

**УДК 612.223. 612.766.1**

## **ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ МЫШЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ**

*Найдич С.И.*

*РВУЗ «Крымский инженерно-педагогический университет», Симферополь, Украина  
E-mail: tournesi@rambler.ru*

Выявлено, что повышение содержания кислорода во вдыхаемом воздухе во время интенсивной мышечной работы приводит к увеличению функциональных возможностей внешнего дыхания, главным образом, за счет улучшения диффузионной способности легких. Добавление небольшой концентрации углекислого газа в кислородосодержащую газовую смесь снижает стимулирующий эффект кислорода, однако способствует меньшему расходованию эндогенной углекислоты по сравнению с работой в обычных условиях.

**Ключевые слова:** мышечная деятельность, внешнее дыхание, работоспособность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение проблемы сохранения высокой физической работоспособности человека в экстремальных условиях его жизнедеятельности составляет одно из актуальных направлений научных исследований в современной физиологии и спортивной медицины. Как известно, одной из основных физиологических систем организма, определяющих уровень его работоспособности, является дыхательная система [1, 2]. Поэтому, изучение функций внешнего дыхания во время мышечной деятельности является актуальным вопросом спортивной практики. Кроме того, исследование реакций человеческого организма во время интенсивной мышечной деятельности в условиях измененной газовой среды, позволит выявить как факторы определяющие уровень работоспособности, так и способы ее повышения.

Изучение функций внешнего дыхания человека в условиях измененной газовой среды наиболее полно проводилось лишь в состоянии относительного покоя [1–3]. Во время мышечной деятельности подобные исследования представлены немногими авторами, а их результаты противоречивы. Одни авторы [4], отмечали уменьшение легочной вентиляции и повышение потребления кислорода при нагрузках умеренной мощности в условиях гипероксии (45% кислорода), другие показали, что вдыхание смеси воздуха с повышенным содержанием кислорода не оказывало влияния на потребление кислорода [5]. Не было зарегистрировано достоверных различий объема легочной вентиляции и потребления кислорода во время ингаляции гипероксической газовой смесью (70% O<sub>2</sub>) во время работы на велоэргометре умеренной мощности [6]. Мышечная деятельность в условиях

гиперкапнии также изучалась сравнительно мало [3, 4, 7], а исследования в условиях гиперкапнии-гипероксии и вовсе были единичными [8, 9]. Одним из научно обоснованных подходов к решению данной задачи является изучение реакций человеческого организма во время интенсивной мышечной деятельности в условиях измененной газовой среды, что позволяет выявить как факторы определяющие уровень работоспособности, так и способы ее повышения

С целью более полного изучения реакций внешнего дыхания организма человека во время интенсивной мышечной деятельности в условиях измененной газовой среды и были проведены настоящие исследования.

#### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В исследованиях принимали участие 14 велосипедистов высокой квалификации (от первого разряда до мастеров спорта) в возрасте  $18,6 \pm 1,8$  лет, ростом  $171,8 \pm 2,2$  см, массой тела  $63,4 \pm 2,6$  кг, имеющих жизненную емкость легких (ЖЕЛ)  $4966,0 \pm 244$  мл, максимальное потребление кислорода (МПК) -  $70,6 \pm 1,8$  мл/мин/кг, значение порога анаэробного обмена (ПАНО) -  $68,2 \pm 3,2\%$  от МПК. После проведения 4 тренировочных занятий на велоэргометре все они были включены в программу исследований. Было проведено 3 серии исследований. В I серии определяли данные в естественных атмосферных условиях. Во II серии обследуемые лица дышали газовой смесью, содержащей 1 %  $\text{CO}_2$  и 34 %  $\text{O}_2$ . В III серии применяли гипероксическую газовую смесь (34 %  $\text{O}_2$ ). Спортсмены выполняли работу на велоэргометре ВЭ-02 со ступенчато-возрастающей (каждая ступенька 3 минуты) мощностью до полного утомления. Во всех обследованиях функции внешнего дыхания изучались в открытой системе методом Дугласа-Холдена. С помощью химического газоанализатора определяли концентрацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в выдыхаемом и альвеолярном воздухе. По общепринятой методике рассчитывали потребление кислорода, выделение углекислого газа, дыхательный коэффициент, парциальное давление углекислого газа и кислорода в альвеолярном воздухе. Дыхательные объемы приводились к альвеолярным условиям (BTPS), а показатели газообмена – к условиям стандартной атмосферы (STPD).

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Интенсивная мышечная деятельность работа вызывала закономерные приспособительные реакции со стороны внешнего дыхания, направленные на обеспечение повышенной потребности организма в кислороде. С добавлением во вдыхаемый воздух различных концентраций кислорода и углекислого газа проявлялись специфические физиологические особенности в деятельности аппарата внешнего дыхания. Динамика показателей частоты дыхания, дыхательного объема и легочной вентиляции у спортсменов во время мышечной деятельности в разных газовых средах показана в табл. 1.

Таблица 1

Динамика показателей частоты дыхания ( $f$ ), дыхательного объема ( $VT$ ) и минутного объема дыхания ( $МОД$ ) во время работы на велоэргометре в разных газовых средах

Показатели	Условия	50 ватт	100 ватт	150 ватт	200 ватт	250 ватт	300 ватт	350 ватт
$f$ , ц/мин	20,9% $O_2$	17,2±0,1	21,1±0,3	25,1±0,4	30,1±0,4	35,1±0,4	45,2±0,8	59,5±0,9
	34% $O_2$	16,8±0,2	18,7±0,2	*20,2±0,3	*25,2±0,5	*30,0±0,5	*38,4±0,7	*52,2±0,8
	1% $CO_2$ + 34% $O_2$	17,1±0,2	19,0±0,2	*21,8±0,4	27,1±0,5	*31,1±0,4	43,2±0,8	55,1±0,9
$VT$ , мл	20,9% $O_2$	1209±18	1498±22	1757±30	1874±39	1954±46	1977±54	1965±75
	34% $O_2$	1179±16	*1355±20	1792±29	*1988±42	2080±51	2094±62	*2107±71
	1% $CO_2$ + 34% $O_2$	1175±18	1468±21	1862±32	1923±40	2032±53	2028±64	2056±79
$МОД$ , л/мин	20,9% $O_2$	20,8±0,1	31,6±0,2	44,1±0,4	56,4±0,7	68,6±0,8	87,1±0,9	116,9±1,0
	34% $O_2$	19,8±0,2	*26,7±0,2	*38,0±0,5	*50,1±0,9	*62,4±0,8	*80,6±0,9	*110,2±0,9
	1% $CO_2$ + 34% $O_2$	20,1±0,2	*27,9±0,3	*40,6±0,5	*52,1±0,6	*63,2±0,9	87,6±1,1	113,3±1,1

Примечания: \* – различия статистически достоверны по сравнению с обычными условиями

Как видно из таблицы, достоверные различия исследуемых параметров проявлялись при нагрузке 150 ватт. По сравнению с мышечной деятельностью в обычных условиях во время дыхания гипероксической и гиперканически-гипероксической смесями отмечалось снижение частоты дыхания: с 25,1±0,4 до 20,2±0,3 ( $p<0,01$ ) и 21,8±0,4 ( $p<0,05$ ) ц/мин, уменьшение объема легочной вентиляции – с 44,1±0,4 до 38,0 ± 0,5 ( $p<0,01$ ) и 40,6 ± 0,5 ( $p<0,05$ ) л/мин, соответственно. Схожее влияние измененной газовой среды на показатели внешнего дыхания спортсменов наблюдалось и при дальнейшем повышении интенсивности нагрузки.

При рассмотрении динамики легочной вентиляции во время работы на велоэргометре в разных газовых средах, показанной на рис. 1, видно, что гипероксическая газовая смесь достоверно уменьшала минутный объем дыхания по сравнению с условиями нормоксии. Так, при нагрузке 300 ватт, объем легочной вентиляции был меньше на 8,1% ( $p<0,01$ ), а при нагрузке 350 ватт – на 6,3 % ( $p<0,05$ ). Дыхание воздухом с повышенным содержанием кислорода и углекислого газа уменьшало минутный объем дыхания ( $МОД$ ) только при нагрузках умеренной мощности, при мощности 300 и 350 ватт различия были недостоверны.

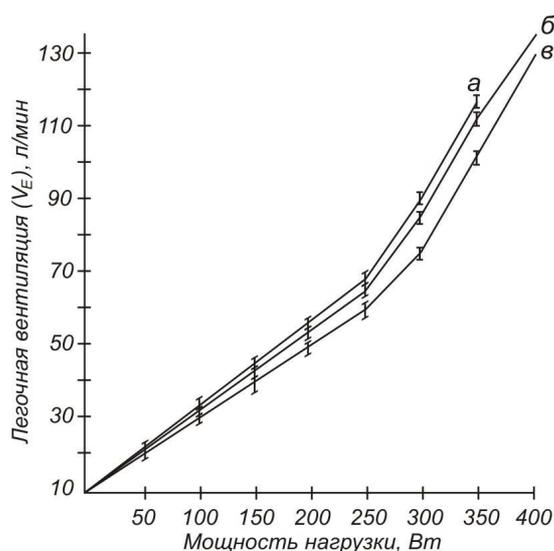


Рис. 1. Динамика легочной вентиляции у спортсменов во время работы на велоэргометре при дыхании разными газовыми смесями  
 а – при дыхании обычным атмосферным воздухом;  
 б – при дыхании смесью 1% CO<sub>2</sub> + 34% O<sub>2</sub>;  
 в – при дыхании смесью 34% O<sub>2</sub>

Таким образом, повышение концентрации кислорода во вдыхаемом воздухе во время интенсивной мышечной деятельности оказывало стимулирующее влияние на систему внешнего дыхания, поскольку снижение вентиляторной реакции на физическую работу одинаковой мощности является признаком экономизации деятельности аппарата внешнего дыхания, что в свою очередь может способствовать повышению физической работоспособности человека. Кроме того, кислородосодержащая газовая смесь изменяла и уровень функциональной активности легочной вентиляции в соответствии с интенсивностью мышечной работы. Как видно из рисунка 1, экспоненциальное возрастание МОД в условиях гипероксии проявлялось при нагрузке 350 ватт, в то время как в обычных и гиперкапнически-гипероксических условиях – при нагрузке 300 ватт. Отмеченное более позднее наступление гипервентиляции легких также могло являться одним из факторов, повышающих уровень физической работоспособности при интенсивных мышечных нагрузках.

С добавлением в кислородосодержащую газовую смесь 1% углекислого газа благоприятный эффект кислорода снижался. Это выражалось, прежде всего, в том, в условиях интенсивных физических нагрузок частота дыхания, дыхательный объем и минутный объем дыхания достоверно не различались, а их экспоненциальный рост начинался на том же уровне нагрузки, что и в обычных условиях.

Функциональное состояние системы внешнего дыхания неразрывно связано с характером метаболических процессов в организме. В табл. 2 представлены изменения

дыхательного коэффициента и неметаболического излишка CO<sub>2</sub> при работе на велоэргометре до полного утомления в разных газовых средах. Различия в величинах дыхательного коэффициента проявлялись уже при нагрузке 50 ватт. В условиях гипероксии по сравнению с обычными условиями он уменьшался с 0,792±0,01 до 0,736±0,01 отн. ед. (p<0,01), а при нагрузке 350 ватт соответствующие значения составляли 0,794±0,01 до 0,950±0,01 отн. ед. (p<0,01). Схожая тенденция отмечалась и в отношении воздействия гиперкапнически-гипероксической газовой смеси.

В соответствии с динамикой дыхательного коэффициента происходило и выделение неметаболического излишка CO<sub>2</sub>. При работе в обычных условиях оно начиналось при нагрузке 100 ватт, в то время как в условиях гиперкапнии-гипероксии – при нагрузке 200 ватт, а в гипероксической среде – при нагрузке 250 ватт.

**Таблица 2**

**Динамика дыхательного коэффициента (R) и неметаболического излишка CO<sub>2</sub> (ExcCO<sub>2</sub>) у спортсменов во время работы на велоэргометре в разных газовых средах**

Показатели	Условия	50 ватт	100 ватт	150 ватт	200 ватт	250 ватт	300 ватт	350 ватт
<b>R,</b> отн. ед	20,9% O <sub>2</sub>	0,792± 0,01	0,818± 0,01	0,836±0, 01	0,851± 0,01	0,880± 0,01	0,926± 0,01	0,974±0,01
	34% O <sub>2</sub>	*0,736± 0,01	*0,750± 0,01	*0,776± 0,01	*0,800± 0,01	*0,835± 0,01	*0,875± 0,01	*0,934±0,01
	1% CO <sub>2</sub> + 34% O <sub>2</sub>	*0,756± 0,01	*0,771± 0,01	*0,798± 0,01	*0,821± 0,01	*0,850± 0,01	*0,908± 0,01	*0,950±0,01
<b>ExcCO<sub>2</sub>,</b> мл/мин	20,9% O <sub>2</sub>	—	24±9	63±11	111±26	202±39	366±58	616±94
	34% O <sub>2</sub>	—	—	—	—	*88±19	*227±43	*491±62
	1% CO <sub>2</sub> + 34% O <sub>2</sub>	—	—	—	*46±11	*127±34	333±49	*547±78

*Примечания:* \* – различия статистически достоверны по сравнению с обычными условиями

Таким образом, в условиях гипероксической газовой среды по сравнению с обычным воздухом повышение функциональных возможностей аппарата внешнего дыхания сопровождалось меньшим увеличением дыхательного коэффициента на протяжении всего периода работы на велоэргометре и началом выделения неметаболического излишка CO<sub>2</sub> при большей мощности физической нагрузки, что свидетельствует о более позднем включении анаэробных механизмов энергообеспечения. Дыхание гиперкапнически-гипероксической газовой смесью не изменило момент наступления порога анаэробного обмена (ПАНО), так как непропорциональное увеличение дыхательного коэффициента и связанное с ним значительное выделение буферного излишка CO<sub>2</sub> происходило при той же мощности нагрузки, что и во время мышечной деятельности в обычных условиях.

Проведенные исследования показали, что во время мышечной деятельности в среде с повышенным содержанием кислорода отмечалась меньшая величина минутного объема дыхания и частоты дыхания по сравнению с обычными условиями. В литературе показано, что такая реакция со стороны внешнего дыхания

является физиологически оправданной и связана с уменьшением гипоксической стимуляции артериальных хеморецепторов [10, 11], что в свою очередь приводит к снижению возбудимости дыхательного центра и уменьшению объема легочной вентиляции. Однако в отношении реакций внешнего дыхания при гипероксии во время мышечной работы эти явления зависят от интенсивности нагрузки. Если при нагрузках умеренной мощности большинство исследователей отмечали снижение МОД [12, 13], то при максимальных нагрузках результаты противоречивы: наряду с уменьшением легочной вентиляции [14], различий не наблюдалось [15]. В наших исследованиях достоверные различия объема легочной вентиляции по сравнению с обычными условиями проявлялись при нагрузках средней мощности и сохранялись вплоть до максимальных. При этом отмечался одинаковый по сравнению с условиями нормоксии уровень потребления кислорода, однако, процентная величина его утилизации была достоверно выше. Это свидетельствует о возросшей эффективности дыхания, что, по-видимому, способствовало проявлению функциональной недостаточности внешнего дыхания позже, чем в обычных условиях – при нагрузке 300 и 250 ватт, соответственно. Кроме того, в условиях гипероксии отмечалось повышение величины максимального потребления кислорода по сравнению с обычными условиями на 22,6% ( $p < 0,01$ ) вследствие чего закритический режим мышечной работы наступал позже, а кислородный дефицит был меньше.

Во время интенсивной мышечной деятельности в условиях гиперкапнии-гипероксии не наблюдалось достоверных различий в показателях частоты дыхания и объема легочной вентиляции по сравнению с обычными условиями, хотя показано [3], что физическая работа усиливает реакции дыхания на гиперкапнию. Одинаковый вентиляторный ответ связан, по-видимому, с тем, что повышение содержания кислорода в гиперкапнической газовой смеси уменьшает значение хеморецепторов синокаротидной зоны в их реакции на  $\text{CO}_2$  по сравнению с непосредственным действием углекислоты [12]. Во время дыхания газовой смесью с повышенным содержанием кислорода и углекислого газа при нагрузках субмаксимальной и максимальной мощности процентная величина утилизации кислорода достоверно не различалась с  $\text{FEO}_2$  во время работы в обычных условиях, вследствие чего, функциональные возможности внешнего дыхания не повышались. Тем не менее, объем выполненной работы возрос на 10,7% ( $p < 0,01$ ). Наблюдаемый прирост работоспособности был обусловлен, скорее всего, следующими причинами. Во-первых, во время мышечной работы в условиях гиперкапнии-гипероксии при одинаковых по сравнению с нормоксией мощностях нагрузках, дыхательный коэффициент был меньше, а парциальное давление углекислого газа в выдыхаемом воздухе – больше, то есть, повышенная концентрация  $\text{CO}_2$  во вдыхаемом воздухе в определенной мере уменьшала расходование эндогенной углекислоты, что, в свою очередь, способствовало менее глубоким биохимическим сдвигам внутренней среды. В пользу этого суждения свидетельствуют показатели КОС артериальной крови после работы на велоэргометре – несмотря на большой объем работы по сравнению с обычной газовой средой в условиях гиперкапнии-гипероксии, величины рН и концентрации нелетучих кислот достоверно не различались.

Физиологический эффект меньшего расходования эндогенного CO<sub>2</sub> можно объяснить его «запиранием» углекислым газом, поступающим извне [13, 16]. Кроме того, стимулирующее влияние углекислого газа на физическую работоспособность могло проявиться в его способности усиливать кровообращение и изменять тонус сосудов [17, 18]. Так, в наших исследованиях при нагрузке 350 ватт (максимальной), частота сердечных сокращений в среде, содержащей 1% CO<sub>2</sub>+34% O<sub>2</sub> по сравнению с обычной средой составляла 184,1±0,9 и 190,2±0,8 уд/мин (p< 0,05), а кислородный пульс – 20,5±0,5 и 18,3±0,4 мл/уд (p<0,05), соответственно.

### ВЫВОДЫ

1. Повышение содержания кислорода во вдыхаемом воздухе во время интенсивной мышечной работы приводит к увеличению функциональных возможностей внешнего дыхания, главным образом, за счет улучшения диффузионной способности легких. Этот фактор способствует повышению физической работоспособности на 20,0% (p<0,01).
2. Добавление небольшой концентрации углекислого газа в кислородосодержащую газовую смесь снижает стимулирующий эффект кислорода, однако способствует меньшему расходованию эндогенной углекислоты по сравнению с работой в обычных условиях. Вследствие этого, работоспособность достоверно возрастает на 10,7% (p<0,01). Это подтверждает важную физиологическую роль метаболической углекислоты в проявлении физической работоспособности человека при интенсивной мышечной деятельности.

### Список литературы

1. Агаджанян Н.А. Гипоксические, гипокпапнические и гиперкапнические состояния / Н.А. Агаджанян, А.Л. Чижов – М.: Медицина, 2003. – 96 с.
2. Агаджанян Н.А. Функции организма в условиях гипоксии и гиперкапнии / Н.А. Агаджанян, А.И. Елфимов – Москва: Медицина, 1986. – 269 с.
3. Бреслав И.С. Регуляция дыхания / И.С. Бреслав, В.Д. Глебовский – Ленинград: Наука, 1980 – 280 с.
4. Михайлов В.В. Дыхание спортсмена / Михайлов В.В. – Москва: ФИС, 1983. – 103 с.
5. Фомичев А.В. Регуляция гипоксемических состояний при работе разной интенсивности и тренировке / А.В. Фомичев // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 1943. – Т.16. – Вып.6., № 12. – С.34–36.
6. Низовцев В.П. К вопросу выявления «дефицита кислорода» и оценка этого показателя в диагностике сердечной и легочной недостаточности / В.П. Низовцев, В.В. Косарев // Актуальные вопросы теории и практики медицинской науки. – Уфа, 1970. – С. 127–130.
7. Агаджанян Н.А. Оценка функционального состояния спортсмена в условиях измененной газовой среды / Н.А. Агаджанян, Н.П. Красников // Теория и практика физической культуры. – 1985. – № 3. – С. 19–21.
8. Красников Н.П. Значение газообменной функции легких и кислотно-основного состояния крови в механизме повышения работоспособности и развития мышечного утомления : автореферат дисс. на соиск. научн. степ. док. биол. наук / Красников Н.П. – М., 1995. – 37 с.
9. Найдич С.И. Исследование функций внешнего дыхания при интенсивной мышечной деятельности в условиях нормоксии, гипероксии и гиперкапнии –гипероксии : автореферат дисс. на соиск. научн. степ. канд. биол. наук / С.И. Найдич – Москва, 1988. – 32 с.

10. Жиронкин А.Г. Газовый референдум и адекватная для организма газовая среда / А.Г. Жиронкин, И.С. Бреслав // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 1968. – №1. – С.58–66.
11. Lambertsen C. Respiration / Lambertsen C. – L.: Medical Physiology, 1961. – 24 p.
12. Низовцев В.П. Некоторые механизмы воздействия кислородных смесей на легочную вентиляцию / В.П. Низовцев, Л.И. Уксусова // Действие измененной газовой среды на живой организм. – Сыктывкар, 1981. – С.48–60.
13. Агаджанян Н.А. Организм и газовая среда обитания / Агаджанян Н.А. – Москва: Медицина, 1972. – 246 с.
14. Asmussen E. Pulmonary ventilation and effect of oxygen breathing in heavy exercise / E. Asmussen, M. Nielsen – Acta physiol. Scand. – 1958. – Vol.48. – P.365–371.
15. Kaijser J. Limiting factors for aerobic muscle performance / J. Kaijser / Acta physiol. Scand. – 1970. – Supply. 346. – P. 131–142.
16. Низовцев В.П. Скрытая дыхательная недостаточность и ее моделирование / Низовцев В.П. – Москва: Медицина, 1978. – 275 с.
17. Саноцкая Н.В. Влияние углекислоты на напряжение кислорода в мозге и скелетной мышце при острой гипоксии / Саноцкая Н.В. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 1962. – № 9. – С. 46–50.
18. Коваленко Е.А. Кислород тканей при экстремальных факторах полета / Е.А. Коваленко, И.Н. Черняков – Москва: Наука, 1972. – 263 с.

**Найдич С.И. Динаміка показників зовнішнього дихання людини під час м'язової діяльності в умовах зміненого газового середовища / С.И. Найдич // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2013. – Т. 26 (65), № 1. – С. 121-128.**

Виявлено, що підвищення вмісту кисню у вдихуваному повітрі під час інтенсивної м'язової роботи призводить до збільшення функціональних можливостей зовнішнього дихання, головним чином, за рахунок поліпшення дифузійної здатності легенів. Додавання невеликої концентрації вуглекислого газу в кисневу газову суміш знижує стимулюючий ефект кисню, проте сприяє меншому втрачання ендогенної вуглекислоти в порівнянні з роботою в звичайних умовах.

**Ключові слова:** мускульна діяльність, зовнішнє дихання, працездатність.

**Naidych S.I. Dynamics of indexes of the external breathing of man during muscular activity in the conditions of the changed gas environment / S.I. Naidych // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2013. – Vol. 26 (65), No. 1. – P. 121-128.**

It is reduced, that the increase of maintenance of oxygen in respirable air during intensive muscular work results in the increase of functional possibilities of the external breathing, mainly, due to the improvement of diffusive ability of lungs. Adding of small concentration of carbon dioxide to кислородосодержащую gas mixture reduces the stimulant effect of oxygen, however assists the less expense of endogenous carbonic acid as compared to work in ordinary terms.

**Keywords:** muscular activity, external breathing, capacity.

*Поступила в редакцію 14.02.2013 г.*