УДК 612.(204.1)

В. М. Ільїн, С. О. Гуляр, А. І. Дмітрук

Зміни статичних та динамічних характеристик зовнішнього дихання водолазів після короткочасних занурень на глибину до 100 м

В серии кратковременных погружений (КП) на глубину до 100 м в условиях Баренцова моря обследовано пять профессиональных водолазов-глубоководников. В погружениях на 40 м в качестве дыхательной смеси применяли сжатый воздух, в погружениях на 60, 80 и 100 м — азотно-гелио-кислородную смесь. Максимальное время пребывания в условиях изопрессии (без декомпрессии) не превышало 45 мин. До начала серии КП, между отдельными КП и на 3-и сутки после окончания декомпрессии в погружении на 100 м с помощью методов компьютерной спиро- и пневмотахометрии, а также оксигемометрии измеряли объемные и скоростные показатели легких в покое и при форсированном выдохе в воздушной и гелио-кислородной средах. Показано, что во время проведения серии КП у водолазов возникает бронхоспастический синдром, играющий ведущую роль в развитии преходящей изолированной или генерализованной обструкции дыхательных путей. Обструктивные явления, по-видимому, связаны с нарушением эластических свойств легочной ткани, развитием эспираторных коллапсов и могут стать причиной стойкого расширения легких.

Вступ

Відомо [1, 3], що багаторазовий вплив гіпербарії викликає функціональні і структурні перебудови в дихальній системі водолазів, які зберігаються тривалий час після закінчення декомпресії. Їх позитивна роль полягає у зниженні початкових негативних реакцій дихання на підвищену густину газового середовища і гіпероксію, негативна — у накопичуванні залишкових зрушень, які ведуть до хронічних бронхоспастичних станів [3, 7—10]. Характер і вираженість цих реакцій визначаються хроноконцентраційними ефектами комплексу гіпербаричних факторів [1] і можуть суттєво розрізнятися залежно від конкретно застосовуваної технології водолазних робіт. Показано, що в сатураційних зануреннях протягом 7—10 діб спостерігаються фазові зміни дихання, котрі визначаються більшою мірою тривалістю впливу гіпербарії [3]. При короткочасних зануреннях (КЗ) комплекс реакцій залежить в основному від інтенсивності гіпербаричних факторів. При проведенні серії КЗ, ідучих один за одним з відносно невеликими інтервалами, сумація тимчасових і концентраційних ефектів здогадно веде до накопичення в дихальній системі несприятливих зрушень. Проте, таких даних практично нема, хоча в практиці водолазних робіт метод КЗ отримав широке розповсюдження.

В цій роботі наведені результати досліджень функціональних зрушень в дихальній системі водолазів під час та після закінчення серії КЗ.

Методика

В серії послідовних КЗ на глибину до 100 м за умов Баренцова моря взяли участь п'ять професійних водолазів-глибоководників. В зануреннях на 40 м як дихальну суміш застосовували стиснуте повітря, в зануреннях на 60, 80 і 100 м — азотно-геліо-кисневу суміш, що містить 10—11 % O_2, 50 % He, решта — N_2. Компресію провадили в колоколі, який спускали під воду. Після підводної роботи водолазів, тривалість

© В. М. ІЛЬІН, С. О. ГУЛЯР, А. І. ДМІТРУК, 1993

якої не перевищувала 20—30 хв, декомпресію починали в колоколі і завершували в барокамері гіпербаричного комплексу водолазного судна «Спрут» спеціалізованого управління «Арктикморнефтегазфлот». Інтервал між зануреннями складав 2—3 доби.

Функціональний стан дихальної системи водолазів оцінювали за умов м. Мурманська перед початком серії КЗ, між окремими КЗ і на 3-ю добу після закінчення декомпресії при зануреннях на глибину 100 м. Для двох водолазів період спостереження був подовжений до 7 діб після закінчення серії КЗ.

За допомогою комп'ютерної спіро- і пневмотахометрії вимірювали життєву і форсовану життєву ємкість легень (VC та FVC відповідно), резервний об'єм вдиху видиху (RVI та RVE відповідно), об'єм форсованого видиху за 1 с (FEV_1), максимальну об'ємну швидкість форсованого видиху (FEF_{max}), об'ємну швидкість видиху 25 % FVC (FEF_{25}), 50 % FVC (FEF_{50}) і 75 % FVC (FEF_{75}). Для визначення залишкового об'єму (RV) легень використовували оксиогемометричний метод [6] і таку формулу:

$$(VT \cdot t_1)/(t_2 - t_1),$$

де t_1 — час затримання дихання (с), протягом якого відносна оксигенація крові знижується на n % при об'ємі легень, який дорівнює RV (мл); t_2 — те ж саме при об'ємі легень, який дорівнює RV+VT. Для стандартизації вимірювань вважали n=5 %, VT=(0,25×VC) мл. Розраховували функціональний залишковий об'єм легень (FRV) і загальну ємкість легень (TVL).

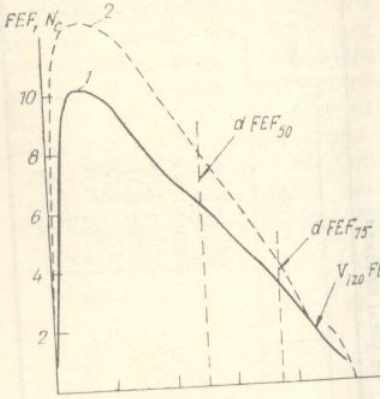
Для виявлення ранніх змін у дрібних бронхах застосовували проби з форсованим видихом в повітряному та геліо-кисневому середовищах. Проби здійснювали в положенні випробуваного сидячи за звичайною методикою. Реєстрували не менш ніж три пари кривих «потік — об'єм» під час послідовних вдихів і видихів крізь клапанну коробку повітря і газової суміші, яка складається з 80 % He і 20 % O_2. Отримані криві накладали одну на другу на рівні RV і нормували у відсотках по відношенню до FVC (мал. 1). Визначали об'єми ізопотоку (V_{iso} FEF) і зростання (у відсотках) в гелієвому середовищі об'ємної швидкості видиху на рівнях 50 % FVC (d FEF_{50}) і 75 % FVC (d FEF_{75}). V_{iso} FEF вимірювали як об'єм, при якому швидкості видиху були однакові в обох газових сумішах, і нормували у відсотках по відношенню до VC (V_{iso} FEF/VC).

Результати та їх обговорення

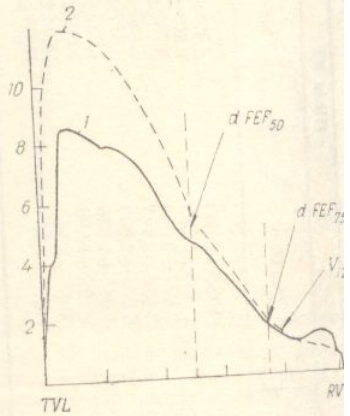
В табл. 1 наведені середній вік, ріст, маса і водолазний стаж обстежених водолазів, в табл. 2 і 3 — статичні і динамічні характеристики їх легень на всіх етапах обстеження.

Функціональний стан дихальної системи у водолазів перед спусками був задовільним. Більшість об'ємних та швидкісних показників вентиляторної функції легень відповідала нормативним значенням для осіб даного віку і росту. В той же час у двох найбільш досвідчених водолазів відзначалися злегка знижені значення об'ємної швидкості видихуваного газового потоку при невеликих значеннях легеневого об'єму (FEF_{50} і FEF_{75}). Ці результати відомостями про наявність у водолазів функції дрібних дихальних шляхів вому погіршенні їх прохідності.

В ході виконання серії КЗ намічних характеристик диханн



а



б

Мал. 1. Криві «потік — об'єм», з ному (*1*) і геліо-кисневому (*2*) закінчення (*б*, 03.06.91) серії коро

Мал. 2. Криві «потік — об'єм», та другого (*б*) перед початком короткочасних занурень.

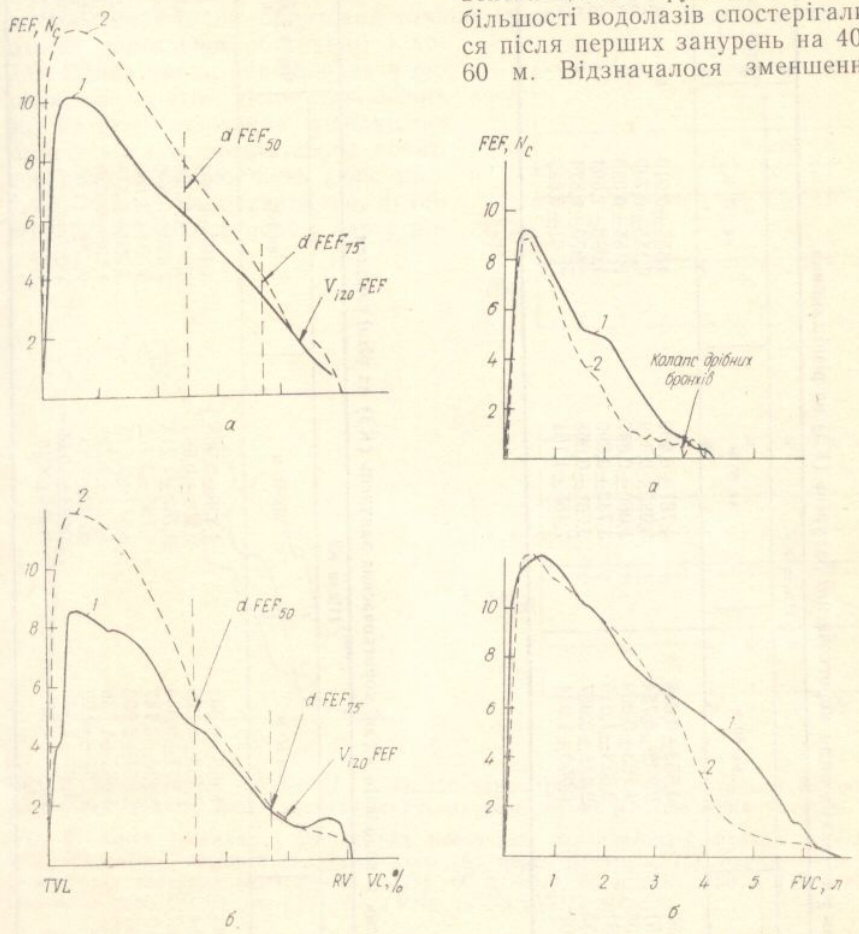
VC, збільшення RV, FRV і значення швидкості форсо свідчить про зниження про результати форсованого (20 % O_2, 80 % He). Зни $dFEF_{25}$, а також збільшенн ті бронхів і виникнення їх ний вигляд кривих «потік— КЗ, дав змогу прийти до вис нералізованої обструкції д кого лінійного підняття кр низхідна частина кривої

Таблиця 1. Індивідуальні характеристики обстежених водолазів

Показник	Середнє значення показника ($\bar{x}$)	Стандартне відхилення ($\pm m$)	Мінімальне значення показника (X_{min})	Максимальне значення показника (X_{max})
Вік, роки	31	2,3	27	33
Ріст, см	178	6,2	169	186
Маса, кг	83,2	6,68	75	91
Водолазний стаж, роки	9	4	5	13

му (FEF_{50} і FEF_{75}). Ці результати збігаються з існуючими у літературі відомостями про наявність у водолазів з великим стажем роботи дисфункції дрібних дихальних шляхів [2, 9, 10], що виявляється в суттєвому погіршенні їх прохідності.

В ході виконання серії КЗ змінювалася більшість статичних і динамічних характеристик дихання. При цьому суттєві зміни показників вентиляційної функції легень у більшості водолазів спостерігалися після перших занурень на 40 і 60 м. Відзначалося зменшення



Мал. 1. Криві «потік — об'єм», зареєстровані у водолаза при диханні у повітряному *(1)* і геліо-кисневому *(2)* середовищах перед початком *(а,* 31.05.91) і після закінчення *(б,* 03.06.91) серії короткочасних занурень на 60 м.

Мал. 2. Криві «потік — об'єм», що зареєстровані у двох водолазів — першого *(а)* та другого *(б)* перед початком *(1,* 29.05.91) та після закінчення *(2,* 01.06.91) серії короткочасних занурень.

VC, збільшення RV, FRV і TVL. Значно низькими (на 48—56 %) стали значення швидкості форсованого видиху (FEF_{25}, FEF_{50}, FEF_{75}), що свідчить про зниження прохідності дихальних шляхів. Це підтвердили результати форсованого дихання в геліо-кисневому середовищі (20 % O_2, 80 % He). Зниження показників FEF_{50}, FEF_{75}, $dFEF_{50}$ і $dFEF_{25}$, а також збільшення $V_{iso}FEF$ свідчило про погіршення прохідності бронхів і виникнення їх обструкції (див. мал. 1). Достатньо характерний вигляд кривих «потік—об'єм» (мал. 1, 2, *а*), які реєстрували після КЗ, дав змогу прийти до висновку про розвиток у водолазів нестійкої генералізованої обструкції дихальних шляхів [5]. При збереженні швидкого лінійного підняття кривої FEF_{max} не досягало вихідного значення, низхідна частина кривої утворювала дугу, ввігнуту до осі об'єму за

Таблиця 2. Зміни статичних характеристик легень у водолазів після короткочасних занурень (КЗ) на різні глибини

Показник	До КЗ (фон)	Після КЗ				
		на 40 м	на 60 м	на 80 м	на 100 м	Через 3 доби після закінчення серії КЗ
VC, л	5,048±0,877	5,000±1,090	4,553±0,618	4,787±0,969	4,850±0,910	4,791±0,699
RVI, л	2,697±1,216	3,125±1,451	2,702±0,754	3,085±0,319	3,155±0,740	3,239±0,602
RVE, л	1,123±0,553	0,919±0,408	1,163±0,369	1,060±0,877	1,165±0,699	0,926±0,598
FRV, л	2,591±0,639	2,901±0,531	3,533±1,015	3,732±0,890	4,098±1,094	3,412±0,610
RV, л	1,416±0,414	1,973±0,433	2,435±0,987	2,701±0,893	2,970±0,824	2,520±0,832
TVL, л	6,411±1,035	6,893±1,107	6,950±1,034	7,455±1,131	7,561±0,883	7,296±1,058

Таблиця 3. Зміни динамічних характеристик легень у водолазів після короткочасних занурень (КЗ) на різні глибини

Показник	До КЗ (фон)	Після КЗ				
		на 40 м	на 60 м	на 80 м	на 100	Через 3 доби після закінчення серії КЗ
FVC, л	4,449±0,954	4,549±1,083	4,155±0,634	4,458±0,968	4,407±0,854	4,545±0,842
FEV_1, л	3,865±0,781	3,938±0,814	3,559±0,399	3,901±0,663	3,947±0,925	3,897±0,578
FEF_{max}, л/с	8,755±1,847	9,000±1,662	7,877±0,944	8,760±1,213	7,450±0,630	8,020±1,236
FEF_{25}, л/с	7,576±3,013	6,471±3,010	3,926±3,147	5,185±3,275	5,334±3,188	4,457±2,928
FEF_{50}, л/с	5,106±1,820	4,231±2,105	2,504±2,200	3,577±2,635	3,968±2,313	3,400±2,726
FEF_{75}, л/с	2,460±0,998	2,091±1,052	1,085±1,036	1,522±1,221	1,730±1,039	1,749±1,406
d FEF_{50}, %	37,95±11,27	24,16±9,22	22,95±10,00	30,01±9,83	26,78±11,05	35,91±14,58
d FEF_{75}, %	24,76±8,47	7,01±4,42	0,57±2,56	18,03±10,99	18,73±12,41	25,04±8,82
V_{iso} FEF/VC, %	14,92±6,34	16,37±8,36	25,47±7,56	16,65±8,70	16,74±9,56	15,12±7,07

рахунок значного зменшення
FEV_1. В ряді випадків втрачен
об'єм» до осі абсцис при об'єм
реженого FVC, виявлялося ті
і свідчило про ізольовану об
що як і в тривалих зануренн
інертними газами [2, 8], пров
постдекомпресійний бронхосп
ознаки дистальної обструкції
лаптоїдних явищ, виникаючих
ремих водолазів після закі
КЗ на фоні зниження швид
показників і відсутніх перед
ком даної серії занурень (ди
2, *а*). Можна припустити, що
структивні зміни в першу чер

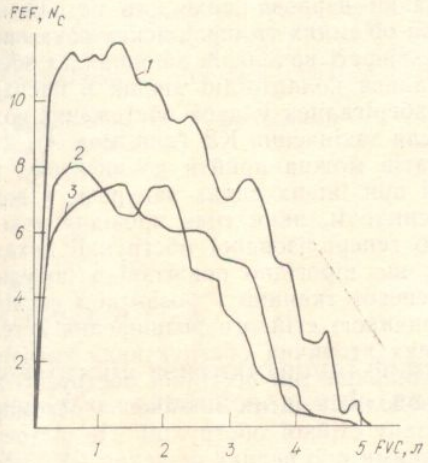
Мал. 3. Криві «потік—об'єм» (*1*,
форсованих видихів після коротк

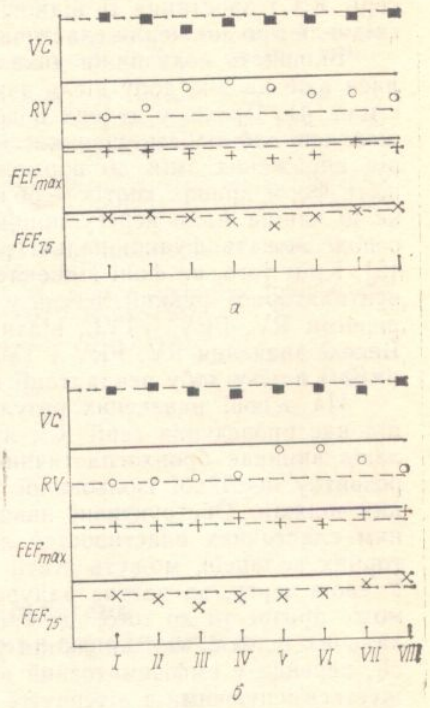
Мал. 4. Зміни об'ємних і швид
двох водолазів — першого (*а*) та
роткочасних занурень (КЗ) на 4
закінчення серії КЗ на 3-ю (*VI*),

в'язані з погіршенням елас
9—10], розвитком експірат
[5] і, очевидно, обумовлен
кисню в КЗ і частими деко
процесів з набряком слизо
[8]. Для постдекомпресійн
кривих. В наших дослідже
долазів при багаторазовом
тік — об'єм» розрізнялися
криві були деформовані, ві
різку (мал. 3).

Після перших КЗ прох
лення VC, FEV_1, FEF_{50}, F
адаптацією дихальної сист
факторів. В той же час, п
долазів із збільшенням гл
підвищення RV, FRV і TV
стерігалося на фоні зниж

рахунок значного зменшення FEF_{50} і FEF_{75} на фоні зниження FVC і FEV_1. В ряді випадків втрачення лінійності і зміщення кривої «потік — об'єм» до осі абсцис при об'ємі легень, близькому до RV на фоні збереженого FVC, виявлялося тільки в останній треті видиху (мал. 2, *б*) і свідчило про ізольовану обструкцію дрібних бронхів [5]. Можливо, що як і в тривалих зануреннях з повним насиченням тканин організму інертними газами [2, 8], провідну роль у розвитку змін після КЗ грав постдекомпресійний бронхоспастичний синдром. Для нього характерні ознаки дистальної обструкції і колаптоїдних явищ, виникаючих в окремих водолазів після закінчення КЗ на фоні зниження швидкісних показників і відсутніх перед початком даної серії занурень (див. мал. 2, *а*). Можна припустити, що ці обструктивні зміни в першу чергу по-





Мал. 3. Криві «потік—об'єм» *(1, 2, 3)*, що зареєстровані у водолаза при виконанні форсованих видихів після короткочасних занурень на 40 м. Пояснення у тексті.

Мал. 4. Зміни об'ємних і швидкісних показників вентиляторної функції легень у двох водолазів — першого *(а)* та другого *(б)* перед початком *(I)*, одразу після короткочасних занурень (КЗ) на 40 м *(II)*, 60 м *(III)*, 80 м *(IV)*, 100 м *(V)* і після закінчення серії КЗ на 3-ю *(VI)*, 5-у *(VII)* та 7-у *(VIII)* добу.

в'язані з погіршенням еластичних властивостей легеневої тканини [4, 9—10], розвитком експіраторного колапсу дрібних дихальних шляхів [5] і, очевидно, обумовлені впливом підвищеного парціального тиску кисню в КЗ і частими декомпресіями. Не виключена роль і запальних процесів з набряком слизової оболонки бронхів і гіперсекреції слизу [8]. Для постдекомпресійного синдрому також характерна лабільність кривих. В наших дослідженнях це виявилося у тому, що в окремих водолазів при багаторазовому виконанні форсованого видиху криві «потік — об'єм» розрізнялися за формою, розміром і амплітудою. Деякі криві були деформовані, відзначалася зазубленість на низхідному відрізку (мал. 3).

Після перших КЗ проходила стабілізація або навіть деяке відновлення VC, FEV_1, FEF_{50}, FEF_{75}. Можливо, це пов'язано з визначеною адаптацією дихальної системи до багаторазового впливу гіпербаричних факторів. В той же час, протягом всієї серії КЗ практично в усіх водолазів із збільшенням глибини занурення відзначалося прогресуюче підвищення RV, FRV і TVL. Слід відзначити, що зростання TVL спостерігалося на фоні зниженої VC, тобто воно проходило за рахунок

росту RV, що неможна вважати позитивним фактором. Якщо до початку серії КЗ у водолазів VC в середньому складала 79 % TVL, то після закінчення занурення на 100 м вона знизилася до 64 % TVL. Згідно пульмонологічним критеріям, якщо VC незалежно від її значення та від відсотка до належної нижче 70 % TVL, то слід шукати причину відхилення від норми функції зовнішнього дихання [6]. Такого характеру зміни TVL і VC звичайно пов'язують з розвитком емфіземи легень, обумовленої відзначеними вище обструктивними явищами і порушеннями еластичності легеневої тканини [5]. Значний зріст FRV під кінець серії КЗ і зростання її відношення до TVL від 40 % до 54 % також свідчили про зниження еластичності легень [6].

Більшість показників дихальної системи у водолазів нормалізувалася вже на 3-ю добу після закінчення серії занурень (див. табл. 2, 3 і мал. 4). Проте, у деяких водолазів під час форсованого видиху зберігалася лабільність швидкості газових потоків в дихальних шляхах: від виражених змін до нормальних значень. Відзначалися нестабільність форм кривих «потік — об'єм», наявність на них зазубленості. Так як ці явища мали нерегулярний характер, можна припустити, що в їх основі лежать функціональні розлади нервово-психічного походження [5]. Крім того, на фоні відновлення об'ємних та швидкісних показників вентиляторної функції легень у більшості водолазів залишалися збільшеними RV, FRV і TVL, відзначалися колаптоїдні явища в бронхах. Високі значення RV, FRV і TVL зберігалися у двох обстежених водолазів і на 7-у добу реадаптації після закінчення КЗ (див. мал. 4).

На основі наведених результатів можна прийти до висновку, що під час проведення серії КЗ, як і при інших видах занурень, у водолазів виникає бронхоспастичний синдром, який грає провідну роль в розвитку нестійкої ізольованої або генералізованої обструкції дихальних шляхів. Обструктивні явища, що вірогідно пов'язані з порушенням еластичних властивостей легеневої тканини і розвитком експіраторних колапсів, можуть стати причиною стійкого розширення легень. У свою чергу, за частих зануреннях вторична обструктивна емфізема може призвести до того, що бронхіальний тип нестійкої обструкції дихальних шляхів, яка виникала у водолазів після закінчення декомпресії, перейде у емфізематозний варіант стійкої обструкції. Це підтверджується існуючими в літературі даними про великі значення RV, FRV і TVL [7], а також зниження бронхіальної прохідності, що спостерігаються в досвідчених водолазів у міжспусковий період [3, 9—10].

V. N. Ilyin, S. A. Gulyar, A. I. Dmitruk

CHANGES IN STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF EXTERNAL RESPIRATION IN DIVERS AFTER SHORT DIVES TO THE DEPTH UP TO 100 м

In a series of short (up to 45 min without considering time of decompression) dives (SD) at depths down to 100 m under conditions of the Barentsev Sea five professional deep-sea divers were examined. In dives down to 40 m compressed air was used as breathing media, in dives to 60, 80 and 100 m — nitrogen-heliox mixture. Before the SD series the volume and velocity lung variables at rest and during forced expiration in air and heliox media were measured between separate SDs and on the 3rd day after the end of decompression with dive to 100 m, using computer spiro- and pneumotachometry methods. Bronchospastic syndrome, playing the leading role in the development of transient isolated or generalized airway obstruction, was shown to be evoked in divers during conduction of SD series. Obstructive phenomena are presumed to be connected with elastic properties' disturbance of lung tissue and development of expiratory collapse; they might cause continuous lung dilatation.

A. A. Bogomoletz Institute of Physiology,
Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гуляр С. А.* Транспорт респираторны
рии.— К. : Наук. думка, 1988.— 296 с.
2. *Гуляр С. А., Ильин В. Н., Моисеенк*
пербарии: постдекомпрессионный син
тофизиологов (Кишинев. 3—6 окт. 19
3. *Гуляр С. А., Ильин В. Н., Моисеенк*
у человека при многократном дейст
ний // Физиол. журн.— 1991.— 37, №
4. *Кисляков Ю. Я., Бреслав И. С.* Д
при гипербарии.— Л. : Наука, 1988.—
5. *Сильвестров В. П., Семин С. Н., Ма*
кривых поток — объем спирографиче
61, № 4.— С. 97—105.
6. *Физиология* дыхания. Руководство
7. *Crosby W. A., Reed J. W., Clarke M.*
found in commercial divers // J. Ap
1979.— 46, N 5.— P. 639—645.
8. *Fontanesi S., Bondavalli W., Cagno*
citologica sull escreato inoperatori s
di Med. Navale.— 1988.— 92, N 2.— P
9. *Thorsen E., Segadal K., Kambestad*
sease? // Brit. J. Ind. Med.— 1990.—
10. *Thorsen E., Segadal K., Myrseth E.,*
diffusion capacity after deep saturati

Ін-т фізіології ім. О. О. Богомольця
АН України, Київ

УДК 612.

В. М. Ільїн, С. О. Гуляр

Реадаптація вентиляторної у водолазів-глибоководникі

*Показано, что пребывание водо
негорья приводит к существенн
ния их дыхательной системы. С
ляторной функции легких в усл
гих климатических зонах. Пол
рах устойчивы и сохраняются
время эффективность реабили
она начинается ранее, чем че
рессии. Раннее начало реабил
реадаптации фазы относительн
яния организма противопоказа
нием проходимости бронхов ср*

Вступ

Встановлено, що після глибо
спостерігається послаблення
погіршенням прохідності бро
витком гіпофункції дихальної
багаторічної професійної діял
пичуються негативні функціон
баричних впливах ці зрушенн
[10, 15, 16]. Для попереджен
ціональних станів, що межук

© В. М. ІЛЬІН, С. О. ГУЛЯР, 1993