

П. В. Михайлов, Е. В. Круглова, Ю. Л. Масленникова, А. А. Муравьев, Е. Н. Квасовец

### Состояние микроциркуляции у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности

*Работа выполнена в рамках реализации программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)», грант № 2.1.1/4306.*

Анализ проблемы микроциркуляции показал, что она по-прежнему актуальна и ей посвящено много работ, но лишь отдельные исследования касаются вопросов взаимосвязи показателей микрососудистой системы и аэробной работоспособности человека. В работе на основе использования современных неинвазивных методов регистрации параметров микроциркуляции изучены особенности кровотока и оксигенации тканей у лиц с разным уровнем аэробной физической работоспособности как в условиях покоя, так и при проведении функциональных проб.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, аэробная работоспособность, МПК, конъюнктивальная биомикроскопия, лазерная доплеровская флоуметрия, артериоло-веноулярное соотношение.

P. V. Mikhailov, E. V. Kruglova, Ju. L. Maslennikova, A. A. Muraviov, E. N. Kvasovets

### The Level of Microcirculation of Persons with a Different Level of the Aerobic Working Capacity

The analysis of the problem of microcirculation has shown that it is still up to date and many works are devoted to it, but only few researches deals with questions of interrelation of indicators of the person's microvascular system and the aerobic working capacity. In the given work on the basis of use of modern noninvasive methods of registration of microcirculation parameters are studied peculiarities of the bloodstream and fabrics oxygenation of persons with the different level of the aerobic physical working capacity as in the conditions of rest as well as at carrying out functional tests.

**Keywords:** microcirculation, an aerobic working capacity, maximum consumption of oxygen, conjunctival biomicroscopy, laser Doppler ultrasounds, arteriolo-venular correlation.

Исходя из концепции физического (соматического) здоровья [1], основным его критерием следует считать энергопотенциал биосистемы, поскольку жизнедеятельность любого живого организма зависит от возможности потребления энергии из окружающей среды, ее аккумуляции и мобилизации для обеспечения физиологических функций. Чем больше мощность и емкость реализуемого энергопотенциала, а также эффективность его расходования, тем выше уровень здоровья индивида. Так как доля аэробной энергопродукции является преобладающей в общей сумме энергопотенциала, то именно величина максимального потребления кислорода (МПК) может быть основным критерием его физического здоровья и жизнеспособности.

Величина МПК в значительной степени детерминирована функциональными резервами системы кровообращения, базисным элементом которой является микроциркуляция (МЦ). Именно в данной части сердечно-сосудистой системы реали-

зуется ключевой процесс жизнедеятельности организма – транскапиллярный обмен [4, 8, 9].

**Целью** исследования было изучение особенностей микроциркуляции у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности.

#### Материал и методы

Наблюдения проводили на двух группах испытуемых (женщины в возрасте 19–24 лет, n=28), все манипуляции были выполнены в соответствии с Хельсинской декларацией (1976) о гуманном отношении к лицам, участвующим в исследовательских программах.

Разделение на две группы было выполнено на основе определения МПК/кг. Первую группу составили лица с высоким уровнем МПК (n=14), а контрольную – с низким (n=14). У всех испытуемых регистрировали ряд антропометрических показателей и гемодинамические характеристики в состоянии покоя: частоту сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление (АД), рассчитывали среднее АД и двойное произведение (ДП). Для

исследования аэробной работоспособности применяли велоэргометрический тест (Эргометр Kettler, FX1) со ступенчато возрастающей мощностью по 25 Вт в минуту с определением  $PWC_{170}$  и последующим вычислением величины максимального потребления кислорода [4].

Микроциркуляцию исследовали с использованием конъюнктивальной биомикроскопии и лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Установка для биомикроскопии сосудов микроциркуляции включала микроскоп с цифровым окуляром (модель DCM510), подключенным к персональному компьютеру. Анализ полученных изображений производили с помощью компьютерной программы, предназначенной для анализа изображений, при этом измеряли диаметр параллельно идущих артериол и венул с последующим расчетом артериоло-венулярного соотношения (ABC):

$$ABC = \frac{DA}{DB},$$

где  $DA$  – диаметр артериолы,  $DB$  – диаметр венулы.

Также использовали анализатор ЛАКК-03, в котором реализованы две неинвазивные медицинские технологии: ЛДФ и оптическая тканевая оксиметрия (ОТО). Одновременно регистрировались три параметра микроциркуляции крови: изменение перфузии ткани кровью, динамику изменения кислородной сатурации (оксигенации) крови  $SO_2$  и изменение объема фракции гемоглобина  $V_{кр}$ .

#### Окклюзионная проба

В процессе записи ЛДФ-граммы проводили окклюзионную пробу (ОП), которая реализуется

путем пережатия на 3 минуты участка предплечья с помощью манжеты тонометра таким образом, чтобы вызвать остановку кровотока и соответственно ишемию в исследуемой области. После прекращения окклюзии кровотока восстанавливается, и развивается реактивная постокклюзионная гиперемия, которая проявляется в увеличении показателя микроциркуляции до величины, превышающей исходный уровень ПМК с последующим спадом до исходного уровня [5].

Согласно экспериментальным исследованиям, постокклюзионная реактивная гиперемия является нейрогенной реакцией, реализующейся преимущественно через высвобождение нейропептида КГРП (кокальцигенина) и нейронального оксида азота, секретлируемых афферентными ноцицептивными С-волоконками. Эти факторы индуцируют синтез NO эндотелием, который, в свою очередь, воздействуя на гладкую мускулатуру сосудов, вызывает вазодилатацию [10, 11].

#### Результаты исследования

Результаты исследования показали, что различия в величине МПК в двух сравниваемых группах достигли 0,25 л/мин (рис. 1). У лиц группы 1 он был значительно выше и составил  $2,91 \pm 0,24$  л/мин., а в группе «контроль» –  $2,66 \pm 0,18$  л/мин. Различия были статистически достоверными ( $p < 0,01$ ). Значения показателя МПК, отнесенного к массе тела, также были достоверно выше в первой группе, чем в контрольной ( $54,1 \pm 5,6$  и  $45,0 \pm 7,1$  мл/мин./кг соответственно;  $p < 0,01$ ; рис. 1).

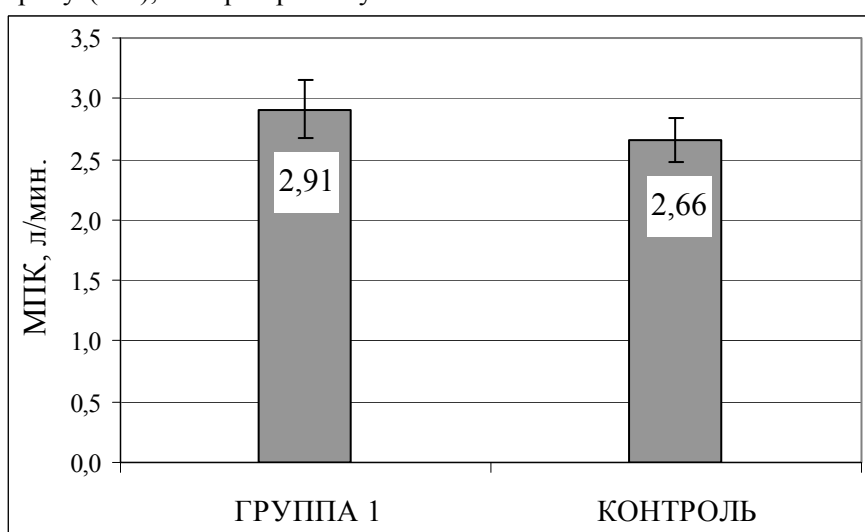


Рис. 1. Абсолютные значения показателя МПК в группах

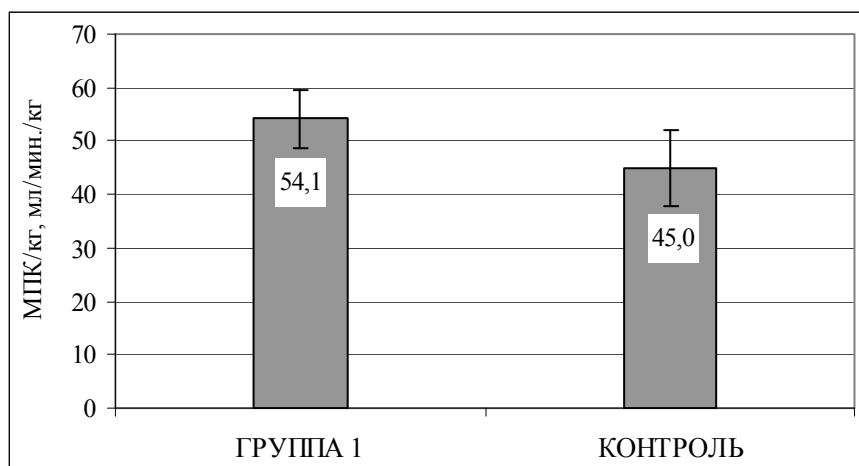


Рис. 2. Показатели МПК/кг у испытуемых

В таблице 1 представлены антропометрические данные и силовые показатели испытуемых. Показатели кистевой динамометрии в группе «контроль» ( $29,9 \pm 4,2$ ) на 7,0 % превосходили таковые в 1 группе ( $27,8 \pm 3,7$ ). ЖЕЛ в группе контроля составила  $3046,2 \pm 366,0$  мл и была на 4 % больше, чем в первой группе  $2923,1 \pm 409,6$  мл. При оценке потенциальных возможностей

дыхательной системы информативным показателем является жизненный индекс (ЖИ= ЖЕЛ / масса тела). Более высокие значения ЖИ были получены в группе 1 ( $54,6 \pm 9,7$ ). В группе «контроль» он был на 6 % меньше (табл. 1). Однако указанные различия в группах не были статистически значимыми.

Таблица 1

Показатели физического развития и функционального состояния испытуемых с разным уровнем аэробной работоспособности ( $M \pm \sigma$ )

Показатели	Группа 1 (n=14)	Контроль (n=14)	Разница, %	P
Рост, см	$164,0 \pm 5,6$	$164,3 \pm 5,7$	0,2	-
Вес, кг	$54,4 \pm 8,6$	$60,3 \pm 10,4$	9,8	-
ВРИ	$330,9 \pm 42,6$	$367,1 \pm 61,2$	9,9	-
Динамометрия кистевая, ср. зн.	$27,8 \pm 3,7$	$29,9 \pm 4,2$	7,0	-
ЖЕЛ, мл	$2923,1 \pm 409,6$	$3046,2 \pm 366,0$	4,0	-
ЖИ	$54,6 \pm 9,7$	$51,7 \pm 9,9$	5,6	-
ЧСС, уд./мин.	$73,8 \pm 11,7$	$77,5 \pm 12,1$	4,8	-
АДс, мм рт. ст.	$108,3 \pm 7,1$	$116,2 \pm 11,1$	6,8	-
АДд, мм рт. ст.	$71,5 \pm 7,3$	$72,9 \pm 7,5$	2,0	-
АД среднее	$83,6 \pm 6,7$	$87,2 \pm 8,3$	4,1	-
ДП	$79,8 \pm 13,4$	$88,0 \pm 16,4$	9,3	-

ЧСС в состоянии покоя в первой группе была  $73,8 \pm 11,7$  уд./мин., а в контрольной составила  $77,5 \pm 12,1$  уд./мин. В группе 1 были зарегистрированы более низкие значения систолического АД ( $108,3 \pm 7,1$  мм рт. ст.), чем в контрольной группе ( $116,2 \pm 11,1$ ). Такая же тенденция наблюдалась и для диастолического АД:  $71,5 \pm 7,3$  и  $72,9 \pm 7,5$  мм рт. ст. соответственно. При расчете ДП меньшие значения были получены в первой группе ( $79,8 \pm 13,4$ ). В контрольной группе этот показатель был на 9,3 % выше (табл. 1). Показатели гемодинамики в состоянии покоя свиде-

тельствуют о более экономичной работе сердечно-сосудистой системы в состоянии покоя у лиц первой группы.

Анализ биомикрофотограмм и измерение диаметров параллельно идущих сосудов с последующим вычислением артериоло-венулярного соотношения позволили получить следующие результаты. Среднее значение АВС в 1 группе в состоянии покоя было меньше ( $0,49 \pm 0,06$  отн. ед.), чем во второй ( $0,55 \pm 0,05$  отн. ед.;  $p < 0,05$ ; рис. 3).

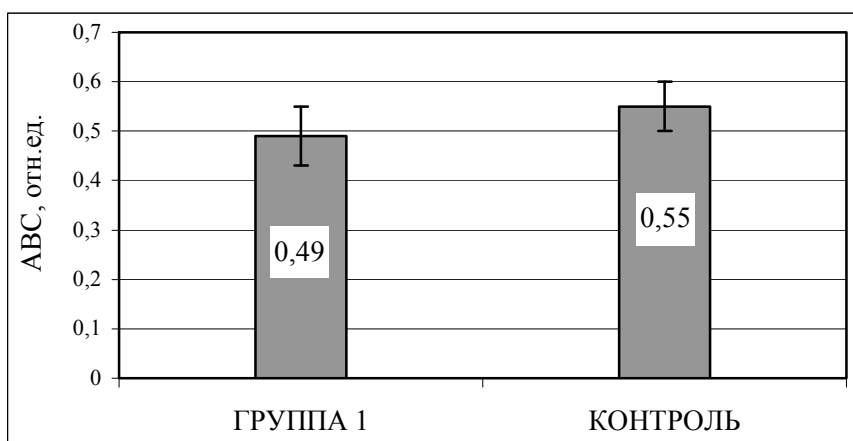


Рис. 3. ABC у лиц с разной аэробной работоспособностью

Как уже было отмечено выше, микроциркуляция представляет собой фундаментальный процесс, определяющий конечную цель функционирования сердечно-сосудистой системы и играющий ключевую роль в трофическом обеспечении тканей и поддержании тканевого метаболизма. Изменение диаметра артериол является финальным регуляторным механизмом, определяющим объем доставляемой тканям крови [3, 4, 7].

Таким образом, было определено, что у лиц с высоким уровнем аэробной работоспособности ABC в состоянии покоя меньше, чем в группе контроля. Полученные результаты указывают на возможное проявление экономизации функций в покое и увеличении резерва адаптации сердечно-сосудистой системы к физическим нагрузкам.

Таблица 2

Изменение перфузии при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности ( $M \pm \sigma$ )

Показатели	Группа 1 (n=14)	Контроль (n=14)	Разница, %	P
ПМ <sub>исх</sub> , пф. ед.	12,5±6,2	20,8±9,7	39,9	<0,05
ПМ <sub>оккл</sub> , пф. ед.	8,7±2,4	7,8±2,7	11,5	-
ПМ <sub>макс</sub> , пф. ед.	17,5±9,1	31,0±14,8	45,5	<0,05
РК, %	139,9±34,5	160,9±74,7	13,1	-

**Обозначения:** ПМ<sub>исх</sub> – среднее значение показателя микроциркуляции в перфузионных единицах (пф. ед) до окклюзии; ПМ<sub>оккл</sub> – показатель микроциркуляции в процессе окклюзии; ПМ<sub>макс</sub> – максимальное значение ПМ в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии; РК – резерв кровотока, рассчитывается как отношение ПМ<sub>макс</sub> к ПМ<sub>исх</sub> и выражается в процентах.

Анализ зарегистрированных ЛДФ-грамм позволил получить следующие результаты (табл. 2; рис. 4). Исходный показатель микроциркуляции (ПМ) до окклюзии в группе 1 был на 39,9 % меньше (12,5±6,2 пф. ед.), чем в группе контроля, где он составил 20,8±9,7 пф. ед. Полученные данные согласуются с результатами биомикроскопии: снижение ABC ведет к уменьшению перфузии. В процессе окклюзии ПМ снизился в первой группе на 30,4 % (8,7±2,4 пф. ед.), в контрольной – на 62,5 % (7,8±2,7 пф. ед.). Максимальное значение показателя микроциркуляции в процессе развития реактивной постокклюзион-

ной гиперемии в первой группе было равно 17,5±9,1 пф. ед., а в контроле 31,0±14,8 пф. ед.

В таблице 3 представлены средние значения сатурации крови в группах. Следует учесть, что оптическая тканевая оксиметрия анализатора ЛАКК-03 воспринимает одновременно информацию с нескольких звеньев микроциркуляторного русла биоткани (мелкие венулы, артериолы, артериовенозные шунты и капилляры), поэтому определяемый прибором относительный показатель SO<sub>2</sub> отражает в отличие от приборов пульсоксиметрии среднее относительное содержание в крови HbO<sub>2</sub>, усредненное по всему микрососудистому руслу [5].

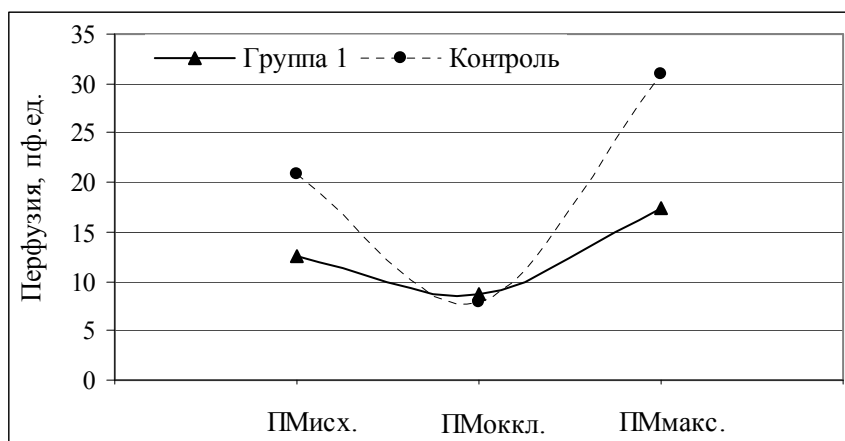


Рис. 4. Изменение перфузии при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности

Исходный показатель  $SO_2$  в первой группе был равен  $41,7 \pm 14,5$ , а в контрольной –  $54,0 \pm 12,5$ . Разница составила 22,8 % и была статистически достоверной ( $p < 0,05$ ). В результате окклюзии произошло снижение  $SO_2$  в группе 1 на 62,1 % ( $15,8 \pm 13,0$ ), а в группе контроля на 40,2 % ( $32,3 \pm 20,1$ ). Максимальное значение по-

казателя  $SO_2$  в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии в группе 1 достигло  $47,6 \pm 13,7$ , повышение произошло более чем в 3 раза. В контрольной группе прирост данного показателя был менее чем в два раза (84,5 %) и составил  $59,6 \pm 10,4$ .

Таблица 3

Среднее значение кислородной сатурации крови при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности ( $M \pm \sigma$ )

Показатели	Группа 1 (n=14)	Контроль (n=14)	Разница, %	P
$SO_{2\text{ исх}}$	$41,7 \pm 14,5$	$54,0 \pm 12,5$	22,8	$< 0,05$
$SO_{2\text{ оккл}}$	$15,8 \pm 13,0$	$32,3 \pm 20,1$	51,1	-
$SO_{2\text{ макс}}$	$47,6 \pm 13,7$	$59,6 \pm 10,4$	20,1	$< 0,05$
$\delta SO_2$	$3,71 \pm 1,61$	$3,39 \pm 2,55$	9,4	-

**Обозначения:**  $SO_{2\text{ исх}}$  – среднее значение сатурации крови до окклюзии;  $SO_{2\text{ оккл}}$  – значение сатурации в процессе окклюзии;  $SO_{2\text{ макс}}$  – максимальное значение сатурации в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии;  $\delta SO_2$  – характеризует связь между потоком крови в микроциркуляторном русле и не потребленным  $O_2$ .

Таким образом, абсолютные значения показателя  $SO_2$  были больше в группе контроля, тогда как его динамика при проведении окклюзионной пробы более выражена у лиц с высоким МПК/кг,

что может указывать на способность тканей к большему потреблению (извлечению из крови) кислорода у последних (рис. 5)

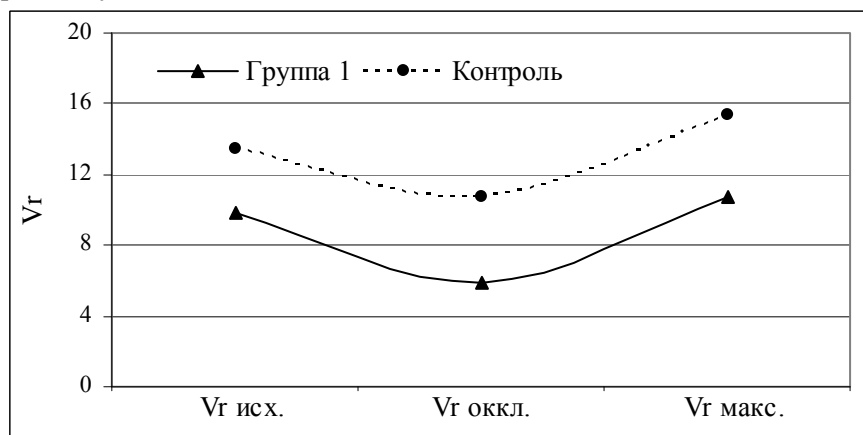


Рис. 5. Изменение кислородной сатурации крови при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности

Поскольку оптическое поглощение света кровью в указанных спектральных диапазонах длин волн происходит в основном за счет поглощения света гемоглобином крови (в разных его фракци-

ях), то регистрируемый и индицируемый прибором параметр  $Vr$  характеризует относительное (процентное) содержание гемоглобина в общем тестируемом объеме биоткани [5].

Таблица 4

Изменение объема фракции гемоглобина в крови при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности ( $M \pm \sigma$ )

Показатели	Группа 1 (n=14)	Контроль (n=14)	Разница, %	P
$Vr_{исх}$	9,8±3,9	13,5±3,9	27,4	<0,05
$Vr_{оккл}$	5,9±3,2	10,7±4,3	44,9	<0,01
$Vr_{макс}$	10,7±4,5	15,4±3,4	31,5	<0,01

Обозначения:  $Vr_{исх}$  – объем фракции гемоглобина в крови до окклюзии;  $Vr_{оккл}$  – объем фракции гемоглобина в крови в процессе окклюзии;  $Vr_{макс}$  – объем фракции гемоглобина в крови в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии.

Изменение объема фракции гемоглобина ( $Vr$ ) в крови при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности приведены в таблице 4. Показатель  $Vr$  до окклюзии в группе 1 был равен 9,8±3,9, тогда как в контроле он составил 13,5±3,9 и был на 27 % больше (различия были статистически достоверны ( $p < 0,05$ )). В процессе окклюзии  $Vr$  он снизился в первой группе

на 39,8 % (5,9±3,2), в контрольной – на 20,7 % (10,7±4,3). Максимальное значение  $Vr$  в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии в первой группе составило 10,7±4,5, а в контрольной – 15,4±3,4. Различия были статистически достоверны. На рисунке 6 иллюстрируется графическое изображение динамики  $Vr$  при проведении окклюзионной пробы.

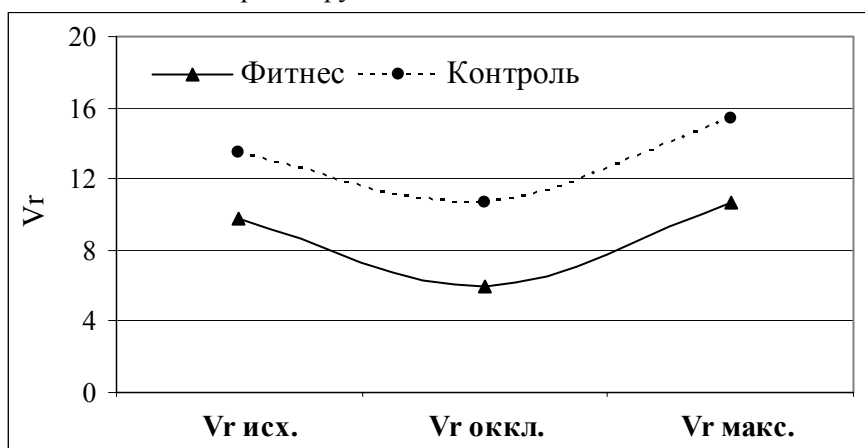


Рис. 6. Изменение объема фракции гемоглобина в крови при проведении окклюзионной пробы у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности

Корреляционный анализ показал, что в группе 1 между показателями аэробной производительности и параметрами микроциркуляции имеется достаточно высокая обратная взаимосвязь. Коэффициент корреляции между МПК/кг и значениями перфузии был равен -0,67. Между МПК/кг и показателями сатурации -0,58, а взаимосвязь МПК/кг и относительным объемом фракции гемоглобина -0,73. В группе контроля вышеописанные корреляционные взаимосвязи были значительно слабее.

### Заключение

Гемодинамические показатели, зарегистрированные в покое, указывают на более экономичную работу сердечно-сосудистой системы у лиц с более высокой работоспособностью в группе 1, чем в контрольной группе.

Артериоло-венулярное соотношение в состоянии покоя было меньше в группе 1, чем в группе контроля, что может представлять собой проявлением экономизации функций в покое у первых и свидетельствует о больших резервах адаптации организма к физическим нагрузкам.

Анализ ЛДФ-грамм показал, что у испытуемых с высокой аэробной работоспособностью перфузия тканей, кислородная сатурация и относительный объем фракции гемоглобина были

ниже, а изменения в ответ на окклюзионную пробу показателей  $SO_2$  и  $V_f$  более выраженными, чем в группе контроля.

### Библиографический список

1. Апанасенко, Г. Л., Науменко, Р. Г. Соматическое здоровье и максимальная аэробная способность индивида [Текст] / Г. Л. Апанасенко, Р. Г. Науменко // Теор. и практ. физ. культ. – 1988. – № 4. – С. 29–31.
2. Аулик, И. В. Определение физической работоспособности в клинике и спорте [Текст] / И. В. Аулик. – М. : Медицина, 1990. – 430 с.
3. Волосок, Н. И. Морфологические критерии оценки состояния микроциркуляторного русла конъюнктивы глазного яблока и их диагностическое значение [Текст] : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Н. И. Волосок. – М., 1980. – 24 с.
4. Карпман, В. Л., Любина, Б. Г. Динамика кровообращения у спортсменов [Текст] / В. Л. Карпман, Б. Г. Любина. – М. : ФиС, 1982. – 135 с.
5. Крупаткин, А. И., Сидоров, В. В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови [Текст] / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. – М. : Медицина, 2005. – 254 с.
6. Малая, Л. Т. Микроциркуляция в кардиологии [Текст] / Л. Т. Малая, И. Ю. Микляев, П. Г. Кравчун. – Харьков : Выща школа, 1977. – 232 с.
7. Наумец, Л. В. Диагностические возможности метода конъюнктивальной микроскопии [Текст] / Л. В. Наумец // Материалы международной конференции по микроциркуляции. – М. : 1997. – С. 110–111.
8. Сиротин, Б. З., Жмеренецкий, К. В. Микроциркуляция при сердечно-сосудистых заболеваниях [Текст] / Б. З. Сиротин, К. В. Жмеренецкий. – Хабаровск, 2008. – 156 с.
9. Чернух, А. М., Александров, П. Н., Алексеев, О. В. Микроциркуляция [Текст] / А. М. Чернух, П. Н. Александров, О. В. Алексеев. – М. : Медицина, 1984.
10. Fromy B., Abraham P., Bouvet C., Bouhanick B., Fressinaud P., Saumet J.L. Early Decrease of Skin Blood Flow in Response to Locally Applied Pressure in Diabetic Subjects // Diabetes. – 2002. – vol. 51. – p. 1214–1217.
11. Fromy B., Merzeau S., Abraham P., Saumet J.L. Mechanisms of the coetaneous vasodilatator response to local external pressure application in rats: involvement of CGRP, neurokinins, prostaglandins and NO. // British Journal of Pharmacology. – 2000. – № 131 – pp. 1161–1171.
12. Hermansen I, Wachtlova M. Capillary density of skeletal muscle in well-trained and untrained men // Journal of Applied Physiology. – 1971. – V. 30. – P. 160–163.