

УДК 612.017.2+612.273+612.766.1:796

## **ТИПЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ И СПЕЦИФИКА ПРОЯВЛЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПОРТСМЕНОВ**

**Е.Н. Лысенко**

Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, Киев

На основании исследований характера реакций системы дыхания (СД) на гиперкапнию у 54 квалифицированных спортсменов (бегунов на 100, 800 и 5000 м) проанализированы особенности физиологической реактивности системы дыхания на сдвиги дыхательного гомеостаза, отражающие различную направленность долговременной адаптации (спортивной тренировки). С помощью таксономического анализа выделены типы индивидуальных реакций организма квалифицированных спортсменов на основе характера реагирования СД на гиперкапнические сдвиги дыхательного гомеостаза в состоянии покоя, которые обусловлены спортивной специализацией.

**Ключевые слова:** гиперкапния, реактивность, система дыхания, высококвалифицированные спортсмены.

**Введение.** Известно, что способность человека противостоять экстремальным факторам в значительной степени зависит от индивидуальных особенностей физиологической реактивности организма, скорости вовлечения и эффективности механизмов срочной адаптации [1; 3; 9; 10]. Механизмы адаптации при различных воздействиях имеют как общие, так и индивидуальные черты. Напряженная физическая нагрузка характеризуется выраженными гипоксическими явлениями в организме. Регулярная повторяемость реакций компенсации гипоксии в процессе ряда лет спортивной тренировки определенным образом изменяет общую реакцию организма на действие различных факторов [8; 9; 12; 15]. Такие изменения сочетают в себе как влияние указанных факторов, так и индивидуальные наследственные свойства реагирования. Такой индивидуальный характер реагирования показан для гуморальных стимулов и характера энергетического метаболизма (вовлечение аэробных и анаэробных процессов), которые взаимосвязаны со спецификой мышечных волокон и нервно-мышечного аппарата в целом, включая его афферентацию [7; 9; 11]. Такие различия связаны также с особенностями вегетативного баланса, а также индивидуальными характеристиками высшей нервной деятельности. Показано, что на основе оценки характеристик реакции функциональных систем организма на внешние раздражители и сдвиги гомеостаза, всех людей условно можно разделить на лиц с гиперреактивным, гипореактивным или нормореактивным типом реакции [3;9;12]. Вместе с тем, до сих пор

нет достаточно обоснованных маркеров и критериев для определения указанных типов реакций.

Гиперкапническая стимуляция системы дыхания (СД), опосредованная хеморецепторами, как известно, является основным механизмом, который устанавливает соответствие легочной вентиляции интенсивности метаболических процессов в организме. Показано, что чувствительность к гиперкапническим ( $\text{CO}_2\text{-H}^+$ ) сдвигам дыхательного гомеостаза может отражать общую физиологическую реактивность. Она связана со скоростью и уровнем реакции СД на действие раздражителей различного характера, в том числе и физической нагрузки [3; 7;8; 12]. При формировании методических подходов в данном исследовании исходили из того, что одним из основных регуляторов системы дыхания выступает  $\text{CO}_2\text{-H}^+$ -стимул и поэтому влияние многих факторов, стимулирующих дыхание у человека, может быть описано изменением реакции на  $\text{CO}_2\text{-H}^+$ -стимул [1; 5; 6; 10].

В процессе многолетней спортивной тренировки направленность такой тренировки во многом определяется спецификой реализации энергетических возможностей в конкретных условиях деятельности при различной длительности соревновательной дистанции. Это предполагает существенную роль начальной кинетики реакций энергообеспечения работы и ее модификацию, как элемент оптимизации физиологической реактивности в процессе адаптации у спортсменов различной специализации. Исходили из того, что, используя различные дисциплины спорта как модель определенного вида деятельности человека, можно определить диапазон и характер различий физиологической реактивности СД, связанный со спецификой долговременной адаптации. Такие различия должны отражать особенности реализации энергетических и функциональных возможностей человека в условиях физических нагрузок.

Цель – охарактеризовать особенности реакции СД на гиперкапнические сдвиги дыхательного гомеостаза и на этой основе выделить типы физиологической реакции системы у квалифицированных спортсменов, длительно специализировавшихся в легкоатлетическом беге на дистанциях различной продолжительности.

**Методика.** В исследованиях приняли участие 54 квалифицированных легкоатлета со спортивным разрядом КМС и МС в возрасте 19-24 лет, которые в течение 5-8 лет специализировались в беге на 100 м ( $n=19$ ), на 800 м ( $n=15$ ) и на 5000 м ( $n=16$ ). Физиологическую реактивность СД оценивалась на основании измерений чувствительности и устойчивости реакций легочной вентиляции ( $\dot{V}_E$ ), частоты сердечных сокращений (ЧСС) и сердечного ритма на гиперкапнические ( $\text{CO}_2\text{-H}^+$ ) и гипоксические сдвиги дыхательного гомеостаза в состоянии покоя. Гипоксическая стимуляция (в изокапнических условиях) создавалась методом

возвратного дыхания [7; 8; 13] в диапазоне снижения  $P_{A}O_2$  от 120 до 45 мм рт.ст. Прогрессирующую гиперкапническую стимуляцию на фоне повышенного содержания  $O_2$  (около 50%) в газовой смеси создавали методом возвратного дыхания [13; 17]. Оценивался наклон линии зависимости  $\dot{V}_E - P_{A}CO_2$ , отражающий величину прироста легочной вентиляции на 1 мм рт.ст. увеличения  $P_{A}CO_2$  и характеризующий чувствительность реакции к гиперкапнии. Экстраполированная точка пересечения линии  $\dot{V}_E - P_{A}CO_2$  с осью абсцисс (точка "апноэ") характеризовала порог вентиляторной реакции на  $CO_2$ . Структуру вентиляторного ответа оценивали по соотношению Хью-Эйлера, описывающего зависимость между легочной вентиляцией и дыхательным объемом с помощью наклона линии  $\dot{V}_E - V_T$  (M или  $\Delta \dot{V}_E / \Delta V_T$ ) и точки ее пересечения с осью абсцисс (K - порог реакции рецепторов растяжения легких). Обработка данных проводилась по специально разработанному алгоритму [7;8].

Показатели реакции СД регистрировались в реальном масштабе времени (breath by breath) с помощью автоматизированного эргоспирометрического комплекса «Охусон Pro» ("Jaeger", Германия). Определяли легочную вентиляцию ( $\dot{V}_E$ ), частоту дыхания ( $f_T$ ), дыхательный объем ( $V_T$ ), концентрацию  $CO_2$  и  $O_2$  в выдыхаемом ( $F_{E}O_2$ ,  $F_{E}CO_2$ ) и в альвеолярном воздухе ( $F_{A}O_2$ ,  $F_{A}CO_2$ ), потребление  $O_2$  ( $VO_2$ ), выделение  $CO_2$  ( $VCO_2$ ), частоту сердечных сокращений (ЧСС  $уд \cdot мин^{-1}$ ). Учитывая, что измерения проводились в открытой системе, показатели внешнего дыхания приведены к условиям BTPS, а газообмена - к условиям STPD. Статистическую обработку результатов проводили с использованием компьютерной программы Microsoft Excel с определением основных статистических показателей. Для систематизации индивидуальных реакций организма на прогрессирующую гиперкапнию использовали метод таксономического анализа.

**Результаты и обсуждение.** Применение алгоритма таксономии путем объединения в один таксон (группу) лиц, наиболее подобно реагировавших на указанный стимул (по величине и интенсивности реакций СД), позволило выделить три типа реагирования на  $CO_2$ - $H^+$ -стимул. Классификация индивидуальных реакций на гипоксический стимул не дала четких результатов для выделения групп спортсменов по типу реагирования.

Зависимость между приростом  $P_{A}CO_2$  в условиях гиперкапнии и увеличением легочной вентиляции (чувствительность реакции) у спортсменов с различным типом реагирования - наиболее выраженная реакция отмечалась в группе спортсменов с I типом реагирования. У спортсменов данной группы "коэффициент усиления" реакции, то есть ее увеличение по приросту  $P_{A}CO_2$  на 1 мм рт.ст. ( $\Delta \dot{V}_E / \Delta P_{A}CO_2$ ),

составлял  $2,27 \pm 0,16$  л·мин<sup>-1</sup>мм рт.ст.<sup>-1</sup>. У спортсменов с III типом реагирования отмечался достоверно сниженный "коэффициент усиления" вентиляторной реакции ( $1,09 \pm 0,14$  л·мин<sup>-1</sup>мм рт.ст.<sup>-1</sup>) относительно спортсменов других групп. Для спортсменов со II типом реагирования отмечался средний уровень этого показателя ( $1,59 \pm 0,11$  л·мин<sup>-1</sup>мм рт.ст.<sup>-1</sup>,  $p < 0,05$ ). Эти данные могут составить начальную основу для дифференциации норм физиологической реактивности системы дыхания у спортсменов. Сравнение этих данных с данными для специально не тренированных людей данного возраста [4;15] также указывает на большой диапазон индивидуальных различий, как и в обследованных спортсменах.

Достоверные различия между группами спортсменов отмечались не только по "коэффициенту усиления" реакции вентиляции, но и по ее порогу (точка "апноэ"). Так, у спортсменов с первым типом реагирования отмечалась достоверно более низкая величина  $P_{ACO_2}$  точки «апноэ» –  $31,3 \pm 0,9$  мм рт.ст. по сравнению со спортсменами второго ( $35,4 \pm 0,9$  мм рт.ст.) и третьего ( $36,6 \pm 0,8$  мм рт.ст.) типов реагирования ( $p < 0,05$ ). Как видно из сравнения указанных на рисунке групп спортсменов, снижение  $\Delta V_E / \Delta P_{ACO_2}$  сопровождалось повышением порога вентиляторной реакции на  $CO_2$ . Это особенно четко видно при сравнении спортсменов I и III типов реагирования. Подобные данные могут свидетельствовать о расширении зоны нечувствительности медулярных хеморецепторов к  $CO_2$ - $H^+$ -стимул у спортсменов определенных специализаций [5;7;8;9;14;16]. Обращает на себя внимание тот факт, что уровень  $P_{ACO_2}$ , при котором прекращалось возвратное дыхание  $CO_2$  через трудно переносимые субъективные ощущения был достоверно более низким ( $53,31 \pm 1,04$  мм рт.ст.) у спортсменов первого типа реагирования, чем у спортсменов второго ( $59,08 \pm 3,21$  мм рт.ст.) и третьего ( $58,71 \pm 2,04$  мм рт.ст.) типов.

Существуют данные, что долговременная адаптация спортсменов к высокоинтенсивным тренировочным нагрузкам с преимущественно анаэробным гликолитическим энергообеспечением приводит к смещению линии зависимости  $\dot{V}_E - P_{ACO_2}$  "вправо" [6; 8; 9;14]. Такие изменения связывают с увеличением способности задержки  $CO_2$  в организме и накоплением недоокисленных продуктов обмена, что может быть фактором повышения работоспособности при подобных нагрузках. В основе указанных изменений и повышения порога вентиляторной реакции на  $CO_2$  должны лежать определенные приспособления регуляции дыхания к повышенному содержанию эндогенной углекислоты, ионов водорода во время напряженной физической нагрузки. Полученные в данном исследовании данные показывают, что пониженный уровень чувствительности СД в сочетании с высоким порогом вентиляторной реакции на  $CO_2$  отличал

спортсменов-бегунов на дистанции 5000 м ( $p < 0,05$ ). Эта дистанция предъявляет наиболее высокие требования к реализации аэробных возможностей в сочетании с анаэробными гликолитическими. Одновременно она характеризуется наибольшим суммарным объемом вывода "неметаболического"  $\text{CO}_2$  в процессе преодоления дистанции, отражающего интенсивность процесса дыхательной компенсации метаболического ацидоза [8; 12].

Более высокая реактивность СД спортсменов первого типа реагирования характеризовалась также более выраженной реакцией ЧСС на 1 мм рт.ст. увеличение  $P_{\text{A}}\text{CO}_2$ , а также величинами  $\dot{V}_{\text{E}}$  и ЧСС при стандартных уровнях гиперкапнической стимуляции ( $P_{\text{A}}\text{CO}_2$  50 мм рт.ст.) (таблица). Эти показатели у спортсменов I типа реагирования были достоверно более высокими, чем у спортсменов III типа. Различия реакций СД у спортсменов разного типа видно также по структуре вентиляторной реакции, обусловленной механизмами саморегуляции дыхания. Так, для спортсменов с I типом реагирования уровень легочной вентиляции при стандартной величине дыхательного объема 2 литра ( $\dot{V}_{\text{E}2\text{л}}$ ) был достоверно выше ( $507,3 \pm 37,1$  мл·кг<sup>-1</sup>·мин<sup>-1</sup>), чем у спортсменов со II и III типом реагирования ( $p < 0,05$ ). Для I типа реагирования был характерен и более высокий, чем при III типе реагирования, прирост легочной вентиляции на единицу увеличения дыхательного объема ( $\Delta \dot{V}_{\text{E}} / \Delta V_{\text{T}}$ ), что свидетельствовало о повышенной чувствительности рефлекса Геринг-Брейера.

При анализе изменения дыхательной аритмии сердечных сокращений в процессе нарастающей степени гиперкапнии руководствовались данными, что зависимость дыхательной аритмии сердечного ритма (ДА) от напряжения  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе позволяет оценить одну из сторон устойчивости регуляции сердечного ритма [7]. Исследования показали, что в определенном диапазоне  $P_{\text{A}}\text{CO}_2$  у всех спортсменов наблюдалось близкое к линейному нарастанию дыхательной аритмии сердечного ритма (таблица). При достижении определенного индивидуального уровня  $P_{\text{A}}\text{CO}_2$  начиналось снижение ДА. Как видно из таблицы,  $P_{\text{A}}\text{CO}_2$  начала снижения ДА сердечного ритма у спортсменов с III типом реагирования была достоверно выше, чем у спортсменов с I и II типами реагирования. Такое снижение может указывать на исчерпание определенных факторов обеспечения устойчивости эффективной регуляции, главным образом, через активизацию симпатического канала такой регуляции. При этом нарастает «цена» регуляции и адаптации в целом [7; 8; 16]. Таким образом, высокая устойчивость регуляции сердечного ритма в условиях гиперкапнии отмечалась у спортсменов с III типом реагирования и самая низкая - у спортсменов с I типом. У последних отмечались также и достоверно меньшие величины максимума ДА ( $\text{DA}_{\text{max}}$ ) и дыхательной

аритмии сердечного ритма при  $P_{A}CO_2$  50 мм рт.ст. ( $DA_{50}$ ), что может свидетельствовать о более раннем увеличении симпатических влияний в регуляции сердечного ритма при нарастании ацидотических изменений внутренней среды организма.

Т а б л и ц а

Характеристики реакции дыхательной системы  
в условиях прогрессирующей гиперкапнической стимуляции в состоянии  
покоя у квалифицированных спортсменов с разным типом реагирования  
на  $CO_2$ - $H^+$ -стимул ( $M \pm m$ )

Параметры	Группы спортсменов по типу реагирования		
	I тип	II тип	III тип
$\dot{V}_{E50}$ , мл·кг <sup>-1</sup> ·мин <sup>-1</sup>	535,0±42,9*	294,8±39,2*	207,8±28,2*
ЧСС <sub>50</sub> , уд·мин <sup>-1</sup>	74,3±2,8***	70,8±3,2	67,0±2,0
$\Delta ЧСС/\Delta P_{A}CO_2$ , уд·мин <sup>-1</sup> ·мм рт.ст. <sup>-1</sup>	1,29±0,13*	0,96±0,09*	0,64±0,14*
$\dot{V}_{E2л}$ , л·мин <sup>-1</sup>	36,9±1,7*	24,0±2,1*	17,5±3,0*
$\Delta \dot{V}_E/\Delta V_T$ , мин <sup>-1</sup>	20,9±1,2*	16,2±1,9*	11,9±1,8*
Порог реакции рецепторов растяжения легких (K), л	0,24±0,04*	0,46±0,02*	0,57±0,05*
Показатель Эйлера 60К/М, л·мин <sup>-1</sup>	0,77±0,11*	1,48±0,21*	2,57±0,19*
$DA_{max}$ , %	14,13±2,24**	19,51±2,24	22,08±2,96
$P_{A}CO_2$ при $DA_{max}$ , мм рт.ст.	49,67±1,12****	51,48±1,17	53,81±0,96
$DA$ при $P_{A}CO_2$ 50 мм рт.ст., $DA_{50}$ , %	12,30±1,01*	14,29±0,82*	18,73±1,04*
$P_{A}CO_2$ начала снижения $DA_{max}$ , $P_{A}CO_2 \downarrow DA$ , мм рт.ст.	49,91±0,98*	53,04±1,08*	56,18±1,18*
$P_{A}CO_{2max}$ , мм рт.ст.	53,31±1,04	59,08±3,21	58,71±2,04

Примечание. \* – достоверные отличия среди всех групп ( $p < 0,05$ ); \*\* – достоверные отличия 1 группы относительно 2 и 3 групп ( $P < 0,05$ ); \*\*\* – достоверные отличия 1 группы относительно 3 группы ( $p < 0,05$ ); \*\*\*\* – достоверные отличия 1 группы относительно 2 группы ( $p < 0,05$ ).

Таким образом, с увеличением продолжительности основной соревновательной дистанции отмечается снижение чувствительности реакций к гиперкапнии. Это подтверждается анализом взаимосвязи продолжительности дистанции, на которой специализируются спортсмены, и показателями реактивности на гиперкапнию (по  $\Delta \dot{V}_E/\Delta P_{A}CO_2$   $r = -0,87$ ; по  $\Delta ЧСС/\Delta P_{A}CO_2$   $r = -0,82$ , по  $\dot{V}_{E50}$   $r = -0,64$ ; по ЧСС<sub>50</sub>  $r = -0,46$ ;  $p < 0,05$ ). Дальнейший анализ показал, что в группе с высоким уровнем физиологической реактивности (I тип) входили, в основном (93,7 %), спортсмены, которые длительно и успешно специализировались в беге на короткие соревновательные дистанции (100 м). В группу квалифицированных спортсменов со средним уровнем физиологической реактивности (II тип) входили, главным образом

(89,4 %), бегуны на средние дистанции (800 м), а в группу лиц со сниженным уровнем реактивности СД (III тип, 94,8%) спортсмены-бегуны на длинные дистанции (5000 м).

Полученные данные указывают на то, что повышенная чувствительность и общая реактивность СД на  $\text{CO}_2\text{-H}^+$  связаны с преобладанием в тренировочном процессе скоростно-силовых тренировочных нагрузок преимущественно анаэробного характера. Относительно снижена реактивность СД и чувствительность ее реакций связаны с использованием спортсменами средств тренировки, направленных на развитие аэробных возможностей организма и выносливости. Большую или меньшую обусловленность таких связей с содержанием многолетней тренировки или наследственной индивидуальностью физиологической реактивности в настоящее время оценить трудно. Вместе с тем, имеются основания утверждать, что изменения физиологических факторов, определяющих уровень чувствительности реакций системы дыхания и ее общей реактивности на сдвиги дыхательного гомеостаза, с одной стороны, отражают длительную кумуляцию однотипных тренировочных воздействий, а с другой - тесно связаны с особенностями (специфичностью) реакции СД в условиях физических нагрузок различной длительности и преобладающего характера энергообеспечения физической нагрузки.

**Заключение.** Можно думать, что особенности физиологической реактивности СД спортсменов, специализирующихся в беге на дистанции разной продолжительности, является одновременно следствием как долговременной адаптации к напряженной мышечной деятельности различной направленности, так и многолетнего отбора спортсменов с наследственными различиями по уровню чувствительности СД в  $\text{CO}_2\text{-H}^+$ -стимула.

#### **Список литературы**

1. Агаджанян Н.А., Елфимов А.И. Функции организма в условиях гипоксии и гиперкапнии. М.: Медицина, 1986. 272 с.
2. Агаджанян Н.А., Полунин И.Н., Степанов В.К., Поляков В.Н. Человек в условиях гипоксии и гиперкапнии. Астрахань-М., 2001. 340 с.
3. Березовський В.А. Екологічні питання фізіології дихання та спадковіваріації реактивності // Фізіолог. журн. 1977. Т. 23, №4. С.435-445.
4. Березовский В.А., Серебровская Т.В. Вентиляторный ответ на гиперкапнический стимул как показатель реактивности системы дыхания человека // Физиол. журн. 1987. Т. 33, № 3. С.12–18.
5. Исаев Г.Г. Регуляция дыхания при мышечной работе. Л.: Наука, 1990. 120 с.

6. *Исеев Л.В., Медных А.Я., Воробьев В.Е., Абдрахманов В.Р.* Чувствительность аппарата регуляции дыхания к CO<sub>2</sub> в моделируемых условиях космического полета // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1988. Т. 22, № 2. С. 16–20.
7. *Мищенко В.С.* Физиологические механизмы оптимизации реактивности системы дыхания человека при развитии ее функциональных возможностей в условиях напряженной спортивной тренировки // Медико-биологические основы подготовки квалифицированных спортсменов. Киев: КГИФК, 1986. С.67–82.
8. *Мищенко В.С.* Функциональные возможности спортсменов. Киев: Здоровья, 1990. 200 с.
9. *Мищенко В.С., Лисенко Е.Н., Виноградов В.Е.* Реактивные свойства кардиореспираторной системы как отражение адаптации к напряженной физической тренировке в спорте. Київ: Науковий світ, 2007. 351 с.
10. *Серебровская Т.В.* Чувствительность к гипоксическому и гиперкапническому стимулу как отражение индивидуальной реактивности человека // Патологическая физиология и эксперим. терапия. 1985. Т. 29, № 5. С.65–69.
11. *Харитонов Л.Г.* Теоретические и экспериментальное обоснование типов адаптации в спорте // Теория и практика физической культуры. 1991. № 7. С. 21–24.
12. *Caputo F., Denadai B.* Effect of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise // Eur. J. Appl. Phys. 2004. Vol. 93, № 1-2. P. 87–95.
13. *Cunningham D.* The control system regulation breathing in man // Quart. Rev. of Biophysics. 1974. Vol.6, № 6. P.433–483.
14. *Kelley M.A., Lauff M., Millman K.* Ventilatory response to hypercapnia before and after athletic training // Respiratory. Physiol. 1984. Vol. 55. P. 393–400.
15. *Keul J., Konig D., Huonker M., Halle M., Wohlfahrt B., Berg A.* Adaptation to training and performance in elite athletes // Research Quarterly for Exercise and Sport. 1996. Vol. 67, № 3. P.29-36.
16. *Ohyabu Y., Usami A., Ohyabu I., Ishida Y., Miyagawa C., Arai T., Honda Y.* Ventilatory and heart rate chemosensitivity in track-and-field athletes // Eur. J. Appl. Physiol. 1990. Vol. 59. P. 460–464.
17. *Rebuck A.S.* Measurement of ventilatory response to CO<sub>2</sub> by rebreathing // Chest. 1976. Vol. 70. P. 118–121.



**TYPES OF PHYSIOLOGICAL REACTIVITY OF RESPIRATORY SYSTEM AND THE FEATURES OF SPECIAL WORK CAPACITY MANIFESTATION IN ATHLETES**

**O.N. Lysenko**

National University of Physical Education and Sport of Ukraine, Kiev

On the basis researches of character responses of respiratory system (RS) on hypercapnic and physical load at 54 skilled athletes (the runners on 100, 800 and 5000 m) are analysed of the features in physiological reactivity of system on shifts respiratory homeostasis, reflecting a various orientation of long-term adaptation (sports of the training). By means of taxonomic analyses are allocated types of individual responses of organism of the skilled athletes on the basis of character RS responses to hypercapnic shifts in respiratory homeostasis. They in a high degree have been caused by sports specialization of athletes.

**Keywords:** hypercapnia reactivity, respiratory system, skilled athletes.

*Об авторах:*

ЛЫСЕНКО Елена Николаевна—кандидат биологических наук, заведующая лабораторией теории и методики спортивной подготовки и резервных возможностей спортсменов, НИИ Национального университета физического воспитания и спорта Украины, 03680, Украина, Киев, ул. Физкультуры, д. 1, e-mail: luslena@rambler.ru