

## УСЛОВИЯ МАССОПЕРЕНОСА КИСЛОРОДА В ОРГАНИЗМЕ ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

М.М. Филиппов

*Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, г. Киев*

В статье приводятся экспериментальные результаты, позволяющие судить о том, насколько и как удовлетворяется кислородный запрос организма при максимальном увеличении метаболической активности мышц, как изменяются при этом условия массопереноса кислорода.

**Ключевые слова:** спортсмены, максимальная физическая нагрузка, кислородные режимы, массоперенос кислорода.

**Введение.** Достижения современной физиологии, биохимии и других естественных наук позволили приблизиться к оценке отдельных этапов массопереноса респираторных газов при разных состояниях и напряжениях организма [1, 6, 7, 11]. В связи с тем что мышечная деятельность дозируется в широких пределах, при которых человек может достичь максимальных значений потребления кислорода, она является удобной физиологической моделью для изучения процесса массопереноса респираторных газов [5, 10]. Ограничение проведения таких исследований до недавнего времени было связано с трудностями экспериментального определения ряда параметров, необходимых для анализа, а также с отсутствием адекватного программного описания динамики этого процесса в организме. В настоящее время мало изучены условия, которые обеспечивают соответствие доставки кислорода работающим мышцам, генез развития тканевой гипоксии при физической работе, что требует исследования механизмов кислородного обеспечения организма при различных режимах двигательной активности.

**Цель исследования.** Изучение физиологических изменений и условий массопереноса кислорода в организме при максимальной физической нагрузке.

**Материалы и методы.** Для решения поставленных задач использовался комплексный системный подход, позволяющий проанализировать процесс массопереноса респираторных газов в организме, установить связи между характером физического напряжения и

внутренними изменениями, регулирующими этот процесс [1, 10, 11, 13].

В исследовании приняли участие нетренированные мужчины, спортсмены велосипедисты и легкоатлеты высокой спортивной квалификации (заслуженные мастера спорта и мастера спорта международного класса), велосипедисты и легкоатлеты – кандидаты в мастера и мастера спорта (всего 156 чел.) в возрасте 19–25 лет. Уровень максимального потребления кислорода (МПК) оценивали с использованием велоэргометрической нагрузки ступенчато возрастающей мощности в соответствии с рекомендациями [3].

Определение объемной скорости потребления  $O_2$  и  $CO_2$  организмом осуществлялось общепринятым методом. Объемы легких измеряли с помощью малоинерционного газового счетчика фирмы «Юнкалор» (Германия). Графически рассчитывался избыток выделенного  $CO_2$ . По аналогии с кислородным режимом организма осуществлялась оценка режима  $CO_2$  [9]. Напряжение  $O_2$  и  $CO_2$ , рН крови определялись микрометодом Аструпа на аппарате «Корнинг» (Англия), кислотно-основное состояние крови рассчитывалось с использованием номограммы Siggaard-Andersen [14]. Кровь для анализа брали из предварительно разогретого пальца руки. Содержание  $CO_2$  в альвеолярном и выдыхаемом воздухе определялось с помощью малоинерционного капнографа ГУМ-2, а также масспектрометра МХ 6202. Для установления  $PCO_2$  в смешанной венозной крови и определения минутного объема крови (МОК) применялся метод возвратного дыхания [3, 4, 12]. Содер-

жание  $\text{CO}_2$  рассчитывалось по диаграмме  $\text{O}_2\text{--CO}_2$  Рана и Фенна [6].  $\text{PO}_2$  в смешанной венозной крови рассчитывалось по [13].

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета компьютерных программ Statistica 5.5, MS Excel 2003, адаптированных для биологических исследований. В качестве достоверности оценки использовалась вероятность  $p \leq 0,05$ , принятая в биологических исследованиях.

**Результаты и обсуждение.** Максимальные значения потребления кислорода были зарегистрированы: у велосипедистов –  $4,8 \pm 0,19$  л/мин (при индивидуальных значениях от 3,6 до 5,9), у легкоатлетов –  $3,11 \pm 0,2$  л/мин, у нетренированных мужчин –  $2,86 \pm 0,11$  л/мин.

Расчет средних отношений между кислородным запросом организма, потреблением кислорода и кислородным долгом показал, что наибольшее несоответствие отмечается у спортсменов высокого класса: кислородный запрос у них удовлетворялся лишь на 50–55 %, у легкоатлетов – на 55–60 %, у нетренированных мужчин – на 70–75 %. У последних минутный объем дыхания (МОД) увеличивался до 70–80 л/мин (среднее значение  $64,8 \pm 4,45$  л/мин), у легкоатлетов – до  $76,5 \pm 6,8$  л/мин, у велосипедистов – кандидатов в мастера и мастеров спорта он составил  $110,9 \pm 2,9$  л/мин, у спортсменов высокой квалификации – мастеров международного класса и заслуженных мастеров по велоспорту –  $125,5 \pm 4,7$  л/мин. Максимальная скорость поступления кислорода в дыхательные пути у нетренированных составила  $12,3 \pm 0,85$  л/мин, у легкоатлетов –  $14,3 \pm 1,4$  л/мин, у спортсменов высокой квалификации –  $22,9 \pm 0,78$  л/мин, повышаясь у некоторых из них до 26–28 л/мин.

При оценке максимальных возможностей организма увеличивать скорость поступления кислорода в легкие следует учитывать, что на фоне увеличения мощности и длительности нагрузки МОД может расти и после достижения МПК, что приводит к еще большим величинам поступления кислорода в организм. Однако, как свидетельствуют наши данные [10], избыточное увеличение вентиляции без соответствующего повышения скорости потребления кислорода приводит к резкому росту кислородной стоимости дыхания.

Следующим этапом на пути кислорода в организме являются альвеолы. Проведенные исследования показали, что скорость поступления кислорода в альвеолы у отдельных испытуемых при МПК может повышаться до 19 л/мин и более. Такие высокие величины, естественно, могут быть достигнуты лишь спортсменами высокой квалификации (среднее значение –  $16,96 \pm 0,62$  л/мин). У легкоатлетов, несмотря на относительно низкую максимальную скорость поступления кислорода в легкие, за счет высокого отношения АВ/МОД (около 86 %) к альвеолам поступало  $12,4 \pm 0,41$  л/мин, а у нетренированных мужчин – лишь  $9,1 \pm 0,83$  л/мин.

В связи с тем что до настоящего времени экспериментальное изучение массопереноса газов через альвеолярно-капиллярный барьер затруднено, данных о динамике потока кислорода из альвеол в кровь и углекислого газа в обратном направлении в литературе практически нет. Особенно это касается условий мышечной деятельности, когда на фоне повышенной скорости кровотока по легочным капиллярам в значительной степени растет частота дыхания и увеличивается дыхательный объем, что в целом существенно влияет на динамику массопереноса кислорода из альвеол в кровь на протяжении каждого дыхательного цикла. Экспериментально нами были определены содержание и парциальное давление кислорода в альвеолярном воздухе и его напряжение в артериальной крови (табл. 1), концентрация гемоглобина, кислородная емкость крови, объемная скорость кровотока, легочные объемы и потребление кислорода.

Проведенные исследования показали, что максимальная скорость транспорта кислорода артериальной кровью увеличивается в значительно меньшей степени, чем скорость поступления кислорода в легкие и альвеолы. При МПК она возрастает лишь в 8–10 раз. Это обусловлено тем, что МОК при мышечной деятельности не может расти так же быстро, как МОД, но именно ему принадлежит основной вклад в ее достижение. Увеличение МОК, как известно, определяется возможностью увеличения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и сердечного выброса (СВ).

Таблица 1

Изменение содержания кислорода (FAO<sub>2</sub> и CaO<sub>2</sub>) и его парциального давления (PAO<sub>2</sub> и РаО<sub>2</sub>) в альвеолярном воздухе и артериальной крови при МПК (M±m)

Группы		FAO <sub>2</sub> , об. %	PAO <sub>2</sub> , мм рт. ст.	CaO <sub>2</sub> , об. %	РаО <sub>2</sub> , мм рт. ст.
Спортсмены высокой квалификации	Покой	15,2±0,08	109,7±0,5	20,0±1,1	90,5±1,1
	МПК	15,0±0,2	108,8±1,48	18,6±0,37	82,3±2,1
Велосипедисты – кандидаты и мастера спорта	Покой	16,1±0,37	113,3±2,4	17,5±0,6	97,7±2,5
	МПК	15,5±0,12	109,9±1,87	17,4±0,4	85,6±2,2
Легкоатлеты – кандидаты и мастера спорта	Покой	15,9±0,29	114±1,95	18,9±0,75	92,2±1,6
	МПК	14,8±0,19	107±1,3	18,9±1,07	84,2±2,0
Нетренированные мужчины	Покой	14,3±0,19	104,2±1,03	18,4±0,3	88,6±2,6
	МПК	15,2±0,34	105,7±2,23	17,9±16	81,7±3,6

Известно, что максимальная ЧСС у человека при спортивной деятельности может достигать 210–220 уд./мин, что значительно выше оптимальной зоны, за которой ограничено наполнение сердца кровью (у нетренированных лиц это приблизительно 170 уд./мин, у спортсменов – более 190 уд./мин) [1–3, 7, 11]. У обследованных нами лиц зарегистрирована следующая ЧСС при МПК: в группе нетренированных мужчин – 195±5,3 уд./мин, у легкоатлетов – 178±5,12 уд./мин, у велосипедистов обеих групп она была почти одинаковой и составляла около 193±3,4 уд./мин.

Определение величины сердечного выброса показало, что максимальные его значения наблюдаются у спортсменов – велосипедистов высокой квалификации – 171±6,4 мл (у отдельных спортсменов – до 195 мл). У нетренированных значения СВ были ниже, чем у спортсменов (120±5,4 мл).

Нагрузка с МПК осуществлялась на фоне снижения насыщения артериальной крови кислородом. Наибольшее снижение оксигенации отмечалось у велосипедистов высокого класса (83,5±1,2 %); у легкоатлетов показатель уменьшался на 10 % (94,2±0,7 %), у нетренированных мужчин он составил 88,9±1,6 %.

Факт высокого насыщения артериальной крови кислородом у легкоатлетов объясняется повышенной частью альвеолярной вентиляции в МОД, высокой диффузионной способностью легких и кислородсвязывающими свойствами гемоглобина.

Несмотря на ухудшение оксигенации артериальной крови, содержание кислорода в ней практически не отличалось от уровня покоя. Это связано с повышением концентрации гемоглобина и увеличением кислородной емкости крови (у всех обследованных она возрастала: у спортсменов – на 1,8–2,2 об.%, у нетренированных – на 0,9–1,5 об.%). Значения максимальной скорости массопереноса кислорода кровью от легких к тканям, в связи с указанными факторами, были наибольшими у высококвалифицированных спортсменов – 6,03±0,18 л/мин. Индивидуальные максимальные значения в этой группе спортсменов доходили до 7 л/мин. У менее квалифицированных велосипедистов артериальной кровью максимально доставлялось к тканям кислорода около 5,6 л/мин, у легкоатлетов – 4,8±0,2 л/мин, у нетренированных мужчин – 4,4±0,13 л/мин.

Казалось бы, что и значения потребления кислорода могли достигать величин его дос-

тавки кровью, однако в связи с неполной утилизацией  $O_2$  тканями часть его присутствовала в смешанной венозной крови. Коэффициент утилизации, хотя и увеличивался по сравнению с покоем, не превышал 80 %. Артерио-венозное различие по  $O_2$  с 4–5 в покое увеличивалось до 10–15 об.%. В связи с этим в смешанной венозной крови содержание кислорода и степень оксигенации снизились: в группе высококвалифицированных спортсменов – соответственно до  $4,0 \pm 0,3$  об.% и 18,1 %; в группе велосипедистов – до  $3,0 \pm 0,2$  об.% и  $16,4 \pm 1,4$  %; у легкоатлетов – до  $6,7 \pm 0,8$  об.% и  $32,1 \pm 3,3$  %; у нетренированных мужчин – до  $7,1 \pm 0,8$  об.% и  $37,3 \pm 4,53$  %. Скорость транспорта кислорода смешанной венозной кровью не имела больших отличий: она колебалась в пределах 0,8–0,9 л/мин у спортсменов и 1,3–1,5 л/мин – у нетренированных. Особенно низкие ее значения были зарегистрированы у некоторых спортсменов высокого класса – 600 и даже 500 мл/мин. Если учесть, что такая невысокая скорость массопереноса кислорода смешанной венозной кровью обеспечивалась МОК 38–40 л/мин, содержание кислорода здесь составило лишь 2–3 об.%, а степень оксигенации крови – 9–12 %.

Что же лимитировало возможности полной утилизации того кислорода, который доставлялся к тканям и органам? Как свидетельствует анализ каскадов  $PO_2$ , оно в альвеолярном воздухе практически не отличалось от уровня покоя в артериальной крови, хотя и было несколько ниже начального уровня и не падало (судя по средним значениям) ниже 82 мм рт. ст., т.е. не ограничивало возможность утилизации кислорода. Лишь в смешанной венозной крови наблюдалась резкая гипоксемия. Так, у спортсменов высокой квалификации  $PO_2$  было не больше 11 мм рт. ст., что почти на 30 мм рт. ст. ниже, чем в покое (у отдельных спортсменов были отмечены величины  $PO_2$  менее 10 мм рт. ст.). Несколько выше его уровень был у велосипедистов невысокого класса (в среднем  $14,3 \pm 0,75$  мм рт. ст.). У нетренированных мужчин оно составляло  $20 \pm 1,18$  мм рт. ст.

Поскольку напряжение кислорода в смешанной венозной крови достаточно объек-

тивно отражает уровень интенсивности метаболических процессов в мышечных тканях, можно допустить, что при МПК условием, ограничивающим полную утилизацию доставляемого кислорода, было низкое тканевое  $PO_2$ , в связи с чем ухудшались условия для его диффузии в усиленно функционирующих мышечных волокнах.

Особенности дыхания, кровообращения, поэтапной скорости массопереноса и утилизации кислорода тканями при максимальной метаболической активности организма, т.е. при нагрузках, которые сопровождаются МПК, обусловили своеобразие кислородных режимов организма. Общим для всех обследованных оказалось многократное увеличение транспорта кислорода. В легких и альвеолах скорость массопереноса кислорода увеличилась пропорционально его потреблению. Отношение между скоростью массопереноса кислорода и его потреблением уменьшилось в несколько раз.

Так, в легкие спортсменов высокой квалификации поступало в 4,8 раза больше кислорода, чем его потреблялось тканями, к альвеолам – в 3,6 раза больше. Скорость транспорта кислорода артериальной кровью превышала скорость его потребления лишь в 1,3 раза, а часть кислорода, которая транспортировалась смешанной венозной кровью, составила около трети от его потребляемого количества (аналогичные отношения в покое были такими:  $5,35 \pm 0,2$ ;  $3,91 \pm 0,14$ ;  $3,53 \pm 0,34$ ;  $2,53 \pm 0,34$ ). У велосипедистов – кандидатов и мастеров спорта эти отношения были несколько выше:  $4,9 \pm 0,06$ ;  $3,8 \pm 0,07$ ;  $1,18 \pm 0,01$  и  $0,19 \pm 0,01$ . Приблизительно такие же значения наблюдались и у легкоатлетов; у нетренированных мужчин они оказались менее эффективными –  $4,95 \pm 0,03$ ;  $3,62 \pm 0,24$ ;  $1,6 \pm 0,1$ ;  $0,6 \pm 0,07$ .

В связи с тем что скорость массопереноса кислорода определяется в организме прежде всего деятельностью систем внешнего дыхания и кровообращения, были проанализированы изменения экономичности их функционирования. Было установлено, что если экономичность внешнего дыхания изменялась мало, то экономичность функции кровообращения относительно обеспечения ор-

ганизма кислородом значительно выросла. Так, несмотря на предельное увеличение скорости транспорта кислорода артериальной кровью при МПК, каждый его литр использовался тканями из достоверно меньших величин кровотока. Если в покое это потребление осуществлялось из 18–20 л, то при нагрузке с МПК у спортсменов высокой квалификации – из  $6,9 \pm 0,21$  л, у нетренированных мужчин – из  $9,4 \pm 0,51$  л циркулирующей крови.

**Заключение.** Полученные данные свидетельствуют, что при предельной мышечной работе, которая сопровождается МПК, несмотря на увеличение в десятки раз скорости поступления кислорода в легкие и альвеолы, в 7–8 раз – скорости транспорта кислорода артериальной кровью, почти трехкратное повышение степени утилизации кислорода, кислородный запрос не удовлетворяется, образуется кислородный долг, до критических значений снижается  $PO_2$  в тканях и смешанной венозной крови, что свидетельствует о развитии тканевой гипоксии.

1. *Балыкин М. В., Каркобатов Х. Д.* Системные и органые механизмы кислородного обеспечения организма в условиях высокогорья // Российский физиологический журнал. 2012. № 1. С. 127–136.

2. *Балыкин М. В., Пупырева Е. Д., Балыкин Ю. М.* Влияние гипоксической тренировки на физическую работоспособность и функциональные резервы организма спортсменов // Вестник ТвГУ. Сер. «Биология и экология». 2011. Вып. 21. № 2. С. 7–17.

3. *Карпман В. Л., Любина В. Г.* Динамика кровообращения у спортсменов. М. : ФиС, 1982. 135 с.

4. *Карпман В. Л., Меркулова Р. А., Любина В. Г.* Определение минутного объема кровотока у спортсменов методом возвратного дыхания  $CO_2$  // Теория и практика физической культуры. 1974. № 6. С. 69–71.

5. *Ковальский Я., Козеровский А., Радван Л.* Оценка функций легких при заболеваниях дыхательной системы. Варшава, 2008. 428 с.

6. Легкие: Клиническая физиология и функциональные пробы : пер. с англ. / Д. Г. Комро [и др.]. М. : Медгиз, 1961. 196 с.

7. *Мищенко В. С., Лысенко Е. Н., Виноградов В. Е.* Реактивные свойства кардиореспираторной системы как отражение адаптации к напряженной физической тренировке в спорте : монография. Киев : Научный мир, 2007. 351 с.

8. *Осипенко А. А.* Основы биохимии мышечной деятельности : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений физического воспитания и спорта. Киев : Олимпийская лит., 2007. 200 с.

9. *Филлипов М. М.* Условия образования и переноса углекислого газа в процессе мышечной деятельности // Наука в олимпийском спорте. 1994. № 1. С. 73–78.

10. *Филлипов М. М.* Физиологические механизмы регуляции процесса массопереноса респираторных газов, развития и компенсации гипоксии нагрузки при мышечной деятельности : дис. ... д-ра биол. наук. Киев : Ин-т физиологии им. А. А. Богомольца НАН Украины, 1986. 486 с.

11. *Astrand P. O., Rodahl K.* Textbook of Work Physiology: Physiological Bases of Exercise. NY ; St. Louis : McGraw-Hill, 1986. 682 p.

12. *Klausen K.* Comparison of  $CO_2$  rebreathing and acetylene method for cardiac output // J. Appl. Physiol. 1965. Vol. 20. P. 763–766.

13. *Kolchinskaya A. Z., Darsky A. M.* A special protocol for calculating the parameters of body oxygen regimen and computer calculation of hypoxia degree // Hypoxia Medical J. 1993. № 1. P. 10–13.

14. *Siggaard-Andersen A.* The acid-base studies of the blood. Copenhagen : Munksgaard, 1974. 242 p.

## THE CONDITIONS FOR OXYGEN MOVEMENT CHANGE AT MAXIMUM EXERCISE

M.M. Filippov

National University of Physical Education and Sports of Ukraine, Kiev

The experimental results found in this article provide us with the information on how, and to which degree, the human body's need for oxygen is satisfied when increasing the metabolic activity of the muscles to maximum; It shows how the conditions for oxygen movement change as well.

**Keewords:** athletes, maximal exercise, the oxygen regime, oxygen mass transfer.