

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ НА КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИПОКСИИ И ГИПЕРКАПНИИ

Н. А. Агаджанян, В. Г. Двоеносов

Российский университет дружбы народов, Москва
Казанский государственный университет, Казань

Age-specific Features of a Cardiorespiratory Response to the Combined Action of Hypoxia and Hypercapnia

N. A. Agadzhanian, V. G. Dvoynosov

Russian University of People's Friendship, Moscow, Kazan

На основании функционального теста с «возвратным дыханием» установлено, что нарастающие гипоксия и гиперкапния вызывают угнетения газообмена, в большей степени выраженное в группе юных спортсменов и школьников. Большая устойчивость кардиореспираторной системы у взрослых спортсменов обеспечивается как утилизацией O_2 , так и поддержанием необходимого уровня кровотока.

A re-entry breathing test has established that progressive hypoxia and hypercapnia cause inhibited gas exchange that are more pronounced in groups of young athletes and schoolchildren. In adult athletes, higher cardiorespiratory resistance is provided by oxygen utilization and the maintenance of the required level of blood flow.

Проблема повышения физической работоспособности и функциональных резервов организма является одной из актуальных в современной спортивной тренировке и спортивной медицине в связи с тем, что объемы и интенсивность тренировочных нагрузок квалифицированных спортсменов значительно возросли и достигают предельных величин, а иногда выходят за пределы адаптационных возможностей. При этом необходимо отметить, что следствием напряженных физических нагрузок являются гипоксические и гиперкапнические состояния организма.

Механизмы компенсации умеренных форм гипоксии, гиперкапнии или их комбинации в здоровом организме имеют определенное приспособительное значение в формировании адаптационных реакций, направленных на повышение устойчивости организма к целому комплексу экстремальных факторов [1]. В связи с этим появляется возможность использования различных средств воздействия неспецифического характера, позволяющих повысить уровень функциональных возможностей организма без увеличения величины тренировочных нагрузок. В этом ряду все большее распространение получают тренировки с использованием дыхания газовыми смесями с различной концентрацией кислорода и углекислого газа (гипоксических и гиперкапнических) [2]. Показано применение

гиперкапнической тренировки в качестве профилактического средства, оказывающего общеоздоровительное воздействие на организм и используемое в повседневной реабилитации при неблагоприятных для здоровья видах трудовой деятельности или экологических факторах, для повышения эффективности восстановительных процессов в спорте, а также в качестве восстановительного средства, компенсирующего гипоксию тканей [3].

Изучение влияния дыхания гипоксическими и гиперкапническими газовыми смесями показывает, что в результате адаптации к условиям гипоксии и гиперкапнии повышаются физическая работоспособность и функциональные возможности кардиореспираторной системы (КРС) [4]. При этом необходимо учитывать, что гипоксический и гиперкапнический стимулы в процессах регуляции физиологических функций в определенном диапазоне усиливают друг друга [5], а с другой стороны могут выступать не только как синергисты, но и как антагонисты [4]. Некоторые авторы указывают, что дети и подростки хуже адаптируются к изменению парциального давления O_2 во вдыхаемом воздухе [6, 7]. Вместе с тем, вопросы влияния сочетанного воздействия гипоксии и гиперкапнии на организм детей и подростков остаются недостаточно изученными. Поэтому целью нашего исследования явилось

Показатели внешнего дыхания и кардиогемодинамики у обследуемых при функциональном тесте «возвратное дыхание»

Показатели и группы	фон	1 мин	3 мин	5 мин
ДО (л)				
1	0,63±0,03	0,71±0,06*	1,07±0,09**	1,88±0,15**
2	0,61±0,04	0,65±0,06	0,86±0,07**	1,46±0,09**
3	0,66±0,04	0,64±0,04	0,95±0,05**	1,59±0,08**
4	0,52±0,04	0,51±0,05	0,70±0,06**	1,08±0,08**
ДК (ед.)				
1	0,85±0,012	0,52±0,038	0,46±0,016	0,40±0,015
2	0,88±0,010	0,61±0,049	0,51±0,034	0,42±0,033
3	0,87±0,014	0,68±0,028	0,57±0,026	0,43±0,017
4	0,88±0,016	0,55±0,052	0,48±0,050	0,52±0,064
ЧСС(уд.\мин)				
1	66,2±1,96	68,8±1,93	75,6±2,53*	80,4±2,33*
2	70,7±1,67	76,5±2,53	83,7±2,62*	92,9±3,23**
3	75,2±2,37	75,5±2,07	83,0±2,16	89,0±2,61*
4	81,4±2,61	84,2±3,37	89,9±3,28	95,1±2,64*
УО (мл)				
1	95,2±4,31	91,4±4,67	89,6±4,12	81,6±5,03*
2	77,3±4,03	79,4±4,94	71,1±4,09	63,9±3,14*
3	83,2±3,60	69,2±3,26	67,1±3,44*	63,3±3,39*
4	56,2±5,15	53,9±4,76	47,5±3,83*	46,8±2,78*

Примечание. Достоверность различий от исходных показателей: * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$.

изучение особенностей реактивности и мобилизуемости газотранспортной системы у взрослых и подростков, в том числе занимающихся спортом, при комбинированном воздействии гипоксии и гиперкапнии.

Материал и методы исследования

В качестве испытуемых, адаптированных к гипоксическому и гиперкапническому стимулу, нами были обследованы спортсмены-гребцы на байдарках.

В исследованиях приняли участие 23 спортсмена-гребца высокой квалификации в возрасте 18–25 лет, составившие группу — I. Во II группе были представлены 23 учащихся ДЮСШ гребли на байдарках в возрасте 13–15 лет. В группу взрослых (III) вошли 27 студентов в возрасте 18–20 лет, а IV группу подростков составили 13 школьников в возрасте 13–15 лет. Контрольные группы III и IV включали практически здоровых лиц, но систематически не занимающихся спортом. В качестве функционального теста применялся метод «возвратного дыхания», в процессе которого осуществлялось комбинированное воздействие нарастающей гипоксии и гиперкапнии, что способствует повышению уровня функционирования кардиореспираторной системы без усиления мышечной деятельности [4]. Обследуемый дышал в замкнутую систему без поглощения CO_2 . Для проведения пробы использовался спирограф «Метатест — 2» с общим объемом 10 л. Проба проводилась в течение 5 мин. В процессе пробы ежеминутно определялось парциальное давление O_2 ($P_{\text{I}}\text{O}_2$) и CO_2 ($P_{\text{I}}\text{CO}_2$) во вдыхаемом воздухе с помощью газоанализаторов углекислого газа ГАУ-3 и кислорода АК-1. При завершении пробы соотношение $P_{\text{I}}\text{CO}_2/P_{\text{I}}\text{O}_2$ составляло 48–52/80–90 мм рт. ст. Кроме того, в процессе пробы измерялись физиологические показатели кардиореспираторной системы: частота дыхания (ЧД), дыхательный объем (ДО), минутный объем дыхания (МОД), потребление кислорода (VO_2), выделение углекислого газа (VCO_2), частота сердечных сокращений (ЧСС), ударный объем сердца (УО), минутный объем кровообращения (МОК), систолическое, диастолическое и среднее динамическое артериальное давле-

ние (АДс, АДд, АДср). Рассчитывался по формуле $\text{АДСР}/\text{VO}_2$ интегральный показатель эффективности газотранспортной системы — критерий эффективности кардиореспираторной системы (КЭКРС- O_2) [8] и ряд производных показателей. Объемные показатели внешнего дыхания рассчитывались в системе ВТПС, а показатели газообмена определялись методом Дугласа-Холдейна и приводились к стандартным условиям STPD. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы оценивалось с помощью электрокардиографии и импедансной тетраполярной реографии [9] с использованием реоплетизмографа РПГ-02. Артериальное давление измерялось методом Короткова. Полученные данные обработаны современными методами вариационной статистики с использованием ЭВМ IBM PC/AT.

Результаты исследований и обсуждение

Анализ динамики показателей системы внешнего дыхания, кровообращения и газообмена, полученных у взрослых и подростков, занимающихся и не занимающихся спортом, в процессе функциональной пробы с «возвратным дыханием» показал, что дыхание газовой средой в условиях сочетанного снижения парциального давления кислорода и повышения парциального давления углекислого газа приводило к их изменениям во всех обследованных группах. Однако степень изменения этих показателей была различной у представителей разных групп и зависела от уровня гипоксии и гиперкапнии. Полученные данные свидетельствуют, что снижение парциального давления кислорода и повышение парциального давления углекислого газа во вдыхаемом воздухе вызывало значительный рост легочной вентиляции за счет увеличения дыхательного объема (ДО) во всех обследованных группах

($p < 0,02$). При этом частота дыхания (ЧД) практически не изменялась. Несмотря на значительное увеличение легочной вентиляции отмечалась фазная динамика величины потребления O_2 во всех группах обследуемых в процессе пробы. С началом пробы потребление кислорода начинало снижаться, достигая наиболее низких величин при содержании CO_2 во вдыхаемом воздухе в объеме 3,4–3,9%, и составляло в группе взрослых спортсменов — $3,3 \pm 0,25$ мл/мин/кг, в группе студентов — $4,1 \pm 0,33$ мл/мин/кг, в группе юных спортсменов — $3,5 \pm 0,33$ мл/мин/кг, а у подростков не занимающихся спортом — $3,7 \pm 0,33$ мл/мин/кг. В дальнейшем к концу пробы при нарастании концентрации CO_2 во вдыхаемом воздухе до 6,5–7% уровень потребления кислорода увеличивался во всех группах, за исключением группы подростков, не занимающихся спортом, в которой отмечалось снижение потребления O_2 на протяжении всей пробы. В конце пробы в группе взрослых спортсменов уровень потребления кислорода достиг 110% от фоновых значений до начала пробы, а в группе студентов — 92,2% от фоновой нормы. Значительно ниже уровень потребления кислорода относительно исходного оказался в группе юных спортсменов — 65,6% и еще ниже в группе подростков, не занимающихся спортом — 41,8%.

Похожая динамика отмечалась в величинах выделения CO_2 . Так, в группе взрослых спортсменов наиболее низкий уровень выделения CO_2 отмечался на третьей минуте теста, а затем постепенно увеличивался к концу теста, достигая при этом лишь 55,4% от фоновой нормы. Несмотря на некоторое увеличение выделения CO_2 к концу пробы с «возвратным дыханием», его величины оставались значительно ниже исходных значений, достигая в группе студентов 47,1% к фоновому уровню, а в группах юных спортсменов и подростков, не занимающихся спортом, лишь 32,8 и 24,1%, соответственно.

Повышение легочной вентиляции и снижение потребления O_2 приводили к снижению коэффициента использования кислорода (КИО $_2$), которое отмечалось во всех обследованных группах на протяжении всего теста с «возвратным дыханием». В конце теста величины КИО $_2$ в группах взрослых и юных спортсменов составили $12,02 \pm 1,04$ и $8,20 \pm 1,15$ мл/л, соответственно ($p < 0,02$), а в группах взрослых и подростков, не занимающихся спортом $12,32 \pm 0,78$ и $6,44 \pm 1,29$ мл/л, соответственно ($p < 0,001$). Указанные изменения КИО $_2$ отражают возрастные особенности снижения эффективности газообмена в условиях нарастающей гипоксии в сочетании с гиперкапнией.

Сочетание снижения потребления O_2 , выделения CO_2 и КИО $_2$, свидетельствовало об угнетении газообмена, наиболее выраженного в группах под-

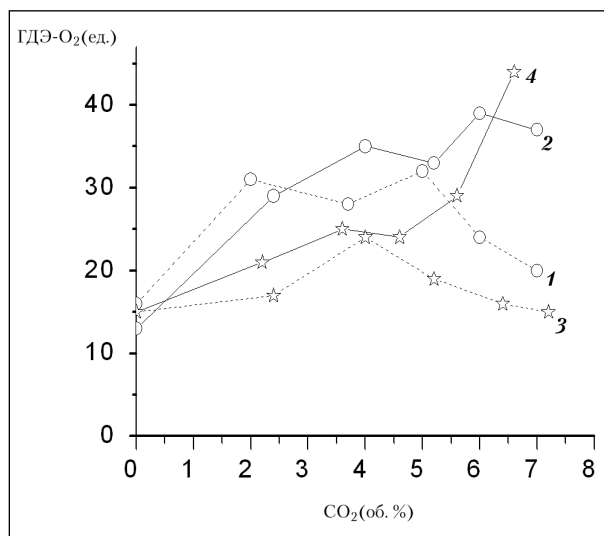


Рис. 1. Динамика гемодинамического эквивалента O_2 у обследуемых разных групп при функциональной пробе с «возвратным дыханием».

1 — взрослые спортсмены-гребцы; 2 — спортсмены-гребцы подростки; 3 — взрослые, не занимающиеся спортом; 4 — подростки, не занимающиеся спортом. По оси абсцисс — CO_2 во вдыхаемой газовой смеси (об.%). По оси ординат — ГДЭ — O_2 .

ростков, как среди занимающихся, так и не занимающихся спортом. Повышение содержания CO_2 в атмосфере приводит к замедлению метаболических процессов в состоянии покоя [4]. Этим, очевидно, и было вызвано снижение потребления O_2 при возрастании содержания CO_2 во вдыхаемом воздухе до 3,5–4 об.%. Дальнейшее повышение содержания CO_2 и снижение O_2 во вдыхаемом воздухе приводило к росту величины гемодинамического эквивалента O_2 (ГДЭ- O_2) вычисляемого по формуле $МОК/VO_2$ в группах подростков (рис. 1), что свидетельствует о лимитирующей роли возрастного фактора в реакциях утилизации кислорода тканями, а также способности переноса и отдачи кислорода гемоглобином. Подобные изменения связывают с развитием ацидоза, накоплением кислых продуктов метаболизма в плазме крови, угнетением гликолитических процессов в эритроцитах, активирующих отдачу O_2 [10]. Взрослые испытуемые (независимо от опыта занятий спортом) в конце пробы отличались большей устойчивостью к воздействию измененной газовой среды и ГДЭ- O_2 у них оказался достоверно ниже ($p < 0,007$), чем в группах подростков. При этом необходимо отметить, что концентрации CO_2 во вдыхаемой газовой смеси в объеме 2–2,5% выявили более высокие величины ГДЭ- O_2 в группах взрослых и юных спортсменов, свидетельствующие об особенностях адаптации организма к тренировочной деятельности. Эти особенности заключаются в большей устойчивости сердечно-сосудистой системы к гиперкапническому стимулу с одной стороны и возможности снижать уровень метаболизма под влиянием CO_2 — с другой.

Снижение дыхательного коэффициента (ДК) в условиях дыхания гипоксически-гиперкапнической газовой смесью связывают с задержкой CO_2 и уменьшением вентиляционно-перфузионных отношений, из-за относительно недостаточного прироста вентиляции или избыточного прироста легочного кровотока. В результате чего, повышенный уровень PACO_2 уменьшает переход CO_2 из крови в альвеолы в большей мере, чем пониженный уровень PaO_2 уменьшает переход O_2 из альвеол в кровь, из-за разных форм кривых диссоциации для CO_2 и O_2 [11, 4].

Более низкий ДК у взрослых и юных спортсменов-гребцов при пробе с «возвратным дыханием» связан с большей устойчивостью системы кровообращения к воздействию гипоксии в сочетании с гиперкапнией, что отражает специфику долговременной адаптации организма при занятиях греблей на байдарках.

У взрослых и юных гребцов в конце пробы минутный объем крови (МОК) превышал исходный уровень на 8 и 4%, соответственно. Причем МОК поддерживался за счет увеличения ЧСС, так как УО снижался. При этом индекс уравниваемости объемно-частотной характеристики работы сердца УО/ЧСС у взрослых гребцов был достоверно выше, чем у юных спортсменов ($p < 0,001$). Следовательно, взрослые, по сравнению с подростками и более квалифицированные спортсмены в большей степени сохраняли способность к использованию инотропного резерва сердца в условиях нарастания PACO_2 и снижения PAO_2 .

В процессе пробы с «возвратным дыханием» значительно увеличивались величины систолического ($\text{АД}_\text{с}$), диастолического ($\text{АД}_\text{д}$) и среднединамического ($\text{АД}_\text{ср}$) артериального давления. Так, у взрослых гребцов в конце пробы $\text{АД}_\text{с}$ повысилось до $140,5 \pm 2,1$ мм рт. ст., а $\text{АД}_\text{д}$ до $87,9 \pm 2,0$ мм рт.ст. У спортсменов подростков $\text{АД}_\text{с}$ достигло $139,1 \pm 2,0$ мм рт. ст., а $\text{АД}_\text{д}$ — $86,3 \pm 2,0$ мм рт. ст. В группах, не занимающихся спортом взрослых и подростков, $\text{АД}_\text{с}$ достигло $144,8 \pm 1,7$ и $126,6 \pm 1,2$ мм рт. ст., соответственно, а $\text{АД}_\text{д}$ $91,2 \pm 1,6$ мм рт. ст. и $85,7 \pm 2,2$ мм рт. ст.

Удельное периферическое сопротивление сосудов (УПСС), зависящее от динамики $\text{АД}_\text{ср}$ и МОК, повышалось к концу теста во всех обследованных группах. При этом во взрослых группах величины УПСС были достоверно ниже, чем в группах подростков ($p < 0,03$).

Представленные данные позволяют предполагать, что кислородные режимы организма подростков при нарастании PACO_2 и снижении PAO_2 будут характеризоваться меньшей экономичностью и эффективностью, что и подтвердилось при анализе динамики критерия эффективности КРС. Особенно высокий прирост КЭКРС-O_2 , свидетельствующий о высокой «физиологичес-

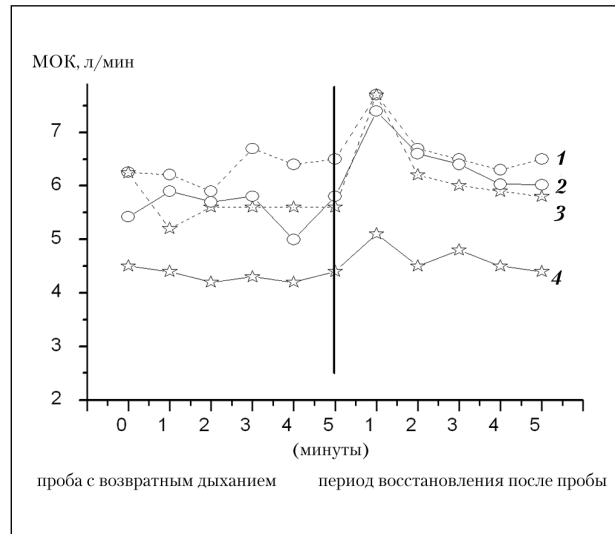


Рис. 2. Динамика минутного объема кровотока у обследуемых разных групп в период выполнения пробы с «возвратным дыханием» и в период восстановления.

1 — взрослые спортсмены-гребцы; 2 — спортсмены-гребцы подростки; 3 — взрослые, не занимающиеся спортом; 4 — подростки, не занимающиеся спортом.

кой цене» обеспечения кислородного режима организма, оказался в группе юных спортсменов и в группе подростков, не занимающихся спортом. Так, у взрослых спортсменов величина этого показателя в конце пробы с «возвратным дыханием» оказалась в 2 раза ниже, чем в группе юных спортсменов.

Учитывая, что воздействие на организм измененной газовой средой вызывает значительные сдвиги кардиореспираторной системы и газообмена, мы изучили динамику показателей внешнего дыхания, кровообращения и газообмена в восстановительном периоде после пробы.

При переключении испытуемых на дыхание обычным атмосферным воздухом происходило быстрое снижение легочной вентиляции во всех обследованных группах, за исключением контрольной группы подростков, в которой быстрое снижение МОД отмечалось лишь на 2-ой минуте восстановительного периода. Снижение легочной вентиляции происходило за счет уменьшения ДО.

Одной из особенностей восстановительного периода явилось быстрое увеличение выведения CO_2 и потребления O_2 , несмотря на быстрое снижение уровня легочной вентиляции. При этом значительно вырос ДК, достигая в группе взрослых спортсменов $1,09 \pm 0,03$ ед., в группе подростков-спортсменов $1,16 \pm 0,04$ ед., во взрослой группе не спортсменов $1,14 \pm 0,02$ ед. и в группе подростков, не занимающихся спортом $1,10 \pm 0,07$ ед.

Значительная реакция отмечалась со стороны системы кровообращения. В частности, сразу после переключения на дыхание нормальным атмосферным воздухом увеличился МОК во всех обследуемых группах (рис. 2). При этом величины

МОК достоверно превышали фоновые значения до проведения пробы: в группе взрослых спортсменов — $p < 0,01$, в группе юных гребцов — $p < 0,001$, в группе взрослых не спортсменов — $p < 0,05$ и в группе подростков не спортсменов — $p < 0,1$. Данная реакция, очевидно, связана с достоверным снижением УПСС относительно фоновых значений ($p < 0,05$) во всех обследованных группах. Данный феномен не был описан в доступной нам литературе и носит характер «раскрытия» систем внешнего дыхания, газообмена и кровообращения в ответ на условия нормооксии и снижения концентрации CO_2 при дыхании нормальным атмосферным воздухом.

Физиологическое значение подобной реакции, по-видимому, связано с механизмами скорейшего выведения избытка CO_2 из организма и устранения вызванных в системе крови и тканевого дыхания изменений, возникших в результате «запирания» эндогенной CO_2 за счет экзогенной CO_2 в процессе пробы с «возвратным дыханием» и, возможно, требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Агаджанян Н. А., Чижов А. Я. Гипоксические, гипокapнические и гиперкапнические состояния: Уч. пособие. М.: Медицина; 2003.
2. Агаджанян Н. А., Красников Н. П. Оценка функционального состояния организма в условиях измененной газовой среды. Теория и практика физической культуры. 1985; 3: 19–21.
3. Агаджанян Н. А., Полунин И. Н., Степанов В. К., Поляков В. Н. Человек в условиях гипокapнии и гиперкапнии. Астрахань-М.: Изд-во АГМА; 2001.
4. Агаджанян Н. А., Елфимов А. И. Функции организма в условиях гипоксии и гиперкапнии. М.: Медицина; 1986.
5. Бреслав И. С., Пятин В. Ф. Центральная и периферическая хеморецепция системы дыхания. В кн.: Физиология дыхания. СПб.: Наука; 1994: 416–472.
6. Мищенко В. С. Функциональные возможности спортсменов. Киев: Здоровья, 1990.
7. Колчинская А. З. Дыхание при гипоксии. В кн.: Физиология дыхания. СПб.: Наука; 1994: 589–623.
8. Меделяновский А. Н. Количественная оценка возможностей систем жизнеобеспечения организма. Съезд физиологического общества им. И. П. Павлова. Баку, 1983. Т. 1: 98–99.
9. Пушкарь Ю. Т., Цветкова А. А., Хеймец Г. И. Автоматизированное определение минутного объема методом реографии. Бюлл. Всесоюз. кардиол. науч. центра АМН СССР. 1980; 1: 45–48.
10. Сапов И. А., Кулешов В. И., Левшин И. В., Кеериг Ю. Ю. Кислотно-основное состояние организма человека при дыхании воздухом с примесью различных концентраций двуокиси углерода. Физиология человека. 1990; 16 (1): 127–132.
11. Шик Л. Л. Регуляция дыхания и ее нарушения: Рук-во по клинич. физиологии дыхания. Л.; 1980: 109–232.

Поступила 08.12.04

Таким образом, проведенные исследования показывают, что нарастающие условия гипоксии и гиперкапнии в функциональном тесте с «возвратным дыханием» вызвали угнетение газообмена, в большей степени выраженное в группах юных спортсменов и школьников. Кислородные режимы организма подростков в этих условиях характеризуются меньшей экономичностью и эффективностью и большей «физиологической ценой» адаптации по сравнению со взрослыми, критерием оценки которой может выступать КЭКРС- O_2 . Большая устойчивость кардиореспираторной системы к воздействию измененной газовой среды у взрослых спортсменов обеспечивалась как за счет утилизации O_2 , так и поддержанием необходимого уровня кровотока. Для тренировок системы дыхания и кровообращения у подростков нецелесообразно использовать сочетанные гиперкапнические и гипоксические газовые смеси с содержанием CO_2 более 4–4,5 об. % и O_2 менее 14–15%.