

УДК 612.283

Эльмар ВАСАР, Пезт-Хенн КИНГИСЕПП

## О ГАЗООБМЕНЕ ПРИ ПОВТОРНОМ АПНОЭ

При оценке адаптационной способности организма к гипоксии и гиперкапнии важную роль играют различные функциональные исследования. Одной из возможностей вызывать гипоксию и гиперкапнию является произвольная задержка дыхания, которая, по С. Израэлю (Israel, 1957, 1958), выполняется трехкратно с интервалами в 45 сек. Перед каждой задержкой дыхания обследуемый совершает максимально глубокий вдох, выдох, вдох и задерживает дыхание «до отказа». Максимально использовать все возможности внешнего дыхания позволяет инспираторное апноэ. Обычно уже при втором апноэ время задержки дыхания увеличивается по сравнению с первым. Как правило, самым продолжительным является третье апноэ. С. Израэль установил (Israel, 1958), что в ходе тренировок наблюдается тенденция к увеличению продолжительности апноэ при их повторении через короткие интервалы времени. Его выводы основываются только на определении длительности задержек дыхания. Каждое функциональное исследование требует подробной физиологической характеристики, только тогда оно информативно. Для этого необходимо более разностороннее изучение основных параметров в соответствии с состоянием организма. На кафедре физиологии ТГУ уже в течение многих лет ведутся исследования по повторному апноэ. Обобщены некоторые физиологические параметры этих исследований и сделаны попытки применить их в качестве критерия отбора пловцов в тренировочном процессе (Vasar, 1963; Vasar, 1971, 1973; Vasar, Kingisepp, 1981; Vasar, Лайдре, 1984, 1986).

Задачей настоящей работы является детальное исследование внешнего дыхания и газообмена при повторном апноэ.

### Методика

В эксперименте участвовало 17 студентов. Обследуемый дышал через загубник в спирограф, откуда выдыхаемый воздух собирали в мешок Дугласа. Вывод загубника соединяли с масс-спектрометром. Измеряли объем и концентрацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в выдыхаемом воздухе. Одна часть легочных объемов и легочной вентиляции выражалась в условиях ВТПС (температура тела  $37^\circ\text{C}$ , фактическое барометрическое давление, насыщение водяными парами), другая — в условиях STPD (стандартная температура  $0^\circ\text{C}$ , стандартное давление 760 мм рт. ст., без водяных паров). Повторное апноэ проводили по методике Израэля (Israel, 1957, 1958): три задержки дыхания (после глубокого вдоха, выдоха и вдоха) с интервалами в 45 сек.

Вместе с антропометрическими данными было проанализировано 46 параметров, статистически обработанных на ЭВМ СМ-1 на кафедре спортивной медицины и лечебной физической культуры ТГУ.

Сводная таблица результатов исследования (число обследуемых  $n=17$ )

Наименование показателей	$\bar{x}$	$\pm m_{\bar{x}}$
Возраст подопытных, лет	21,0	0,62
Рост, см	179,4	0,81
Масса тела, кг	73,7	1,48
Жизненная емкость легких, мл	5545	84
<b>Длительность апноэ, с</b>		
IA	89,2	5,40
IIA	107,4	5,90
IIIA	135,5	8,10
$\Delta$ IIIA—IA	46,3	4,20
<b>Частота дыхания</b>		
Фон, цикл/мин	14,4	0,60
IA, цикл/45 сек	11,8	0,65
IIA, „	12,5	0,70
IIIA, „	12,9	0,55
<b>Дыхательный объем в STPD, л</b>		
Фон	0,8	0,10
IA	2,1	0,11
IIA	2,1	0,10
IIIA	1,8	0,08
<b>Минутный объем дыхания в STPD, л/мин</b>		
Фон	11,1	0,65
IA + интервал	10,2	0,71
IIA + интервал	9,6	0,70
IIIA + интервал	6,9	0,43
<b>Минутный объем дыхания в BTPS</b>		
Фон, л/мин	12,1	0,70
IA, л/45 сек	24,5	1,75
IIA, „	26,3	1,95
IIIA, „	22,7	1,40
<b>Потребление <math>O_2</math>, мл/мин</b>		
Фон	382	25
IA + интервал	372	20
IIA + интервал	363	17
IIIA + интервал	298	15
<b>Концентрация <math>O_2</math> в выдыхаемом воздухе, %</b>		
Фон	17,49	0,14
IA	17,29	0,13
IIA	17,16	0,13
IIIA	16,63	0,15
<b>Концентрация <math>CO_2</math> в выдыхаемом воздухе, %</b>		
Фон	3,46	0,13
IA	3,75	0,13
IIA	3,81	0,12
IIIA	4,33	0,11
<b>Концентрация <math>O_2</math> в альвеолярном воздухе в конце апноэ, %</b>		
IA	11,46	0,86
IIA	10,33	0,56
IIIA	9,88	0,57
<b>Концентрация <math>CO_2</math> в альвеолярном воздухе в начале апноэ, %</b>		
IA	3,94	0,33
IIA	4,10	0,31
IIIA	4,20	0,17
<b>Концентрация <math>CO_2</math> в альвеолярном воздухе в конце апноэ, %</b>		
IA	6,87	0,28
IIA	6,96	0,31
IIIA	7,05	0,28

По антропометрическим данным обследуемый контингент оказался достаточно равномерным. Как правило, с каждым повторением длительность апноэ увеличивалась: I апноэ (IA) продолжалось в среднем 89 сек, IIА — 107 сек и IIIА — 135 сек, т.е. IIIА превышает IA на 46 сек. Эти данные согласуются с ранее полученными (Васар, 1973).

Сравнительные данные показывают, что вентиляция легких после апноэ (45 сек) превышает фоновую вентиляцию более чем в 2,5 раза. Это происходит за счет углубления дыхания благодаря значительному росту дыхательного объема. При этом частота дыхания почти не изменяется. Такая реакция вызвана повышением концентрации  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе к концу апноэ (до 7%).

Интересные результаты были получены при сопоставлении величины легочной вентиляции, выраженной суммарным временем длительности апноэ и соответствующего интервала (45 сек). Если суммарное время IA составляло в среднем 2,25 мин, IIА — 2,5 мин и IIIА — 3 мин, то средняя легочная вентиляция в условиях STPD — соответственно 10,2, 9,6 и 6,9 л/мин. Последние величины, особенно при IIIА значительно ниже фоновых (11,05 л/мин). Аналогично уменьшалось и потребление  $\text{O}_2$ . Если фоновое потребление  $\text{O}_2$  было в среднем 382 мл/мин, то с каждым последующим апноэ оно постепенно уменьшалось и в IIIА упало до 298 мл/мин. Таким образом, потребление  $\text{O}_2$  ниже фонового на 22%. По всей вероятности, одним из пролонгирующих апноэ факторов при их повторении через короткие интервалы времени является уменьшение потребления  $\text{O}_2$  в состоянии покоя.

Особое внимание мы обратили на изменение концентраций  $\text{CO}_2$  в выдыхаемом и альвеолярном воздухе. В масс-спектрометрических исследованиях регистрировали концентрацию  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе как в начальный, так и в конечный момент апноэ. Если фоновая концентрация  $\text{CO}_2$  была в среднем 5,11%, то в начале каждого апноэ она уменьшалась за счет двух предшествующих глубоких вдохов. Начальная концентрация  $\text{CO}_2$  при IA, IIА, IIIА составляла в среднем 3,94, 4,1 и 4,2% соответственно. Эти различия незначительны. Аналогичная картина наблюдается и при прекращении апноэ: концентрация  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе составляет от 6,87 до 7,05%. Из этих данных следует, что концентрация  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе не превышает предельной концентрации, несмотря на заметное продление IIА и IIIА по сравнению с IA. Во время инспираторного апноэ максимум  $\text{CO}_2$  достигается уже в первые минуты, далее наступает ретенция  $\text{CO}_2$  в тканях (Hong и др., 1971). Задержку  $\text{CO}_2$  в организме подтверждают и наши данные. Концентрация  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе увеличивается при каждом апноэ почти одинаково, т.е. на 2,85—2,93%, а  $\text{O}_2$  уменьшается на 5,85—6,75%, т.е. по сравнению с  $\text{CO}_2$  убывает более чем в два раза. Это показывает, что потребление  $\text{O}_2$  происходит непрерывно, а транспорт  $\text{CO}_2$  в альвеолярный воздух задерживается. По данным некоторых авторов (Mithoefer, 1959, 1964), ретенция  $\text{CO}_2$  в тканях связана с тем, что увеличение содержания т.н. восстановленного гемоглобина не способствует транспорту  $\text{CO}_2$ , так как вследствие непрерывного уменьшения  $\text{O}_2$  в альвеолярном воздухе во время апноэ в легких не образуются дополнительного оксигемоглобина.

Можно допустить, что ведущим фактором при прекращении апноэ является достижение предельной концентрации  $\text{CO}_2$  в крови и альвеолярном воздухе (до 7%). В связи с тем, что интенсивность окислительных процессов при повторном апноэ снижается, замедляется и достижение той концентрации  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе, которая прерывает

apnoe, способствуя увеличению продолжительности апноэ при их повторении через короткие интервалы времени.

Достижение одинаковой предельной концентрации  $\text{CO}_2$  в альвеолярном воздухе после каждого апноэ указывает на лимитированность  $\text{CO}_2$ -связывающей способности крови. Такое явление имеет и общебиологическое значение при самозащите организма, так как предотвращает возникновение угнетающего действия высоких концентраций  $\text{CO}_2$  на жизнедеятельность организма.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Vasar Э. О зависимости длительности апноэ от легочных объемов. — Уч. зап. ТГУ. Труды по медицине XXII. Тарту, 1971, 274, 33—40.
- Vasar Э. Ф. Спирографические исследования для установления должных величин показателей внешнего дыхания и физиологическая характеристика пробы повторного апноэ. Автореф. докт. дис. Тарту, 1973.
- Vasar Э. Ф., Лайдре Х. К. Показатели пробы апноэ как критерии отбора пловцов: — Тез. докл. X Регионарной науч. конф. Республик Советской Прибалтики и Белорусской СССР. Каунас, 1984, 63.
- Vasar Э. Ф., Лайдре Х. К. Применение пробы повторного апноэ для отбора юных пловцов и оценки их функциональных способностей. — В кн.: Проблемы физиологии человека и животных. Тарту, 1986, 15—16.
- Hong, S. K., Lin, Y. C., Lally, D. A., Yim, B. J. B., Kominami, N. Alveolar gas exchanges and cardiovascular functions during breath holding with air. — J. Appl. Physiol., 1971, 30, 540—547.
- Israel, S. Neue Gesichtspunkte zum Atemhaltenversuch in Klinik und sportärztlicher Praxis. — Z. gesamte inn. Med., 1957, 12, 1048—1052.
- Israel, S. Der erweiterte Atemhaltenversuch als Funktionsprüfung für das Atmungs-Herz-Kreislauf-System. — Theorie u. Prax. d. Körperkult., 1958, 7, 650—654.
- Mithoefer, J. C. Mechanism of pulmonary gas exchange and  $\text{CO}_2$  transport during breath holding. — J. Appl. Physiol., 1959, 14, 706—710.
- Mithoefer, J. C. Breath holding. — In: Handbook of Physiology. Respiration. II. Washington, 1964, 1011—1025.
- Vasar, E. Organismi adaptatsioonivõimest hingamispeetuse korral. — TRÜ Toimetised. Arstiteaduslikke töid VIII. Tartu, 1963, 143, 175—183.
- Vasar, E., Kingisepp, P.-H. Physiological characteristics of repeated breath holding. — In: Advances in Physiological Sciences. 10. (Respiration). Budapest, 1981, 639—646.

Тартуский государственный университет

Поступила в редакцию  
28/IV 1987

Elmar VASAR, Peet-Henn KINGISEPP

#### GAASIVAHETUSEST KORDUVA HINGAMISPEETUSE KORRAL

Töö eesmärgiks on seatud gaasivahetuse, kopsude ventilatsiooni ja alveolaargaasi koostise muutuste uurimine lühikese intervalli järel korratud hingamispeetuste vaheperioodidel.

Vaatlusalusteks oli 17 meest, kelle keskmine vanus oli  $21,0 \pm 0,6$  aastat. Sügaval sissehingamisel tegid nad kolm tahtlikku hingamispeetust kuni suutlikkuse piirini, aeg hingamispeetuste vahel 45 s. Uuringu tulemused kinnitavad lühikese ajavahemiku järel korratud hingamispeetuse aja pikenemist (esimese apnoe kestus  $89,2 \pm 5,4$  s, kolmanda kestus  $135,5 \pm 8,1$  s). Hingamispeetuste vaheperioodidel mõõdetud ning hingamispeetuse aja ja sellele järgnenud 45 s intervalli kohta väljendatud kopsude minutimaht (l/min) väheneb, võrreldes kopsude ventilatsiooniga enne hingamispeetusi. Väheneb ka tarbitud  $\text{O}_2$  hulk, mida võib pidada oksüdatsiooniprotsesside languse kaudseks näitajaks.  $\text{O}_2$  kontsentratsioon alveolaarses õhus kolmanda apnoe lõpul on hingamispeetuse eelsest keskmiselt 1,6% võrra madalam,  $\text{CO}_2$  tõus samal ajal ületab aga ainult 0,18% võrra esimese apnoe lõpul esinenud väärtuse.  $\text{CO}_2$  suhteliselt ühesugune kontsentratsioon hingamispeetuse katkestamise momendil osutab vere  $\text{CO}_2$  siduvusvõime limiteeritusele ja verest alveolaarsesse gaasisesse ülemineku vähenemisele.

## GAS EXCHANGE DURING REPEATED BREATH HOLDING

A phenomenon of breath holding time becoming progressively longer during a series of breath holdings with short (45 sec) intervals was described by S. Israel in 1957.

Lung ventilation, gas exchange and changes in alveolar gas composition during the intervals of repeated breath holding are discussed in this paper. Experiments were carried out with 17 healthy young men (mean age  $21.0 \pm 0.6$  years). After deep inspiration and expiration they held their breath in deep inspiration as long as possible, breath holding was repeated three times after the intervals of 45 sec. During the intervals of breath holding the subject breathed into the spirometer filled with room air, the gas exchange was measured by the modified Haldane method and alveolar  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  concentrations were recorded by mass spectrograph.

The apnea repeated after short time intervals increases breath holding time. The duration of the first and the third breath holding was  $89.2 \pm 5.4$  sec and  $135.5 \pm 8.1$  sec, respectively. Lung ventilation ( $V_{E \text{ STPD}}$   $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) during the intervals expressed per sum of breath holding time and interval time, decreased from  $10.2 \pm 0.7$   $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$  after the first breath holding to  $6.9 \pm 0.4$   $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$  after the third breath holding. It means that the hyperventilation after breath holding does not compensate the deficiency of a ventilation in a previous breath holding period. At the same time the oxygen consumption decreased from  $372 \pm 20$   $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  to  $298 \pm 15$   $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ . It reveals indirectly that the oxydation processes in an organism fall during breath holding. The concentrations of  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  in alveolar gas ( $F_{\text{ACO}_2}$  and  $F_{\text{AO}_2}$ ) are characterized by a decrease of  $F_{\text{AO}_2}$  after the third apnea in comparison with  $F_{\text{AO}_2}$  after the first apnea to 1.6%, at the same time  $F_{\text{ACO}_2}$  is rising only by 0.18%. This fact indicates the limitation of blood's  $\text{CO}_2$  binding possibilities and the decreased elimination of  $\text{CO}_2$  from blood to lungs during breath holding.