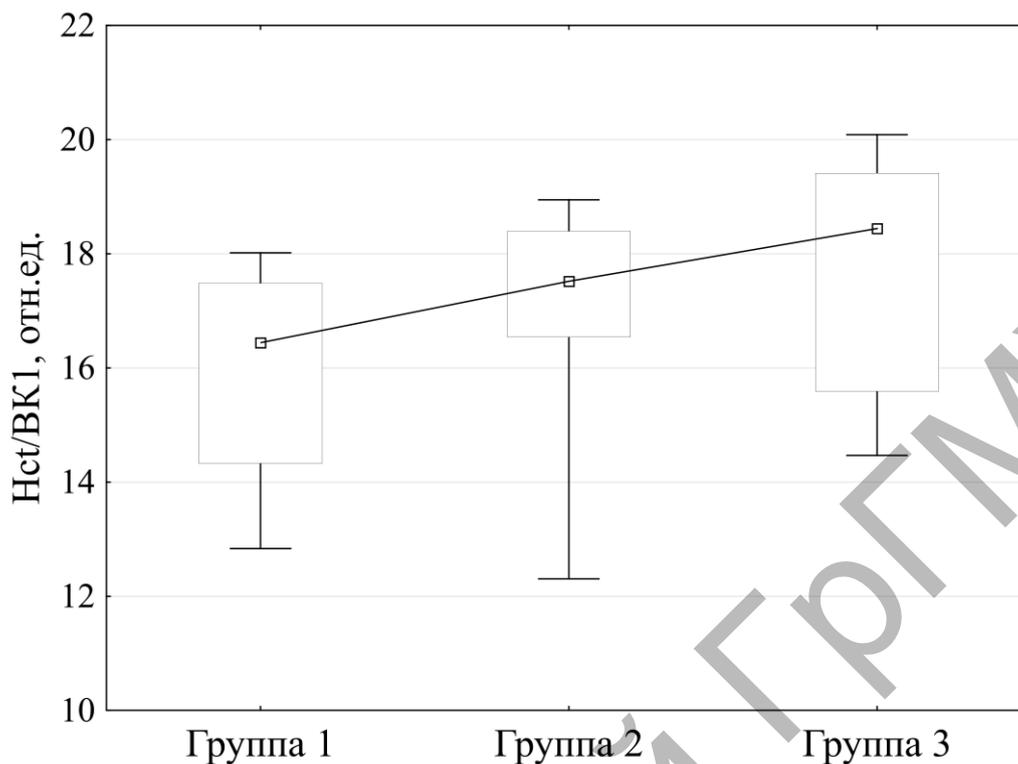


Рис.1 Б

Рис. 1. А – Изменения (%) показателя микроциркуляции (ПМ) в ответ на мышечную нагрузку у лиц с разным уровнем МПК ($p=0,0124$). Б – Показатель эффективности транспортной функции крови (Hct/VK1) у лиц с разным уровнем МПК ($p=0,012$). Данные на рисунке представлены в виде медианы, нижнего и верхнего квартилей 25%–75%, минимального и максимального значений.

В комплексе гемореологических показателей (табл. 1), статистически значимые различия между группами наблюдения были зарегистрированы в вязкости крови ($p<0,05$). У лиц группы 1 она была больше, чем в группах 2 и 3 на 9% и 14% соответственно. Известно, что вязкость крови как интегральная характеристика зависит от комплекса факторов, среди которых гематокрит, вязкость плазмы, агрегация и деформируемость эритроцитов [7, 8]. Поскольку различия в значениях гематокрита были незначительными (табл. 1), то вероятной причиной сниженной вязкости крови у лиц групп 2 и 3 является умеренно сниженная вязкость плазмы. Об этом свидетельствует типичная корреляционная взаимосвязь между ВК и ВП $r=0,79$ ($p<0,05$). Агрегация эритроцитов в группе была больше, чем в группах 2 и 3 на 23% и 30% соответственно ($p<0,05$; табл. 1). Что касается другой важной микрореологической характеристики

эритроцитов – деформируемости, оцениваемой по индексу удлинения клеток (ИУЭ), то имелась тенденция к ее увеличению в группах с более высоким уровнем МПК. Сходные тенденциозные различия были получены при определении вязкости суспензии (ВС) со стандартным гематокритом и вязкостью суспензионной среды, которая отражает общую потоковую деформацию большой массы эритроцитов [9]. Наибольшие значения ВС были зафиксированы у лиц группы 1, а наименьшие в группе 3. В гемореологии в качестве интегрального показателя, объединяющего комплекс макро- и микрореологических характеристик, и часто используемого для оценки эффективности транспортной функции крови, применяют отношение $Hct/VK1$. Его значения, а следовательно, и эффективность транспортной функции крови, была самой низкой в группе 1. В группе 2 и 3 данный показатель был на 7% и 12% больше соответственно ($p < 0,05$; рис. 1Б).

Таким образом, показатели МЦ и гемореологического профиля свидетельствовали о потенциальной возможности более существенно повышать объемный кровоток и доставку кислорода в ткани у лиц с более высоким аэробным потенциалом организма.

Заключение. Таким образом, сравнительный анализ комплекса параметров системы кровообращения показал, что высокий аэробный потенциал организма сочетается с более экономичным функционированием системы кровообращения в состоянии покоя как на уровне макро-, так и микроциркуляции. В условиях интенсивной мышечной работы у лиц с большей величиной МПК зарегистрированы повышенные резервы перфузии кожи, которые, вероятно, достигались благодаря увеличенному просвету обменных сосудов и умеренно сниженной вязкости крови. Последняя была связана с меньшей агрегацией и большей деформируемостью эритроцитов. Можно полагать, что выявленные особенности МЦ являются частью более эффективно организованной функциональной системы транспорта кислорода у лиц с более высокой аэробной производительностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-515-00019 Бел_a

Библиографический список

1. Sartor F., Vernillo G., de Morree H.M. et al. Estimation of maximal oxygen uptake via submaximal exercise testing in sports, clinical, and

home settings // Sports Med. 2013. V. 43. P. 865–873. doi.org/10.1007/s40279-013-0068-3

2. Bennett H., Parfit, G., Davison K. et al. Validity of submaximal step tests to estimate maximal oxygen uptake in healthy adults // Sports Med. 2016. V. 46. P. 737–750. doi.org/10.1007/s40279-015-0445-1

3. Bassett D.R.Jr, Howley E.T. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance // Med. Sci. Sports Exerc. 2000. V. 32. № 1. P. 70-84. doi: 10.1097/00005768-200001000-00012

4. Löllgen H., Leyk D. Exercise testing in sports medicine // Dtsch. Arztebl. Int. 2018. V. 115. № 24. P. 409-416. doi: 10.3238/arztebl.2018.0409

5. Lee J., Zhang X.L. Physiological determinants of VO₂max and the methods to evaluate it: A critical review Revue critique des déterminants physiologiques du VO₂max et de ses critères de détermination // Science & Sports. 2021. V. 36. № 4. P. 259-271. doi.org/10.1016/j.scispo.2020.11.006

6. Муравьев А.В. Михайлов П.В., Тихомирова И.А. Микроциркуляция и гемореология: точки взаимодействия // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017. Т. 16. № 2 (62). С. 90–100.

7. Schierbauer J., Hoffmeister T., Treff G. et al. Effect of exercise-induced reductions in blood volume on cardiac output and oxygen transport capacity // Front Physiol. 2021. V. 12. P. 679232. doi: 10.3389/fphys.2021.679232.

8. Kang J., Ratamess N.A., Faigenbaum A.D. et al. Use of heart rate index to predict oxygen uptake – a validation study // Int. J. Exerc. Sci. 2020. V 13. № 7. P. 1705–1717.

9. Artmann G.M. Microscopic photometric quantification of stiffness and relaxation time of red blood cells in a flow chamber // Biorheology. 1995. V. 32. P. 553–570. doi: 10.1016/0006-355X(95)00032-5.