

12.04.510.25

33

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

**ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ФИЗИОЛОГИИ
ИМЕНИ И. П. ПАВЛОВА**

На правах рукописи

В. И. КЕБКАЛО

**ОБМЕН ГАЗОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
ДЫХАНИЯ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА ПОД ВОДОЙ НА МАЛОЙ ГЛУБИНЕ**

(Раздел III. „Биологические науки“)

(Специальность 102, физиология человека и животных)

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
биологических наук

ЛЕНИНГРАД
1972

Работа выполнена на кафедрах физиологии и плавания Государственного ордена Ленина и ордена Красного Знамени института физической культуры им. П. Ф. Лесгафта.

Научный руководитель — доктор медицинских наук, профессор А. Б. Гандельсман.

Официальные оппоненты: доктор медицинских наук, старший научный сотрудник И. С. Бреслав; доктор медицинских наук, профессор К. М. Смирнов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение — Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова.

Автореферат разослан « » 197 г.

Защита диссертации состоится « 8 » *Июни* 1973 г. на заседании Ученого совета Института физиологии имени И. П. Павлова Академии наук СССР по адресу: г. Ленинград, наб. Макарова, дом 6, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института (г. Ленинград, наб. Макарова, д. 6).

Ученый секретарь Института — кандидат медицинских наук В. В. Алякринский.

В последнее время в связи с широким использованием автономных дыхательных приборов как в профессиональной практике, так и в спорте резко возрос интерес к изучению функций организма человека при погружении на малые глубины. В процессе подводного плавания наибольший интерес представляет исследование внешнего дыхания, так как система кислородного обеспечения является одной из наиболее важных функций организма.

Изучению внешнего дыхания при погружении под воду посвящено большое количество работ. Однако эти работы затрагивают в основном вопросы исследования газообмена во время пребывания человека или животных в условиях повышенного давления в барокамере, гидрокамере и в отдельных случаях — при глубоководных погружениях (Bert, 1878; Hill, 1900, 1912; Haldane, 1906; Davis, 1919; Е. М. Крепс и др., 1936; Л. А. Орбели и др., 1940, 1944; А. Г. Жиронкин, 1940, 1955; А. П. Бресткин, 1955, 1958, 1964; Bond, 1967 и др.).

Исследования, проведенные в обычных условиях воздушной среды с увеличением сопротивления дыханию, показали, что при выполнении физической нагрузки МОД и оксигенация артериальной крови снижаются тем больше, чем больше сопротивление дыханию, и потребление кислорода при этом возрастает (Холден и Пристли, 1937; Б. Е. Вотчал, 1949; Marshall et al, 1956; А. М. Кулик, 1958; Campbell, 1958; М. Е. Маршак, 1961; Wood, 1963; Б. М. Сагалович, 1967 и др.). Одним из факторов, влияющих на сопротивление дыханию, является плотность дыхательной смеси. Многие исследователи для уменьшения сопротивления дыханию как в покое, так и при работе различной интенсивности использовали для дыхания гелио-кислородные смеси (Bühlman, 1963; Maio, Farhi, 1967; Altland et al, 1968; И. С. Бреслав, 1970; А. Г. Жиронкин и др., 1971; И. С. Бреслав и др., 1971 и др.).

Изучая вентиляционные показатели и показатели газообмена, авторы нашли, что во время погружения под воду с аквалангом сопротивление дыханию в значительной мере зависит от места расположения легочного автомата на теле пловца и объема легочной вентиляции. Потребление кислорода не зависит от глубины погружения, но возрастает с увеличением

скорости плавания (А. А. Юрчевский, 1962; Д. Добрев и др., 1962; П. Богданов, 1966; Taggart, 1966 и др.). Значительно выраженная при этом двигательная гипоксемия является приспособлением организма к функционированию в сложных условиях подводных погружений (В. П. Пономарев, 1962).

Имеются указания на то, что при задержке дыхания возникает острая кислородная недостаточность и возрастает концентрация углекислоты в альвеолярном воздухе. При мышечной работе крутизна роста P_{CO_2} и снижения P_{O_2} в альвеолярном воздухе по мере продолжения произвольной задержки дыхания увеличивается (Irving, 1939; Sholander, 1940; Graig, 1963; Lanphier, 1967 и др.).

Большое количество работ посвящено исследованию брадикардии как при нырянии, так и при задержке дыхания на суше в покое и при работе (Sholander, 1940; Irving, 1941; А. Б. Гандельсман, 1957; А. Г. Дембо и др., 1958; А. А. Аруцев, 1962; Craig, 1963; Wolf, 1965; Н. Н. Карташов, 1966; Hang et al, 1967; Paulev, 1968 и др.).

Вместе с тем вопросы, касающиеся исследования дополнительного сопротивления дыханию автомата дыхательного прибора и его влияния на легочный газообмен и работоспособность при выполнении напряженной циклической работы под водой на малой глубине крайне мало изучены, также мало изучены особенности газообмена при нырянии в длину.

В настоящей работе представлены материалы комплексного исследования динамики перепадов давления во время дыхательного цикла в камере легочного автомата автономного дыхательного прибора, величины легочной вентиляции и газообмена в процессе выполнения больших физических нагрузок под водой на глубине до двух метров. Кроме этого, представлены исследования оксигенации артериальной крови, частоты сердечных сокращений и газообмена во время и после ныряния в длину.

В работе решались следующие задачи:

1. Определить особенности вентиляции и газообмена при выполнении дозированной работы под водой.
2. Определить особенности вентиляции и газообмена при дыхании нормоксическими газовыми смесями с различной плотностью в процессе скоростного плавания с аквалангом.
3. Определить особенности оксигенации артериальной крови, частоты сердцебиения и газообмена при нырянии в длину.

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились лабораторно при работе на установке для вертикального перемещения груза, а также в условиях естественного скоростного плавания с аквалангом и

ныряния в длину в закрытом плавательном бассейне с температурой воды $26 \pm 1^\circ \text{C}$. В опытах приняли участие 38 молодых мужчин в возрасте 19—32 лет, 13 из которых имели высокую спортивную квалификацию (мастера спорта СССР и кандидаты в мастера спорта), остальные были спортсменами I и II разрядов. Все испытуемые регулярно тренировались в скоростном плавании под водой с аквалангом и в нырянии в длину.

Для исследования некоторых показателей внешнего дыхания в процессе выполнения мышечной работы под водой нами была разработана и изготовлена установка, позволившая регистрировать следующие показатели: две пневмограммы («грудное» и «брюшное» дыхание), перепады давления в легочном автомате на вдохе и выдохе, легочную вентиляцию, частоту и глубину дыхания, частоту сердечных сокращений и частоту гребковых движений руками или ногами. Передача сигналов от датчиков осуществлялась по кабелю. Запись всех показателей производилась с помощью осциллографа, запаса пленки в котором хватало на 20 минут непрерывной регистрации. Вся установка была смонтирована в приборном ящике. Электропитание было как автономным, так и от электросети, что позволяло использовать установку в любых условиях. Для обеспечения безопасности испытуемого под водой при использовании питания от сети в схему установки был включен разделительный трансформатор. При проверке трансформатора на пробой подавалось напряжение в два киловольта. Питание датчика оксигеомографа производилось с помощью сухой батареи напряжением 6 в. Постоянство накала лампы датчика регулировалось резистором и контролировалось вольтметром. Питание усилителя биопотенциалов сердца осуществлялось от сухой батареи напряжением 4,5 в. В схему питания датчиков дыхания было включено стабилизирующее устройство с выходом напряжения 9,8 в. Оксигенация артериальной крови кислородом в процессе ныряния и задержки дыхания в покое на вдохе под водой изучалась с помощью оксигеомографа 036-М с увеличенной скоростью протяжки ленты (6 и 12 см/мин).

В лабораторных опытах испытуемые в течение 5 минут выполняли стандартную дозированную работу в условиях воды и суши. Стандартной работой служило вертикальное перемещение груза весом 10,7 кг на высоту 1 м, с частотой 20 циклов в минуту. Перед работой под водой груз утяжелялся на 1,37 кг с таким расчетом, чтобы его вес под водой оставался таким же, как и на суше. Как под водой, так и на суше испытуемые дышали сжатым воздухом. Восстановление наблюдалось нами в тех же условиях, в которых производилась работа.

В исследованиях, проводимых в условиях естественного подводного плавания, нагрузкой служило проплывание 500-

метровой дистанции в комплекте № 2 (автономный дыхательный прибор АВМ-1М с легочным автоматом «Украина-2», ласты и маска) со скоростью, максимальной для каждого испытуемого. Для дыхания под водой использовались нормоксические смеси кислорода с гелием, азотом и аргоном. Если плотность воздуха принять за 1,0, то относительная плотность гелио-кислородной смеси составляет 0,33 и аргоно-кислородной — 1,32.

За 30 минут до ныряния в длину испытуемые выполняли 40-секундную задержку дыхания на вдохе в покое под водой. После 10-минутного восстановления и отдыха испытуемые приступали к нырянию в длину на 50 м. Глубина погружения во время ныряния не превышала 1 м. По окончании задержки дыхания в покое и ныряния забирались пробы воздуха первого выдоха.

При выполнении стандартной работы, а также после задержки дыхания в покое и после ныряния газообмен исследовался по Дугласу — Холдену. Для забора выдыхаемого воздуха из-под воды в лабораторных опытах использовалось специально разработанное и изготовленное устройство. Во время скоростного плавания с аквалангом забирались пробы выдыхаемого воздуха в резиновые воздухоприемники небольшой емкости с невозвратным клапаном, что позволяло определять процент O_2 и CO_2 в этих пробах с максимальным приближением исследования к естественному подводному плаванию.

Всего было проведено 136 опытов: из них во время выполнения стандартной работы под водой и на суше — 24, скоростного плавания с аквалангом — 64, при нырянии и задержке дыхания на вдохе в покое под водой — 48. Расшифровано 136 осциллограмм и 48 оксигевограмм. Прделано 1496 газоанализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СТАНДАРТНОЙ РАБОТЫ ПОД ВОДОЙ И НА СУШЕ

При получении исходных данных было установлено, что если в состоянии относительного покоя на суше показатели вентиляции, газообмена и частоты сердечных сокращений (76 уд./мин.) не отличались от обычных средних величин, то в покое под водой МОД, потребление кислорода и выделение CO_2 увеличились более чем в 1,5 раза, а частота сердечных сокращений снизилась на 12 ударов в минуту (табл. 1). При этом давление газового потока в условиях суши на вдохе равнялось 41 мм вод. ст. и на выдохе — 52 мм вод. ст., под водой соответственно — 74 и 99 мм вод. ст. ($p < 0,001$ по всем показателям). На первой минуте нагрузки, выполняемой в различных условиях среды, МОД практически возрос одина-

ково, однако потребление кислорода ($p < 0,05$) и выделение углекислоты ($p < 0,001$) под водой были значительно меньшими. Величина давления в легочном автомате под водой на вдохе составляла 129 мм вод. ст. и на выдохе — 195 мм вод. ст. На суше этот показатель был равен 87 и 174 мм вод. ст. ($p < 0,001$ на вдохе и $p < 0,05$ на выдохе). На 2 и 3-й минутах работы под водой МОД оставался практически на том же уровне, показатели газообмена возрастали. В условиях суши МОД и выделение углекислоты увеличились почти вдвое, потребление кислорода — на 60—70%. Последняя минута работы характеризовалась увеличением всех показателей. Так, МОД под водой достигал уровня 37,0 л/мин, потребление кислорода — 1,44 л/мин и выделение CO_2 — 1,20 л/мин. Давление газового потока в фазе вдоха было равно 160 мм вод. ст., в фазе выдоха — 265 мм вод. ст. На суше легочная вентиляция равнялась 59,6 л/мин, потребление кислорода составляло 2,31 л/мин и выделение углекислоты — 2,13 л/мин. Перепады давления в легочном автомате при этом равнялись на вдохе 145 мм вод. ст. и выдохе — 280 мм вод. ст. (различия перепадов давления в дыхательном цикле под водой и на суше статистически недостоверны $p > 0,05$). Частота сердцебиения в течение всего времени работы под водой значительно не изменялась (113—117 уд./мин.). При работе на суше частота пульса постепенно возрастала от начала нагрузки и до ее окончания (129—167 уд./мин.).

Анализируя полученные данные, следует отметить, что выполнение работы под водой с использованием автономного дыхательного прибора оказывает существенное воздействие на дыхательную функцию человека и организм в целом. Одно только погружение под воду увеличивает энерготраты, очевидно, в связи с увеличением теплопотерь и некоторого повышения сопротивления дыханию. При нахождении в воде во взвешенном состоянии не требуется расхода энергии на удержание позы и преодоления веса отдельных звеньев собственного тела при их перемещении. Последнее нашло свое подтверждение в наших опытах при сравнении затрат кислорода на выполнение стандартной работы в различных условиях среды. При работе под водой потребление кислорода было в 1,6 раза меньшим, чем при выполнении аналогичной работы в обычных условиях воздушной среды. Известно, что выполнение мышечной работы связано с возрастанием массы воздуха, перемещаемого по трахео-бронхиальному дереву, которое обеспечивается дополнительными энерготратами. При дыхании под водой считается, что основным фактором, затрудняющим вдох, является суммарное сопротивление собственно легочного автомата и гидростатического сопротивления, величина которого равна высоте водного столба между условным центром легких и мембраной легочного автомата. В нашем

Таблица 1
Минутный объем дыхания и газообмен при 5-минутной стандартной работе под водой и на суше (M ± m)

Показатели	Исход. данные	Работа (мин.)					Восстановление (мин.)					Среднее от 5 до 10	
		1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	1-я	2-я	3-я	4-я			
Под водой	МОД	15,4	25,5	26,4	26,9	32,0	37,2	33,3	21,7	21,6	17,3	16,3	
	л (ВПС)	±0,8	±0,85	±1,55	±1,67	±1,74	±1,67	±1,63	±1,45	±1,33	±1,20	±0,30	
	Потребление O ₂ л/мин (СТРД)	0,46 ±0,01	0,50 ±0,03	1,04 ±0,05	1,05 ±0,04	1,23 ±0,05	1,44 ±1,06	1,17 ±0,04	0,78 ±0,04	0,59 ±0,04	0,50 ±0,02	0,51 ±0,01	
На суше	Выделение CO ₂ л/мин (СТРД)	0,37 ±0,01	0,73 ±0,02	0,81 ±0,04	0,84 ±0,04	1,01 ±0,04	1,20 ±0,05	1,04 ±0,04	0,76 ±0,05	0,59 ±0,04	0,46 ±0,03	0,46 ±0,01	
	МОД	9,6	24,2	42,0	44,3	51,7	59,6	41,5	28,7	22,4	17,4	13,1	
	л (ВПС)	±0,27	±1,11	±1,89	±2,67	±2,91	±3,44	±1,36	±1,72	±1,66	±1,38	±0,68	
На суше	Потребление O ₂ л/мин (СТРД)	0,25 ±0,009	1,03 ±0,04	1,06 ±0,07	1,76 ±0,07	2,04 ±0,08	2,31 ±0,09	1,45 ±0,03	0,76 ±0,04	0,59 ±0,03	0,46 ±0,03	0,37 ±0,01	
	Выделение CO ₂ л/мин (СТРД)	0,22 ±0,009	0,79 ±0,03	1,47 ±0,07	1,60 ±0,08	1,87 ±0,07	2,13 ±1,09	1,42 ±0,03	0,83 ±0,04	0,63 ±0,04	0,47 ±0,03	0,36 ±0,01	

случае, при вертикальном положении испытуемого и расположении легочного автомата у ротовой полости, гидростатическое сопротивление составляло 180—220 мм вод. ст. Изучение перепадов давления на вдохе и выдохе в легочном автомате при выполнении стандартной работы под водой показало отчетливо меньшие величины по сравнению с расчетными. При практически равном МОД на 1-й минуте работы под водой и на суше перепады давления на вдохе в легочном автомате под водой были на 42 мм вод. ст. выше, чем на суше. Дальнейшее повышение давления газового потока в дыхательном цикле со 2-й минуты и до окончания работы было несущественным, так как прирост легочной вентиляции осуществлялся, главным образом, за счет увеличения дыхательного объема, что, вероятно, являлось приспособительной реакцией дыхания на возрастающее сопротивление.

Очевидно, в подводных условиях особо проявляются адаптационные реакции организма на дополнительное сопротивление дыханию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ПОДВОДНОГО ПЛАВАНИЯ

Скоростное плавание с аквалангом на дистанцию 500 м при дыхании газовыми смесями с различной плотностью. В таблицах 2, 3 и 4 представлены средние данные, полученные в результате скоростного подводного плавания при дыхании воздухом, аргоно-кислородной и гелио-кислородной смесями. Среднее время проплывания 500-метровой дистанции при дыхании воздухом составляло 8 мин. 22,8 сек., при дыхании менее плотной гелио-кислородной смесью скорость плавания была значительно выше (7 мин. 58,2 сек.) и при дыхании плотной аргоно-кислородной смесью скорость плавания снизилась (8 мин. 33,2 сек.). В покое средние величины давления газового потока в легочном автомате дыхательного прибора на вдохе и выдохе различались незначительно при дыхании всеми смесями: при дыхании воздухом — 65/95 мм вод. ст., аргоно-кислородной смесью — 58/86 и гелио-кислородной — 61/93 мм вод. ст. Однако МОД менялся в зависимости от плотности смеси (при дыхании воздухом — 17,7 л, смесью аргона с кислородом — 15,1 л, смесью гелия с кислородом — 25,0 л) за счет изменения частоты дыхания и дыхательного объема ($p < 0,001$ с гелиевой смесью по всем показателям). Поглощение кислорода возрастало с уменьшением плотности дыхательной смеси. При дыхании воздухом потребление кислорода составляло 0,68 л/мин, аргоновой смесью — 0,59 л/мин и гелиевой смесью — 0,72 л/мин ($p < 0,05$ аргоновой смеси с гелиевой). Первые две минуты работы (период вработывания) величины давления газового потока в дыхательном цик-

ле, МОД и газообмен постепенно нарастали, достигая к 3-й минуте работы значений, оставшихся относительно стабильными до конца нагрузки. Динамика всех показателей определялась плотностью дыхательной смеси. На 3-й минуте плавания величина давления газового потока при дыхании воздухом составляла 167/226, смесью аргона с кислородом — 190/244 и смесью гелия с кислородом — 126/192 мм вод. ст. ($p < 0,05$ с гелиевой смесью).

Таблица 2

Давление в легочном автомате на вдохе и выдохе, минутный объем дыхания и потребление кислорода в процессе скоростного плавания с аквалангом на дистанцию 500 м при дыхании сжатым воздухом¹ (M±m)

Показатели	Исход. данные	Работа (мин.)			Восстан. (мин.)	
		3-я	6-я	9-я	2-я	5-я
в фазе вдоха	65 ±2,2	167 ±8,7	167 ±8,9	184 ±11,5	91 ±4,7	64 ±4,4
Давление в мм вод. ст.						
в фазе выдоха	95 ±2,9	226 ±9,1	227 ±8,9	235 ±9,0	125 ±4,3	82 ±6,7
МОД	17,7	63,0	60,6	66,3	36,0	17,9
л (ВТПС)	±1,4	±1,8	±2,3	±2,9	±1,9	±2,3
Потребление O ₂	0,68	4,21	4,26	4,66	1,60	0,58
л/мин (СТРД)	±0,06	±0,11	±0,16	±0,18	±0,06	±0,04

Таблица 3

Давление в легочном автомате на вдохе и выдохе, минутный объем дыхания и потребление кислорода в процессе скоростного плавания с аквалангом на дистанцию 500 м при дыхании 21% O₂+79% Ar² (M±m)

Показатели	Исход. данные	Работа (мин.)			Восстан. (мин.)	
		3-я	6-я	9-я	2-я	5-я
в фазе вдоха	58 ±4,9	190 ±9,6	194 ±7,4	217 ±13,3	100 ±5,6	60 ±4,3
Давление в мм вод. ст.						
в фазе выдоха	86 ±6,3	244 ±12,2	250 ±9,3	276 ±14,8	134 ±9,1	77 ±4,3
МОД	15,1	59,4	58,5	62,9	29,7	16,1
л (ВТПС)	±0,9	±1,5	±1,1	±1,5	±1,2	±0,7
Потребление O ₂	0,59	4,44	4,39	4,69	1,55	0,72
л/мин (СТРД)	±0,04	±0,25	±0,22	±0,18	±0,09	±0,04

¹ Время проплывания дистанции — 8 мин. 22,8 сек. ±0 мин. 05,6 сек.

² Время проплывания дистанции — 8 мин. 33,2 сек. ±0 мин. 09,6 сек.

Таблица 4
 Давление в легочном автомате на вдохе и выдохе, минутный объем дыхания и потребление кислорода в процессе скоростного плавания с аквалангом на дистанцию 500 м при дыхании 21% O₂+79% He¹
 (M±m)

Показатели	Исход. данные	Работа (мин.)			Восстан. (мин.)	
		3-я	6-я	8-я	2-я	5-я
в фазе вдоха	61 ±4,2	126 ±8,7	135 ±10,5	159 ±14,1	77 ±4,5	59 ±4,1
Давление в мм вод. ст.						
в фазе выдоха	93 ±4,3	192 ±12,7	195 ±9,3	221 ±10,0	109 ±4,7	76 ±6,8
МОД	25,0	92,7	100,8	108,1	51,2	19,7
л (ВТРС)	±2,2	±3,6	±3,1	±3,7	±2,9	±1,7
Потребление O ₂	0,72	4,48	5,06	5,37	1,93	0,67
л/мин (СТРД)	±0,03	±0,26	±0,17	±0,18	±0,15	±0,05

МОД соответственно достигал 63,0, 59,4 и 92,7 л/мин ($p < 0,001$ с гелиевой смесью). Потребление кислорода возросло до 4,21 л/мин при дыхании воздухом, 4,44 л/мин — аргоновой смесью и 4,48 л/мин — гелиевой смесью ($p > 0,05$ по всем смесям). На 4—7-й минутах работы стабильность величин давления газового потока и МОД при дыхании аргоно-кислородной смесью поддерживалась некоторым увеличением частоты дыхания, компенсировавшим постепенное снижение дыхательного объема. При дыхании воздухом частота дыхания и дыхательный объем мало изменялись. Потребление кислорода оставалось без изменения с некоторой тенденцией к увеличению. Увеличение всех показателей на 8—9-й минутах плавания связано с повышением интенсивности работы на финише. При дыхании гелио-кислородной смесью величина давления газового потока и МОД неуклонно возрастали, последняя — за счет прироста частоты дыхания и дыхательного объема. Потребление кислорода значительно нарастало, достигая на последней минуте работы очень высоких величин — 5,37 л/мин ($p < 0,01$).

Таким образом, на высоте нагрузки давление газового потока на вдохе и выдохе было наиболее высоким при дыхании аргоно-кислородной смесью, заметно снижалось при дыхании воздухом и, особенно, при дыхании гелио-кислородной смесью. МОД был самым низким при дыхании смесью аргона с O₂, увеличивался при дыхании воздухом и заметно возрастал при дыхании смесью гелия с O₂. Однако потребление кислорода

¹ Время проплывания дистанции 7 мин. 58,2 сек. ±0 мин. 05,8 сек.

при дыхании аргоновой смесью превышало этот показатель, наблюдавшийся при дыхании воздухом. С другой стороны, потребление кислорода при дыхании гелиевой смесью также было выше, чем при дыхании воздухом (см. табл. 2, 3 и 4).

Показатели давления газового потока восстанавливались до исходных величин по окончании упражнения при дыхании аргоно-кислородной смесью в течение 5 минут, при дыхании воздухом — 4 минут и при дыхании гелио-кислородной смесью в течение 3 минут. МОД восстановился до исходного соответственно за 6, 5 и 4 минуты. Потребление кислорода при дыхании воздухом и гелиевой смесью возвратилось к исходному уровню в течение 5 минут после работы. При дыхании аргоновой смесью величина поглощения кислорода превышала исходный показатель на 5-й минуте восстановительного периода.

Анализ вентиляционных показателей и показателей газообмена в процессе скоростного подводного плавания при дыхании газовыми смесями с различной плотностью показал, что в покое сопротивление дыханию нормоксических смесей кислорода с азотом, аргоном и гелием было практически одинаковым, что согласуется с литературными данными. При этом минутный объем дыхания уменьшался с увеличением плотности дыхательной смеси вследствие уменьшения частоты дыхания и дыхательного объема. Вполне вероятно, что реакция дыхания, наблюдаемая нами в покое, является приспособительной реакцией тренированного аквалангиста, направленной на экономизацию работы дыхательной мускулатуры. Наряду с этим известно, что между внутрилегочным давлением, скоростью потока вдыхаемой газовой смеси и степенью наполнения легких существует функциональная зависимость. Уменьшение потока дыхательной смеси при увеличении ее плотности и вязкости является причиной снижения степени наполнения легких. Первые две минуты работы характеризовались возрастанием легочной вентиляции за счет увеличения частоты и глубины дыхания. На 3-й минуте плавания при вдыхании воздуха и аргоно-кислородной смеси наступала относительная стабилизация до последней минуты работы. Минутный объем дыхания при дыхании аргоно-кислородной смесью колебался в пределах 58—60 л/мин, при дыхании воздухом в пределах 60—63 л/мин. Однако потребление кислорода в первом случае было около 4,4 л/мин и во втором — около 4,3 л/мин. Вероятно, это определялось более высокой «кислородной стоимостью» работы дыхательных мышц при дыхании аргоновой смесью. Это предположение согласуется с данными перепада давления в дыхательном цикле, которое при вдыхании смеси аргона с кислородом было существенно большим.

Дыхание гелио-кислородной смесью при интенсивной работе под водой характеризовалось значительным минутным

объемом дыхания, который к 3-й минуте работы достигал 92,7 л/мин и продолжал возрастать к концу плавания, достигая высокого уровня — 108,1 л/мин при очень высоких цифрах поглощения кислорода (4,9—5,4 л/мин). Таким образом, при вдыхании гелиевой смеси «потолок» вентиляции оказался наиболее высоким.

Относительно малые величины МОД при дыхании воздухом и аргоно-кислородной смесью могут объясняться прежде всего высоким сопротивлением дыханию в дыхательном приборе и особенностью данного вида двигательной деятельности. Значительный прирост потребления кислорода при дыхании гелио-кислородной смесью при работе может быть связан с облегчением работы дыхательных мышц, что позволило в свою очередь показать более высокую скорость плавания.

Несмотря на достоверные различия в потреблении кислорода, частота сердечных сокращений (ЧСС) во время скоростного подводного плавания не имела существенных различий. При дыхании воздухом ЧСС в среднем колебалась в пределах 164—167 ударов в минуту. При меньшей скорости плавания ЧСС во время дыхания аргоно-кислородной смесью (166—170 уд./мин.) практически была такой же, как и при дыхании гелио-кислородной смесью (166—170 уд./мин.). В конце нагрузки при дыхании аргоновой смесью ЧСС (178 уд./мин.) достоверно превышала аналогичный показатель, полученный при дыхании воздухом (171 уд./мин.).

Если исходить из величин потребленного кислорода, то при дыхании гелиевой смесью его на единицу времени было поглощено значительно больше, чем это наблюдалось при дыхании остальными смесями. При увеличении скорости плавания с аквалангом существенно возрастает сопротивление движению и с ним мощность работы, что закономерно приводит к увеличению потребления кислорода. По-видимому, значительное снижение внутригрудного давления при дыхании смесью гелия с кислородом уменьшает сопротивление сосудов малого круга и тем самым облегчает работу правого отдела сердца. Вероятно, вследствие этого возрастает ударный объем крови и при той же ЧСС минутный объем крови увеличивается.

Ныряние и задержка дыхания в покое под водой. Перед нырянием в условиях относительного покоя на суше МОД составлял 6,7 л, потребление кислорода — 171 мл/мин. Задержка дыхания во время работы под водой вызвала в последующие 10 минут восстановления увеличение потребления кислорода, более чем в 4 раза превышавшее газообмен в состоянии покоя на суше, а после задержки дыхания (ЗД) в покое под водой — в 2,2 раза. Легочная вентиляция при этом превышала уровень покоя на суше в первом случае на 330%, во втором — на 160%. Путем вычитания одних показателей из дру-

гих нами было установлено, что после ЗД в покое под водой в течение 10 минут реституции было избыточно поглощено 2005 мл O_2 по сравнению с покоем на суше. Разность между показателями газообмена после ныряния и покоя на суше составляла 5643 мл потребленного кислорода. Стоимость по кислороду одной только двигательной деятельности под водой во время ныряния составляла 3639 мл O_2 . Кроме этих данных, мы получили процент содержания кислорода в первом выдохе сразу после ныряния и ЗД. После ныряния в воздухе первого выдоха кислорода в среднем оставалось 5,6%, после задержки дыхания на входе в покое под водой — 11,0%.

Расчет использования кислорода во время ныряния из кислородного резерва организма при полном разобщении легких человека с атмосферой показал, что минимальное использование кислорода составляло примерно 1600 мл. Эта величина складывается из расходования кислорода из воздуха легких на полном вдохе (примерно 800 мл), крови (примерно 300 мл), возможно, из миоглобина (примерно 300 мл) и тканевой жидкости (около 200 мл). Если во время ныряния расхода кислорода на дыхательные движения практически не было, то в процессе восстановления стоимость избыточной вентиляции составляла примерно 250 мл кислорода (Cournaud et al., 1954). Следует также учесть повышенную активность сердца после ныряния, которая исчисляется по Lehmann (1962) в пределах 5% от кислорода, затраченного на работу. В нашем случае эта величина приблизительно равнялась 200 мл O_2 . Таким образом, на ныряние, очевидно, было израсходовано минимум 1600 мл кислорода из кислородного резерва организма, и 450 мл O_2 пошло на работу дыхания и сердца в период реституции, что в общем составляет 2 с небольшим литра кислорода. Необъяснимой остается трата 1600 мл кислорода, т. е. 45% от кислорода, пошедшего на обеспечение двигательной деятельности при нырянии. Возможно, это количество кислорода было израсходовано на компенсацию аэробных процессов или на процессы, еще не изученные во время ныряния. Таким образом, можно считать, что аэробные процессы в условиях разобщения человека с дыхательной средой имеют существенное значение для обеспечения энерготрат при нырянии.

В процессе ныряния оксигенация артериальной крови уменьшалась в начале относительно плавно, а с 15—20-й секунды периода работы — прогрессивно, к концу упражнения достигая в среднем 65,0% HbO_2 . С возобновлением дыхания в первые 5 секунд насыщение артериальной крови кислородом продолжало снижаться, достигая 62,0%, затем резко возрастало, и к концу 1-й минуты восстановления процент оксигемоглобина увеличился до 90%. На 10-й минуте реституции наблюдалось недовосстановление оксигенации артериальной

крови (93,5%). При нырянии ЧСС значительно возрастала на первых 15 секундах работы с 83 до 145 (сокращений в пересчете на минуту). Затем, несмотря на активную двигательную деятельность, начинала снижаться и на 35—40-й секундах ныряния становилась ниже исходного уровня. С возобновлением дыхания ЧСС в первые 5 секунд (как и насыщение крови кислородом) продолжала снижаться, затем резко нарастала с последующим плавным снижением на 40-й секунде восстановления. К концу 10-й минуты покоя ЧСС возвратилась близко к исходному уровню. Процент оксигемоглобина при ЗД в покое под водой первые 25 секунд почти не изменялся. В последующем незначительно снижался и к концу 40-секундной ЗД достигал 90,0% НвО₂. Резкая тахикардия к 5-й секунде ЗД сменялась брадикардией, ЧСС при этом на 15—20-й секундах упражнения становилась ниже исходной (77 уд. в пересчете на минуту). К 40-й секунде ЗД ЧСС составляла 66% от исходного уровня. После возобновления дыхания снижение оксигенации крови и ЧСС еще продолжалось первые 5 секунд восстановления, сменяясь затем резким увеличением.

В наших опытах урежение частоты сердцебиения совпадало с началом гипоксемической фазы кривой оксигенации крови и прогрессировало в прямой зависимости от изменения насыщения артериальной крови кислородом. Резкая тахикардия совпадала с началом восстановления кривой оксигенации артериальной крови после возобновления дыхания.

При анализе возникновения брадикардии во время ныряния следует обратить внимание на данные насыщения артериальной крови кислородом и частоты сердечных сокращений, полученные нами при задержке дыхания в покое под водой. Возникновение брадикардии при маловыраженной гипоксемии, видимо, обусловлено рефлекторным влиянием с рефлексогенных зон кожных покровов тела в связи с погружением в воду и ваготропным эффектом, возникающим при переходе задержки дыхания в натуживание. Развитие брадикардии при работе можно представить как результат преобладания ваготропного влияния над симпатикотропным. Относительно небольшие величины кислородного долга после ныряния объясняются, по-видимому, перестройкой кровообращения, направленной на снижение кислородного запроса неработающих скелетных мышц. Современные данные приводят к выводу, что реакция рационального использования кислорода при нырянии имеется у всех позвоночных на всех стадиях жизни.

Наши исследования показали большое значение для адаптации человека к напряженной мышечной работе под водой условий, непосредственно влияющих на дыхательную функцию.

Тема диссертации вошла в план работы секции «НА» (Human Adaptability) Международной Биологической программы на 1969 г.¹

ВЫВОДЫ

1. Продолжительная циклическая работа под водой при дыхании сжатым воздухом в отличие от выполнения работы в обычных условиях воздушной среды осуществляется при значительно большем сопротивлении дыханию на 1 л вентиляции и характеризуется высоким потреблением кислорода, в пределах 5,0 л/мин. Высокий уровень потребления кислорода связан с повышенным процентом его поглощения (7,1—7,2%) при сравнительно небольшом минутном объеме дыхания (60,0—70,0 л/мин).

2. Вертикальное перемещение под водой груза весом 10,7 кг со скоростью около 0,7 м/сек по сравнению с эквивалентной работой, выполняемой в обычных условиях воздушной среды, протскает при меньшей легочной вентиляции и частоте сердцебиений, меньшем кислородном запросе и кислородном долге. Это, вероятно, связано со снижением затрат энергии на перемещение отдельных звеньев собственного тела при работе в воде.

3. Скоростное плавание под водой с аквалангом при дыхании сжатым воздухом, гелио-кислородной и аргоно-кислородной нормоксическими смесями сопровождается снижением МОД в прямой зависимости от плотности вдыхаемой газовой среды. При этом скорость проплывания дистанции возрастает в обратной зависимости от плотности вдыхаемой газовой смеси (наибольшая скорость наблюдалась при дыхании гелиевой смесью и наименьшая — при дыхании аргоновой смесью). Наиболее высокие величины МОД, потребления кислорода и выделения углекислоты имеют место при дыхании нормоксической гелио-кислородной смесью, что, вероятно, связано с улучшением условий газообмена и снижением аэродинамического сопротивления дыхательных путей. Восстановление МОД и газообмена к дорабочему уровню происходит тем быстрее, чем меньшую плотность имеет дыхательная смесь.

4. При нырянии наблюдается закономерно развивающаяся гипоксемия и гиперкапния, которые сопровождаются брадикардией. Урежение частоты сердечных сокращений совпадает с началом гипоксемической фазы кривой оксигенации артериальной крови и продолжается в прямой зависимости от уменьшения уровня оксигемоглобина. Резкое учащение сердцебиения совпадает с началом фазы восстановления кривой насы-

¹ Информационные материалы (выпуск 26). Отчет о деятельности секции по адаптации человека за 1969 г. Ленинград, 1970, стр. 15.

шения артериальной крови кислородом после возобновления дыхания. Во время 40-секундной задержки дыхания на вдохе в покое под водой на фоне незначительного гипоксемического сдвига (до 90,5% НvO₂ к концу пробы) также наблюдается резкая брадикардия, частота пульса к окончанию задержки дыхания становится ниже исходной. Возобновление дыхания сопровождается возрастанием частоты сердечных сокращений, близким к величинам исходного уровня. По-видимому, как в условиях задержки дыхания в покое под водой, так и при нырянии резкое урежение частоты сердцебиения связано с рефлексорными циркуляторными изменениями, которые направлены на экономное расходование кислорода в организме.

5. Напряженная мышечная работа во время ныряния осуществляется при 100% кислородном долге в условиях значительной трудности для функции дыхания и сердечной деятельности. При этом около 50% кислородного запроса, необходимого для обеспечения двигательной деятельности во время ныряния, ликвидируется за счет использования кислородного резерва организма. Погашение кислородного долга протекает при значительной работе дыхательных мышц.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Установка для исследования функции внешнего дыхания при двигательной деятельности под водой. — В кн.: «Сборник научных работ молодых ученых». ГДОИФК им. П. Ф. Лесгафта. Л., 1968, стр. 45—46 (соавтор В. Ф. Воякин).

2. Исследование функции внешнего дыхания и частоты сердечных сокращений при двигательной деятельности человека под водой с использованием дыхательных аппаратов на сжатом воздухе. — В кн.: «Актуальные вопросы подводного спорта». Материалы I научно-практической конференции. Киев, 1968, стр. 47—49 (соавторы А. Б. Гандельсман и В. Ф. Воякин).

3. Методика и результаты исследования функции внешнего дыхания и частоты сердечных сокращений при двигательной деятельности человека под водой. — В сб. «Адаптация спортсменов к работе при различном кислородном режиме». М., Фис, 1969, стр. 38—44 (соавторы А. Б. Гандельсман и В. Ф. Воякин).

4. Adaptation of Man in Diving and scuba Diving. Paper read of the 1-st scientific and Medical Committee of F. I. N. A., London, 1969, p. 20—21 (соавторы А. Б. Гандельсман, В. Ф. Воякин, В. П. Пономарев).

5. Особенности газообмена и частоты сердцебиения при выполнении дозированной нагрузки под водой. — В кн.: «Сборник научных работ молодых ученых». ГДОИФК им. П. Ф. Лесгафта. Л., 1970, стр. 40—41 (соавтор В. Ф. Воякин).

6. К механизму брадикардии при нырянии. — В кн.: «Материалы итоговой научной конференции Факультета за 1970 г.» Л., ВДКФФКиС, 1971, стр. 160—163 (соавторы В. Ф. Воякин и В. П. Пономарев).

7. Влияние плотности вдыхаемой смеси на функцию внешнего дыхания и газообмен аквалангиста. — В кн.: «Функция внешнего дыхания в измененной газовой среде». Тезисы симпозиума (январь 1971 г.). Л., 1971, стр. 39—40 (соавтор В. П. Пономарев).

8. Вентиляция легких и газообмен при дыхании различными газовыми смесями во время плавания человека под водой. — «Физиологический журнал СССР», т. 62, 1971, № 12, стр. 1802—1807 (соавтор В. П. Пономарев).

Материалы диссертации доложены на конференциях

1. 1-я научно-практическая конференция «Актуальные вопросы подводного спорта», Киев, 1968 г.

2. 1-st Conference of the scientific and Medical Committee of F. I. N. A., London, 1969.

3. 1-я Всесоюзная конференция «Подводный спорт в клинко-физиологическом освещении», Москва, 1969 г.

4. XI съезд Всесоюзного физиологического общества им. И. П. Павлова, Ленинград, 1970 г.

5. Симпозиум «Функция внешнего дыхания в измененной газовой среде», Ленинград, 1971 г.

1786