

УДК 612.821:612.275

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПРЕБЫВАНИИ В ГИПОКСИЧЕСКИХ ВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ, СНИЖАЮЩИХ ПОЖАРООПАСНОСТЬ ГЕРМООБЪЕКТОВ

© 2018 г. ¹Э. Н. Безкишкий, ²А. О. Иванов, ²В. А. Петров, ³А. Ю. Ерошенко,
³В. С. Грошилин, ³Л. Г. Анистратенко, ⁴С. Н. Линченко

¹ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», г. Санкт-Петербург; ²АО «Ассоциация разработчиков и производителей систем мониторинга», г. Санкт-Петербург; ³ФГБОУ ВО «Ростовский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Ростов-на-Дону; ⁴ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Краснодар

Цель исследования – оценка влияния на работоспособность человека длительного (до 60 сут) периодического (4 ч/сут) пребывания в нормобарических гипоксических воздушных средах (НГВС) состава: [O₂] = 16–17 % об., [CO₂] до 0,8 % об., азот – остальное, снижающих риск возникновения пожаров и возгораний герметических обитаемых объектов (ГОО). *Методы.* Тип исследования – проспективное когортное. В качестве основной группы обследованы 6 мужчин в возрасте 21–25 лет, в качестве контрольной группы – 20 мужчин аналогичного возраста. Добровольцы основной группы ежедневно в течение 60 сут по 4 ч/сут находились в герметичном помещении с заданными НГВС и выполняли рабочую программу, имитирующую деятельность персонала ГОО. Лица контрольной группы также по 4 ч ежедневно в течение 60 сут находились в условно герметичном помещении с обычными (нормоксическими) условиями внешней среды и выполняли работы аналогичного содержания и длительности. С периодичностью 1 раз в 2 недели у добровольцев оценивали физическую (тест PWC170) и умственную (тест «Маршрут») работоспособность. *Результаты.* Показано, что пребывание в заданных НГВС сопровождалось снижением физической и умственной работоспособности испытуемых. Однако степень этих изменений была невысокой и находилась в пределах 6,2–6,5 % от исходного уровня. В процессе проведения испытаний в организме добровольцев формировались адаптационные реакции, позволившие существенно повысить резистентность организма к гипоксии и обеспечить поддержание нормального уровня работоспособности в течение всего периода испытаний. После окончания эксперимента показатели работоспособности лиц основной группы превышали как исходные значения, так и аналогичные показатели в контрольной группе. *Вывод.* Полученные данные обосновывают допустимость применения подобных НГВС на обитаемых гермообъектах с целью повышения их пожаробезопасности. При этом не выявлено значимых изменений в функциональном состоянии и надежности деятельности различного характера у добровольцев основной группы.

Ключевые слова: пожаробезопасность гермообъектов, гипоксическая воздушная среда, физическая и умственная работоспособность

HUMAN WORKING CAPACITY IN PERIODIC STAY IN HYPOXIC AIR ENVIRONMENTS, REDUCING THE FIRE HAZARD OF SEALED OBJECTS

¹E. N. Bezkishkii, ²A. O. Ivanov, ²V. A. Petrov, ³A. Yu. Eroshenko,
³V. S. Groshilin, ³L. G. Anistratenko, ⁴S. N. Linchenko

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Ministry of education of Russia, Saint Petersburg; ²Association of developers and producers of monitoring systems, Saint Petersburg; ³Rostov State Medical University, Ministry of health of Russia, Rostov-on-Don; ⁴Kuban State Medical University, Ministry of health of Russia, Krasnodar, Russia

The aim - assessment of the impact on human working capacity of prolonged (up to 60 days) periodic (4 hours per day) stay in normobaric hypoxic air environments (NHAЕ) ([O₂] = 16-17 % vol., [CO₂] up to 0.8 % vol., nitrogen - the rest) reducing the fire hazard of sealed inhabited objects (SIO). *Methods.* The type of the research: prospective cohort. As the main group of volunteers, 6 men aged 21-25 years were examined, as a control group - 20 men of the same age. Volunteers of the main group stayed in a sealed room daily for 60 days 4 hours per day with the specified NHAЕ and performed the working program simulating the activity of the SIO personnel. Persons of the control group, also stayed in a deemed sealed room daily for 60 days 4 hours per day with the normal external conditions and performed work of a similar nature and duration. With a frequency of one times in 2 weeks the physical (test PWC170) and mental (test "Route") working capacity of volunteers was assessed. *Results.* It was shown that stay in the specified NHAЕ was followed by a decline in physical and mental working capacity of the test persons. However, the level of these changes was low, not exceeding 6.5-6.2 % of baseline. In the process of testing adaptive reactions formed in the body of volunteers, which allowed to increase significantly the resistance of the body to hypoxia and ensure the maintenance of a normal level of performance during the entire period of testing. After the end of the experiment, the working capacity indicators of the main group exceeded both the initial values and similar indicators in the control group. *Conclusion.* The data obtained justify the admissibility of the formation of such NHAЕ on SIO to improve their fire safety. Whereby no significant changes were revealed in the functional state and different activity in the subjects of the main group.

Key words: fire safety of sealed objects, hypoxic air environments, physical and mental working capacity

Библиографическая ссылка:

Безкишкий Э. Н., Иванов А. О., Петров В. А., Ерошенко А. Ю., Грошилин В. С., Анистратенко Л. Г., Линченко С. Н. Работоспособность человека при периодическом пребывании в гипоксических воздушных средах, снижающих пожароопасность гермообъектов // Экология человека. 2018. № 9. С. 4–11.

Bezkishkii E. N., Ivanov A. O., Petrov V. A., Eroshenko A. Yu., Groshilin V. S., Anistratenko L. G., Linchenko S. N. Human Working Capacity in Periodic Stay in Hypoxic Air Environments, Reducing the Fire Hazard of Sealed Objects. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2018, 9, pp. 4-11.

В настоящее время для повышения пожаробезопасности герметизируемых обитаемых объектов (ГОО) разрабатываются технологии предварительного заполнения их помещений нормобарическими гипоксическими воздушными средами (НГВС), т. е. средами с пониженным относительно нормального (20,9 %) процентным содержанием кислорода при нормальном давлении [2, 19, 22, 26]. Наиболее простой технологией создания НГВС является замещение части кислорода воздуха азотом (так называемые «азотные НГВС»). Оценка противопожарной эффективности азотных НГВС показала, что при концентрации кислорода 16–17 % об. (НГВС-16–17) прекращается самоподдерживающееся горение и развитие очага пожара, т. е. горение происходит только в области интенсивного подвода тепловой энергии и не распространяется за ее пределы [13]. Однако известно, что длительное непрерывное пребывание человека в азотных НГВС-16–17 может приводить к недопустимым гипоксическим состояниям и нарушениям работоспособности [4, 25, 28, 29].

Существует несколько способов решения проблемы обеспечения безопасности человека при снижении концентрации кислорода в воздушной среде ГОО до 17 % об. и менее. Так, при концентрации кислорода 16–17 % об. и повышении барометрического давления в герметичных помещениях ГОО до 1,2 атм. (0,12 МПа) парциальное давление кислорода будет примерно соответствовать нормоксическому (20–21 кПа), что, как показали специальные исследования [17], позволяет сохранить работоспособность персонала в течение длительной герметизации, обеспечивая значительное повышение пожаробезопасности ГОО. Однако при таком «гипербарическом» варианте создания ГВС существуют ограничения по работе значительной части оборудования, которым оснащаются современные ГОО, поэтому данный способ пока не нашел применения в реальных условиях.

Ранее нами исследовалось влияние длительного (до 60 сут) непрерывного пребывания испытуемых-добровольцев в аргоносодержащих НГВС с содержанием кислорода около 14 % об. и аргона 30–35 % об. Теоретической основой данных работ явились открытые ранее антигипоксические эффекты аргона [11, 12], позволяющие существенно повысить переносимость человеком дефицита кислорода при нахождении в НГВС. В результате указанных исследований показано отсутствие недопустимого ухудшения функционального состояния, снижения работоспособности, нарушений гомеостатических параметров организма, а также отдаленных негативных последствий проведенных испытаний для здоровья добровольцев [8, 9]. Тем не менее поддержание в ГОО гипоксических сред с повышенным содержанием аргона имеет ряд технических сложностей, преодоление которых требует времени.

Другим возможным вариантом решения проблемы безопасности НГВС для человека является их формирование в помещениях ГОО, где допустимо при-

менить вахтовый способ работы персонала, который, как правило, ограничивается суммарной продолжительностью до 4 ч в сутки. Таким образом, создается барьер развитию возгорания в наиболее энергонасыщенных и пожароопасных зонах объекта. Однако допустимость периодического пребывания человека в НГВС-16–17 также нуждалась в обязательной проверке. Известно, что одним из наиболее значимых негативных последствий пребывания человека в условиях дефицита кислорода является снижение эффективности и надежности деятельности, исходя из чего целью работы стала оценка влияния длительного (до 60 сут) периодического (4 ч/сут) пребывания в заданных НГВС на работоспособность человека.

Методы

Тип проведенного исследования – проспективное когортное.

К участию в исследованиях в качестве основной группы были привлечены 6 мужчин в возрасте 21–25 лет, в качестве контрольной группы – 20 мужчин аналогичного возраста. Группы подбирались таким образом, чтобы по анамнестическим данным, оцениваемым параметрами функционального состояния и работоспособности, не было значимых межгрупповых различий. Все обследованные являлись студентами высших учебных заведений Санкт-Петербурга или Ростова-на-Дону. Критериями включения в исследования были: отсутствие медицинских противопоказаний к работам в условиях воздействия неблагоприятных эколого-профессиональных факторов; достаточный уровень функциональных возможностей организма, позволяющий выполнять физические, умственные и другие нагрузки (имитирующие деятельность персонала гермообъектов); подписание добровольного информированного согласия. Критерием исключения была невозможность выполнения добровольцем запланированных работ и обследований в полном объеме в связи с субъективными или объективными причинами.

Исследования с участием основной группы добровольцев проводились на испытательном стенде (ИС), специально сконструированном на базе АО «Ассоциация разработчиков и производителей систем мониторинга» (Санкт-Петербург). Конструкция ИС позволяла поддерживать заданные параметры НГВС в условно герметичном помещении, выполнять в нем работы, предписанные испытуемым-добровольцам, а также проводить комплексные исследования их функционального состояния и работоспособности. При нахождении испытуемых в помещении ИС поддерживались следующие параметры обитаемости: содержание кислорода 16–17 % об., диоксида углерода 0,3–0,8 % об, азот – остальное, при нормальных величинах атмосферного давления и других параметров микроклимата. Длительность периода ежедневного 4-часового пребывания добровольцев в заданных условиях (без отрыва от основной учебной деятельности) составляла 60 сут. При нахождении

в НГВС испытатели выполняли рабочую программу, заключающуюся в ежедневном моделировании деятельности интеллектуального или операторского содержания (работа на тренажерах), а также разномодальных физических нагрузок умеренной интенсивности (ходьба, бег, гимнастические упражнения).

Добровольцы, включенные в контрольную группу, также по 4 ч ежедневно (в течение 60 сут, без отрыва от учебных занятий) находились в условно герметичном помещении с обычными (нормоксическими) условиями внешней среды и выполняли работы аналогичного содержания и длительности.

С периодичностью примерно 1 раз в 2 недели лица обеих групп подвергались углубленным функциональным обследованиям. Также обследования проводились в обеих группах в нормоксических условиях: за 4–5 дней до начала испытаний (исходное состояние), на 31-е сутки испытаний и через 4–5 дней после их окончания.

Указанные обследования были направлены на сравнительную оценку динамики физической и умственной работоспособности добровольцев основной и контрольной групп в процессе проведения испытаний. Показатели работоспособности, интегрально отражающие уровень физиологических и психических резервов организма, рассматривались в качестве критериев надежности и допустимости функционального состояния человека, работающего в условиях периодического пребывания в НГВС в период заданной «автономности».

Физическая выносливость оценивалась путем проведения стандартизированной велоэргометрической пробы PWC_{170} («Physical Working Capacity») [7, 21], моделируемой с использованием велоэргометрических комплексов «Schiller» (Швейцария) или «Охосон Про» (Голландия). По результатам тестирования рассчитывали соответствующий показатель (PWC_{170} , Вт). Уровень аэробной физической выносливости оценивали по следующим диапазонам значений PWC_{170} [7, 21]: 200 Вт и более – высокий уровень; менее 200 до 170 Вт – средний уровень; менее 170 до 150 Вт – пониженный уровень; при PWC_{170} менее 150 Вт – низкий.

В качестве интегрального метода оценки умственной работоспособности был использован тест «Маршрут», разработанный для оценки профессионально важных качеств специалистов интеллектуального профиля деятельности [14]. Во время тестирования на экране компьютера в специальном окне программы в течение 4 с демонстрировались координаты исходной точки в трехмерном пространстве, которые необходимо было запомнить. Затем предъявлялся «маршрут» движения (3-шаговый, каждый «шаг» равен 1 единице) точки, координаты которой были представлены ранее. В итоге выполнения каждого из 15 заданий в таблице значений для X, Y и Z необходимо было указать конечные координаты точки.

Таким образом, в ходе выполнения задания требовалось быстрое и точное восприятие, запоминание и

воспроизведение разномодальной (цифровой и структурной) информации. В связи с высокой сложностью теста в течение нескольких дней все обследуемые тренировались в его выполнении до получения стабильных результатов. Лишь после этого выполнялось зачетное тестирование.

Успешность выполнения теста оценивалась по интегральному показателю успешности (ИПУ), рассчитываемому по времени решения 15 задач и количеству ошибочных решений:

$$\text{ИПУ (у. е.)} = 17 - (A + 0,01 T), \quad (1)$$

где: A – количество ошибочных решений (ед.); T – время, затраченное на выполнение 15 задач (с). Максимальные значения ИПУ 16 у. е., минимальные – 1 у. е.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием п.п.п. «Statistica» v.10,0. Результаты представлялись в виде медиан (Me), нижнего и верхнего квартилей (Q_{25} ; Q_{75}). Оценку значимости различий показателей в связанных и несвязанных выборках проводили при помощи непараметрических критериев (Вилкоксона и Манна – Уитни соответственно). Нулевая гипотеза об отсутствии различий отвергалась при уровне значимости $p < 0,05$.

Исследование было организовано и проведено в соответствии с положениями и принципами действующих международных и российских законодательных актов, в частности Хельсинкской декларации 1975 г. и ее пересмотра 2013 г. Испытатели основной группы на период проведения исследований были застрахованы на предмет нарушений состояния здоровья, обусловленных воздействием измененных факторов жизнедеятельности.

Результаты

Главным итогом проведенной работы явился факт выполнения всеми добровольцами, включенными в основную группу, запланированной программы испытаний. Это, с одной стороны, позволило не исключать из данной группы привлеченных к исследованиям лиц, с другой – доказало отсутствие грубых нарушений их соматического и психического здоровья, обусловленных периодическим пребыванием в условиях недостатка кислорода и избытка диоксида углерода. В контрольной группе была проведена замена 3 испытуемых, связанная с развитием у них в процессе периода испытаний нетяжелых простудных заболеваний.

Наблюдение за добровольцами основной группы в процессе испытаний, проведение у них ежедневных медицинских осмотров и обследований при периодическом нахождении в НГВС недопустимых отклонений функционального состояния не выявили, что подробно изложено в наших предыдущих работах [6, 10]. Также не отмечено негативных реакций со стороны обмена веществ, других параметров гомеостаза. Однако подтверждение отсутствия повреждающего действия моделируемых измененных условий газовой среды на профессиональную надежность персонала,

работающего в реальных ГОО, требовало обязательного проведения контрольных функциональных обследований по оценке эффективности выполнения испытуемыми проб с интенсивными физическими и интеллектуальными нагрузками. Результаты этих исследований мы рассматривали как важнейшие критерии текущей работоспособности, по степени отклонения которых от их индивидуального нормоксического уровня имелась возможность судить о допустимости или недопустимости формирующихся при пребывании в НГГС функциональных состояний у испытуемых-добровольцев согласно методическим рекомендациям по физиологии и гигиене труда [16, 18, 20, 21].

В табл. 1 представлена динамика показателя PWC_{170} , с использованием которого, как указывалось выше, оценивался объем физиологических резервов организма участников испытаний. Результаты пер-

вичного обследования показали, что у большинства добровольцев обеих групп значения показателя находились в диапазоне 160–180 Вт, что свидетельствовало о среднем или умеренно пониженном уровне физической работоспособности и давало возможность максимально экстраполировать полученные данные на генеральную совокупность.

Обследование, выполненное на следующий день после начала испытаний, выявило снижение ($p = 0,043$) показателя PWC_{170} у всех добровольцев основной группы при отсутствии изменений в контроле, что обусловило близкие к статистически значимым межгрупповые различия ($p = 0,09$). Данный факт, без сомнения, явился следствием пребывания испытуемых основной группы в НГГС-16–17 и отражал специфические изменения физиологических резервов организма в условиях дефицита кислорода во внешней среде. Однако умеренная степень снижения показателя (максимально 6,5 % от исходного уровня у одного из испытуемых) позволяет заключить, что в начальном периоде пребывания в заданных НГГС уровень физической работоспособности человека остается достаточным для выполнения задач деятельности.

Последующие контрольные обследования показали, что зафиксированные в основной группе на начальном этапе испытаний негативные изменения параметра имели тенденцию к постепенному снижению. Так, к 15-м сут испытаний максимальная степень снижения PWC_{170} составляла около 4 %. Примерно после месяца испытаний значимых различий показателя, регистрируемого во время нахождения добровольцев в НГГС-16–17, по сравнению с исходным уровнем не определялось, а относительное снижение показателя у всех добровольцев не превышало 3 %.

В контрольной группе на фоне регулярных занятий физическими упражнениями примерно через месяц наблюдения выявлено статистически значимое повышение PWC_{170} ($p = 0,040$) по сравнению с первичным обследованием. При этом межгрупповых различий также не определялось, что было связано с приростом показателя и в основной группе.

Важная информация была получена на этапе контрольного тестирования, проведенного на 31-е сут эксперимента, в обычных условиях пребывания добровольцев. В частности, определено, что у лиц основной группы имело место значимое повышение показателя физической работоспособности по сравнению с исходным состоянием, причем значения PWC_{170} находились на значимо более высоком уровне, чем в контрольной группе ($p = 0,033$).

Анализ результатов второго месяца эксперимента выявил явную позитивную динамику физической работоспособности у добровольцев основной группы (при нахождении в НГГС), сохранявшуюся вплоть до окончания заданного периода исследований. Крайне важно, что стойких тенденций к снижению показателя PWC_{170} не выявлено ни у одного из испытуемых в течение всего периода наблюдения, что доказывает сохранность их физиологических резервов по ком-

Таблица 1
Изменения показателя PWC_{170} (Вт) у лиц сравниваемых групп в динамике наблюдения, Ме (Q25; Q75)

Этап наблюдения	Условие измерения	Группа (число обследованных)	
		Основная группа (n=6)	Контрольная группа (n=20)
Исходное состояние	Нормоксия	169,5 (159,0; 174,0)	171,0 (163,0; 174,5)
2-е сут испытаний	НГГС-17–16	163,5 (152,0; 170,0) $p=0,027$	
	Нормоксия		171,0 (163,0; 174,5) $p_{к-ог} = 0,09$
15-е сут испытаний	НГГС-17–16	166,5 (158,0; 171,0) $p=0,027$	
	Нормоксия		172,5 (161,5; 175,0)
29-е сут испытаний	НГГС-17–16	168,0 (160,0; 171,0) $p=0,059$	
	Нормоксия		173,0 (163,0; 175,0) $p=0,040$
31-е сут испытаний	Нормоксия	179,5 (178,0; 183,0) $p=0,027$	172,0 (164,0; 176,0) $p=0,039$ $p_{к-ог} = 0,033$
44-е сут испытаний	НГГС-17–16	168,5 (160,0; 171,0)	
	Нормоксия		172,0 (165,0; 176,0) $p=0,021$
59-е сут испытаний	НГГС-17–16	169,0 (161,0; 172,0)	
	Нормоксия		173,0 (165,5; 175,0) $p=0,015$
Заключительное обследование	Нормоксия	181,5 (175,0; 185,0) $p=0,027$	172,5 (165,5; 175,5) $p=0,017$ $p_{к-ог} = 0,011$

Примечание. Уровень значимости различий: p – по сравнению с исходным состоянием; $p_{к-ог}$ – между группами на соответствующем этапе наблюдения.

пенсации гипоксического воздействия. При этом, несмотря на постепенный прирост показателя PWC_{170} у лиц контрольной группы, значимых межгрупповых различий по данному критерию в период второй половины эксперимента не определялось.

Заключительное обследование, выполненное в нормоксических условиях, показало увеличение значений показателя в обеих группах по сравнению с исходным состоянием. Однако значимо более выраженными ($p = 0,011$) указанные сдвиги были в основной группе, где относительный прирост PWC_{170} составлял от 5,8 до 10,2 %, в то время как в контроле колебался в диапазоне 2,2–5,3 %.

Таким образом, представленные данные свидетельствовали об отсутствии грубых нарушений физической работоспособности при периодическом пребывании добровольцев в НГВС-16–17 в течение всего заданного периода испытаний.

Следующей задачей исследования являлась сравнительная оценка динамики умственной работоспособности, оцениваемая с использованием теста «Маршрут» (табл. 2). Как указывалось выше, учитывая высокую сложность данной методики, в качестве исходных принимались результаты тестирования, выполненного после достижения каждым добровольцем его индивидуального стабильного уровня вследствие

Таблица 2

Динамика интегрального показателя успешности выполнения теста «Маршрут» (у. е.) у лиц сравниваемых групп в процессе испытаний, Ме (Q25; Q75)

Этап наблюдения	Условие измерения	Группа (число обследованных)	
		Основная группа (n=6)	Контрольная группа (n=20)
Исходное состояние	Нормоксия	10,6 (10,0; 11,2)	10,5 (9,4; 11,3)
1-е сут испытаний	НГГС-17–16	10,0 (9,5; 10,5) $p=0,027$	
	Нормоксия		10,6 (9,5; 11,3) $p_{к-ог}=0,049$
16-е сут испытаний	НГГС-17–16	10,2 (9,8; 10,8) $p=0,043$	
	Нормоксия		10,5 (9,5; 11,4)
30-е сут испытаний	НГГС-17–16	10,5 (9,9; 10,9) $p=0,067$	
	Нормоксия		10,5 (9,5; 11,4)
32-е сут испытаний	Нормоксия	11,4 (10,9; 12,9) $p=0,027$	10,5 (9,5; 11,6)
45-е сут испытаний	НГГС-17–16	10,5 (10,0; 11,1)	
	Нормоксия		10,5 (9,5; 11,5)
60-е сут испытаний	НГГС-17–16	10,5 (10,0; 11,0)	
	Нормоксия		10,6 (9,7; 11,6) $p=0,033$
Заключительное обследование	Нормоксия	12,0 (11,5; 13,1) $p=0,027$	10,6 (9,9; 11,7) $p=0,026$ $p_{к-ог}=0,1$

Примечание. Уровень значимости различий: p – по сравнению с исходным состоянием; $p_{к-ог}$ – между группами на соответствующем этапе наблюдения.

предварительно проведенных тренировок. Кроме того, для исключения влияния на результаты тестирования шумовых эффектов работающего оборудования ИС при тренировках и контрольных исследованиях в нормоксических условиях испытуемые работали в наушниках, через которые подавались примерно аналогичные шумовые воздействия. В конечном итоге полученные таким образом результаты тестирования, принятого за исходное состояние, показали, что в обеих группах успешность выполнения методики «Маршрут» примерно соответствовала нормальному распределению: примерно в 70 % случаев (в основной группе у 4 человек) определялся средний уровень умственной работоспособности, примерно по 15 % (в основной группе по 1 человеку) – низкий и выше среднего уровни. Значимых межгрупповых различий по интегральному показателю успешности тестирования в исходном состоянии не определялось.

Обследования лиц основной группы на начальном этапе испытаний (в НГВС) выявили общую тенденцию к снижению ИПУ ($p = 0,027$), что можно рассматривать как специфическое влияние пребывания в гипоксической среде на эффективность сложной интеллектуальной деятельности. Однако степень снижения ИПУ, зафиксированная даже при первом тестировании в НГВС, у всех испытуемых была относительно невысокой и находилась в пределах 4,6–6,3 % от исходного уровня. При следующем обследовании (16-е сут испытаний) степень редукции показателя заметно уменьшилась, составив 1,9–2,4 % ($p = 0,043$), а после 30-х сут эксперимента значимых различий ИПУ по сравнению с исходными его значениями не определялось. Кроме того, контрольное тестирование в нормоксических условиях, проведенное в основной группе в середине эксперимента, показало значимое повышение ИПУ по сравнению с начальными его значениями ($p = 0,027$). В контрольной группе добровольцев на протяжении всего периода исследований также имели место постепенные тенденции к повышению эффективности выполнения предложенного задания, при этом значимых межгрупповых различий не наблюдалось, несмотря на разные условия тестирования.

Заключительное обследование испытуемых обеих групп в обычных условиях воздушной среды показало наличие значимых позитивных изменений ИПУ, которые в основной группе составляли от 9,2 до 21,6 % по сравнению с исходным уровнем, в контрольной группе – в среднем 6,4 % (при максимальном приросте 16,1 %).

Следовательно, полученные данные позволяют, на наш взгляд, рассматривать моделируемые в эксперименте измененные условия воздушной среды как не нарушающие возможности человека к выполнению даже высокоинтенсивной интеллектуальной деятельности.

Обсуждение результатов

Основными итогами проведенного исследования стали факты отсутствия существенного негативного

влияния периодического (4 часа ежедневно в течение 60 сут) пребывания человека в заданных НГВС-16–17 на функциональное состояние и надежность деятельности различного характера. Несмотря на отмеченное на начальном этапе эксперимента у всех добровольцев объяснимое снижение показателей физической (PWC_{170}) и интеллектуальной (ИПУ теста «Маршрут») работоспособности при нахождении в заданных НГВС по сравнению с нормоксическими условиями, относительно низкая степень указанных сдвигов, не превышавшая 6,3–6,5 %, не является, на наш взгляд, ограничивающим фактором для выполнения работ в данных НГВС. В физиологии труда критическим считается прогрессирующее снижение работоспособности персонала на 30 более процентов от исходного уровня, снижение работоспособности от 20 до 30 % рассматривается как пограничное функциональное состояние, а колебания работоспособности в диапазоне до 20 % расцениваются как ее естественная (допустимая) вариабельность в период длительного рабочего цикла [16, 18].

Дополнительным аргументом в пользу допустимости создания подобных НГВС на ГОО является тот факт, что в проведенном исследовании тестировались возможности испытуемых к выполнению деятельности субмаксимальной и максимальной интенсивности, которая не характерна для персонала при работе в штатном режиме. При этом, как показано в наших предыдущих публикациях, качество и продуктивность обычных работ, не требующих значительного напряжения функциональных резервов организма, в моделируемых НГВС практически не изменяются по сравнению с обычными условиями обитаемости [6, 10].

Важно отметить, что для доказательства безопасности проверяемых в исследовании измененных воздушных сред для человека контрольные исследования физической и умственной работоспособности испытуемых, как правило, выполнялись при максимально «жестких» (из заданного диапазона) параметрах НГВС: содержании кислорода 16 % об., диоксида углерода 0,8 % об. При этом, как указывалось выше, такие концентрации дыхательных газов в заданных НГВС являются предельными, поэтому степень негативного влияния гипоксических сред с менее «жесткими» параметрами на работоспособность человека, естественно, является значительно меньшей.

Особо следует подчеркнуть выявленные в исследовании факты постепенного повышения физической и умственной работоспособности добровольцев в процессе наблюдения, что привело к тому, что уже примерно к середине периода испытаний и вплоть до его окончания исследуемые показатели у лиц основной группы при пребывании в НГВС значимо не отличались от исходного (нормоксического) уровня. По всей вероятности, основной причиной указанного феномена была формирующаяся адаптация к измененным, периодически воздействующим на

организм факторам воздушной среды. В частности, в практике профилактической, спортивной, военной медицины широко применяются так называемые «гипоксические тренировки», позволяющие значительно расширить функциональный потенциал организма, повысить гипоксическую резистентность [1, 3, 23]. Естественно, что для достижения желаемых эффектов таких тренировок у человека должен быть достаточным адаптационный потенциал организма, дефицит которого неизбежно приведет к дизадаптации [2, 5, 15, 24, 27].

О сохранности адаптационного потенциала у наших добровольцев, тренирующем эффекте периодического пребывания в НГВС, позволивших успешно выполнить задачи испытаний, свидетельствовало повышение физической и умственной работоспособности у лиц основной группы, выявленное уже в середине эксперимента и сохранившееся вплоть до его окончания. Кроме того, данное положение подтверждалось большей выраженностью указанных тенденций у лиц основной группы по сравнению с добровольцами группы контроля, которые выполняли аналогичную деятельность в обычных условиях воздушной среды.

Заключение

В ходе проведения исследований показана допустимость длительного (до 60 сут.) периодического (4 ч в сутки) пребывания человека в заданных НГВС. В течение всего периода испытаний выраженного снижения физической и умственной работоспособности у добровольцев не отмечено. Полученные результаты обосновывают возможность применения подобных сред на обитаемых гермообъектах для повышения их пожаробезопасности.

Однако, несмотря на выявленные в представленном исследовании в целом обнадеживающие факты, мы понимаем, что малая численность основной выборки добровольцев (причем только одной возрастной группы), необходимость длительного наблюдения за ними после окончания испытаний, проведения углубленных комплексных клинико-лабораторно-инструментальных исследований самого высокого уровня, а также натуральных испытаний требуют дальнейшей проработки проблемы формирования пожаробезопасных НГВС на ГОО.

Авторство

Безкицкий Э. Н. внес существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, получение, анализ и интерпретацию данных, подготовил первый вариант статьи; Иванов А. О. проводил анализ и интерпретацию данных, подготовил первый вариант статьи; Петров В. А. участвовал в анализе данных, редактировал присланную в редакцию статью; Ершенико А. Ю. участвовал в анализе данных; Грошинин С. М. проводил статистическую обработку полученных данных, окончательно утвердил присланную в редакцию статью; Анистратенко Л. Г. участвовала в анализе данных, непосредственно работала с контрольной группой; Линченко С. Н. участвовал в анализе данных, непосредственно работала с контрольной группой.

Безкицкий Эдуард Николаевич — SPIN 7041-4898; ORCID 0000-0002-1534-8881
 Иванов Андрей Олегович — SPIN 5176-2698; ORCID 0000-0002-8364-9854
 Петров Василий Александрович — SPIN 7679-4634; ORCID 0000-0001-8523-8031
 Ерошенко Андрей Юрьевич — SPIN 4289-9063; ORCID 0000-0002-6767-7302
 Прошкин Виталий Сергеевич — SPIN 8717-0391; ORCID 0000-0001-9927-8798
 Анистратенко Лилия Германовна — SPIN 3691-6185; ORCID 0000-0002-6241-0916
 Линченко Сергей Николаевич — SPIN 1681-3350; ORCID 0000-0001-8345-0645

Список литературы / References

1. Агаджанян Н. А., Гневушев В. В., Катков А. Ю. Адаптация к гипоксии и биоэкономика внешнего дыхания. М.: Изд-во УДН, 1987. 186 с.
 Agadzhanyan N. A., Gnevushev V. V., Katkov A. Yu. *Adaptatsiya k gipoksii i bioekonomika vneshnego dyhaniya* [Adaptation to hypoxia and bioeconomics of external respiration]. Moscow, 1987, 186 p.
 2. Архипов А. В., Карпов А. В., Смунов А. В., Чумаков В. В. Обеспечение пожаробезопасности на подводных лодках // Морской сборник. 2013. № 3. С. 2–7.
 Arkhipov A. V., Karpov A. V., Smurov A. V., Chumakov V. V. Ensuring fire safety on the submarines. *Morskoj sbornik* [Naval collection]. 2013, 3, pp. 2-7. [In Russian]
 3. Благинин А. А., Жильцова И. И., Михеева Г. Ф. Гипоксическая тренировка как метод коррекции пограничных функциональных состояний организма операторов сложных эргатических систем. Нижневартовск, 2015. 106 с.
 Blagin A. A., Zhil'tsova I. I., Mikheeva G. F. *Gipoksicheskaya trenirovka kak metod korrektsii pogranychnykh funktsional'nykh sostoyanii organizma operatorov slozhnykh ergaticheskikh sistem* [Hypoxic training as a method of correction of border functional States of the body of operators of complex ergatic systems]. Nizhnevartovsk, 2015, 106 p.
 4. Ван Лир Э., Стикней К. Гипоксия / пер. с англ. М.: Медицина, 1967. 368 с.
 Van Lir E., Stiknei K. *Gipoksiya* [Hypoxia]. Moscow, Medicine Publ., 1967, 368 p.
 5. Гудков А. В., Теддер Ю. Р. Характер метаболических изменений у рабочих при экспедиционно-вахтовом режиме труда в Заполярье // Физиология человека. 1999. Т. 25, № 3. С. 138–142.
 Gudkov A. V., Tedder Yu. R. Nature of metabolic changes in workers under the conditions of expedition shift work schedule in the Arctic. *Fiziologiya cheloveka*. 1999, 25 (3), pp. 138-142. [In Russian]
 6. Ерошенко А. Ю., Иванов А. О., Барачевский Ю. Е., Шатов Д. В., Багдасарян А. С. Скрининговая оценка гипоксического состояния человека при работе в гермообъектах с пожаробезопасными газовоздушными средами // Материалы I Межрегиональной научно-практической конференции «Безопасность — 2017». Волгоград, 2017. С. 88–91.
 Eroshenko A. Yu., Ivanov A. O., Barachevskii Yu. E., Shatov D. V., Bagdasaryan A. S. *Skriningovaya otsenka gipoksicheskogo sostoyaniya cheloveka pri rabote v germoob'ektakh s pozharobezopasnymi gazovozdushnymi sredami* [A screening assessment of the hypoxic state of a person when working in the pressure chambers with fireproof

air-gas environments]. In: *Materialy I Mezhregional'noi nauchno-prakt. konf. «Bezopasnost' - 2017»* [Materials of the I Interregional scientific and practical conference "Security-2017"]. Volgograd, 2017, pp. 88-91.

7. Дубровский В. И. Функциональные пробы в спорте. М.: ФиС, 2006. 224 с.

Dubrovskii V. I. *Funktsional'nye proby v sporte* [Functional tests in sports]. Moscow, Physical Education and Sport Publ., 2006, 224 p.

8. Иванов А. О., Петров В. А., Бочарников М. С., Безкицкий Э. Н. Исследование возможности длительного пребывания человека в аргоносодержащих газовых средах, снижающих пожароопасность гермообъектов // Экология человека. 2017. № 1. С. 1–7.

Ivanov A. O., Petrov V. A., Bocharnikov M. S., Bezkishkii E. N. Study of Possibility for Human of Long Stay in Argon Containing Gaseous Environment Reducing Fire Risk in Hermetically Sealed Facilities. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2017, 1, pp. 1-7. [In Russian]

9. Иванов А. О., Петров В. А., Безкицкий Э. Н., Гудков А. В., Ерошенко А. Ю., Прошкин С. М. Оценка отдаленных последствий длительного непрерывного пребывания человека в аргоносодержащей гипоксической газовой среде // Экология человека. 2017. № 6. С. 9–13.

Ivanov A. O., Petrov V. A., Bezkishkii E. N., Gudkov A. V., Eroshenko A. Yu., Groshilin S. M. Evaluation of Long-Term Effects of Human's Continuous Stay in Argon Containing Hypoxic Gaseous Environment. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology], 2017, 6, pp. 9-13. [In Russian]

10. Иванов А. О., Ерошенко А. Ю., Костылев А. Н., Пухняк Д. В., Афондикова С. Г., Скокова В. Ю., Чеботов С. А. Комплексная оценка допустимости циклического пребывания человека в гипоксических средах, обеспечивающих пожаробезопасность герметичных обитаемых объектов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Человек и общество: современные проблемы безопасности». Курск, 2018. С. 65–69.

Ivanov A. O., Eroshenko A. Yu., Kostylev A. N., Pukhnyak D. V., Afendikov S. G., Skokova V. Yu., Chebotov S. A. *Kompleksnaya otsenka dopustimosti tsiklicheskogo prebyvaniya cheloveka v gipoksicheskikh sredakh, obespechivayushchikh pozharobezopasnost' germetichnykh obitaemykh ob'ektov* [Comprehensive assessment of the admissibility of human cyclic presence in hypoxic environments, ensuring fire safety of sealed inhabited objects]. In: *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Chelovek i obshchestvo: sovremennye problemy bezopasnosti»* [Materials of the all-Russian scientific-practical conference with international participation "Man and society: modern security problems"]. Kursk, 2018, pp. 65-69.

11. Павлов Б. Н., Буравкова Л. Б., Смолин В. В., Соколов Г. М. Кислородно-азотно-аргоновая газовая среда при длительном пребывании человека в барокамере при избыточном давлении // Морской медицинский журнал. 1999. № 2. С. 18–21.

Pavlov B. N., Buravkova L. B., Smolin V. V., Sokolov G. M. The prolonged human staying in the altitude chamber under overpressure with oxygen-nitrogen-argon gaseous environment. *Morskoj meditsinskii zhurnal* [Journal of marine medicine]. 1999, 2, pp. 18-21. [In Russian]

12. Павлов Б. Н., Солдатов П. Э., Дьяченко А. И. Выживаемость лабораторных животных в аргоносодержащих гипоксических средах // Авиационная и экологическая медицина. 1998. Т. 32, № 4. С. 33–37.

Pavlov B. N., Soldatov P. E., D'yachenko A. I. i dr. The survival of experimental animals in hypoxic environments with argon. *Aviatsionnaya i ekologicheskaya meditsina* [Aviation and ecological medicine]. 1998, 32 (4), pp. 33-37. [In Russian]

13. Петров В. А., Иванов А. О. Перспективные пути повышения пожарной безопасности энергонасыщенных обитаемых герметичных объектов // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 10. С. 37–39.

Petrov V. A., Ivanov A. O. Promising Ways to Increase the Fire Safety of Energy-Saturated Inhabited Sealed Objects. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2017, 10, pp. 37-39. [In Russian]

14. Петрукович В. М. Методика оценки способности авиационного штурмана оперировать цифровой информацией в структуре пространственного образа // Вестник Балтийской педагогической академии. 2000. Вып. 34. С. 83–90.

Petrukovich V. M. Methods of assessing of the ability of the aviation navigator to operate the digital information in the spatial image structure. *Vestnik Baltiiskoi pedagogicheskoi akademii* [Vestnik of Baltic Pedagogical Academy]. 2000, 34, pp. 8390. [In Russian]

15. Сарычев А. С., Гудков А. Б. Оценка физиологических резервов у вахтовиков в полевых условиях Заполярья // Экология человека. 2011. № 11. С. 14–18.

Sarychev A. S., Gudkov A. B. Assessment of rotation workers' physiological reserves in Polar conditions. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2011, 11, pp. 14-18. [In Russian]

16. Сохранение и повышение военно-профессиональной работоспособности специалистов флота в процессе учебно-боевой деятельности и в экстремальных ситуациях: методические рекомендации / под ред. Ю. М. Боброва, В. И. Кулешова, А. А. Мясникова. М., 2013. 104 с.

Sokhraneniye i povysheniye voenno-professional'noi rabotosposobnosti spetsialistov flota v protsesse uchebno-boevoy deyatel'nosti i v ekstremal'nykh situatsiyakh: metodicheskie rekomendatsii [Maintaining and improving of military professional working capacity of fleet specialists during training and combat activities and in extreme situations: guidelines]. Eds. Yu. M. Bobrov, V. I. Kuleshov, A. A. Myasnikov. Moscow, 2013, 104 p.

17. Способ создания условий для жизнедеятельности человека в специальном гермообъекте ВМФ: пат. 2520906 Рос. Федерация от 27.06. 2014 / Советов В. И., Андреев С. П., Андреева Е. С., Чернин С. Я., Селезнёв Д. Г., Торшин Г. С., Бардышева О. Ф. Бюл. № 18. 2014. С. 24–29.

Sposob sozdaniya uslovii dlya zhiznedeyatel'nosti cheloveka v spetsial'nom germoob'ekte VMF [The method of creating the environment for human life in the special hermetic object of Navy]. Patent RF, no 2520906, 2014. Sovetov V. I., Andreev S. P., Andreeva E. S., Chernin S. Ya., Seleznev D. G., Torshin G. S., Bardysheva O. F. Bul. N 18. 2014. P. 24-29.

18. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты / под ред. В. С. Кощеева и З.С. Четвериковой. М., 1981. 15 с.

Fiziologo-gigienicheskie trebovaniya k izoliruyushchim sredstvom individual'noi zashchity [Physiological and hygienic requirements for insulating personal protection equipment]. Eds. V. S. Koshcheev, Z. S. Chetverikova. Moscow, 1981, 15 p.

19. Чумаков В. В. Альтернативные подходы к решению проблемы предотвращения пожаров в герметично замкнутых объемах // Обитаемость кораблей. Обеспечение радиационной и токсикологической безопасности: материалы

Межотраслевой науч.-практ. конф. «Кораблестроение в XXI веке: проблемы и перспективы» (ВОКОР-2014), СПб., 2014. С. 115–118.

Chumakov V. V. Al'ternativnye podkhody k resheniyu problemy predotvrashcheniya pozharov v germetichno zamknutykh ob'emakh [Alternative approaches to the problem of fire prevention in the hermetical confined spaces]. In: *Materialy Mezhotraslevoi nauch.-prakt. konf. «Korablestroeniye v XXI veke: problemy i perspektivy» (VOKOR-2014), SPb., 21-22 oktyabrya 2014* [Proceedings of Interindustrial scientific and practical Conference "Shipbuilding in the XXI century: problems and prospects", Saint-Petersburg, 21-22 October 2014]. Saint-Petersburg, 2014, pp. 115-118.

20. Anderson M., Nettelbeck T., Barlow J. Reaction time measures of speed of processing: Speed of response selection increases with age but speed of stimulus categorization does not. *British J. of Developmental Psychology*. 1997, 15, pp. 145-157.

21. ACC/AHA 2002 Guideline update for exercise testing. The report of the American college of cardiology. American heart association. Task force on practice guidelines (Committee on exercise testing). R. Gibbons, G. Balady, T. Bricker. *Circulation*. 2002, 106, pp. 1883-1892.

22. Lamb L. E. Hypoxia - an anti-deconditioning factor for manned space flight. *Aerospace Med*. 1965, 36, pp. 97-100.

23. Machado B. H. Mechanisms involved in autonomic and respiratory changes in rats submitted to short-term sustained hypoxia. *Materials of VI Chronic Hypoxia Symposium*. La Paz (Bolivia), 2016, pp. 20-25.

24. Miller J. M., Lambertsen C. J. *Project Test: an open sea study of prolonged exposures to a nitrogen-oxygen environment at increased ambient pressure*. Underwater Physiology: Proc. 4 th symp. New York, Acad. press, 1971, pp. 551-558.

25. Shevchenko K. M. Ultrastructural and tissue restructuring of the rat atrial myocardium under the influence of acute and chronic prenatal hypoxia. *Morphology*. 2015, 9 (3), pp. 99-110.

26. Shvartz E. Advantages of a low-oxygen environment in space cabins. *Aviat. Space Environ. Med*. 1990, 61 (3), pp. 272-276.

27. Sidorov P. I., Gudkov A. B., Tedder Iu. R. Physiological aspects of optimization of expedition and work shift schedules in Arctic regions. *Meditsina truda i promyshlennaia ekologiya*. 1996, 6, pp. 4-7.

28. Virues-Ortega J., Buena-Casal G., Garrido E., Alcazar B. Neuropsychological functioning associated with high-altitude exposure. *Neuropsychol. Rev*. 2004, 14, pp. 197-224.

29. Ward M. *Mountain medicine*. London, Crosby Lochwood Staples, 1975, 376 p.

30. Wilson J. M., Kligfield P. D., Adams G. M. Human ECG changes during prolonged hyperbaric exposures breathing N₂-O₂ mixtures. *J. Appl. Physiol.: Respir. Envir. and Exercise Physiol*. 1977, 42 (4), pp. 614-623.

Контактная информация:

Иванов Андрей Олегович — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник АО «Ассоциация разработчиков и производителей систем мониторинга»

Адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, 17-я линия Васильевского острова, д. 4–6

E-mail: ivanoff65@mail.ru