

УДК 574.2:551.46

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОДОЛАЗОВ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ В БАРОКАМЕРЕ

Яхонтов Б.О.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: giper28@ocean.ru

Проведен анализ проблемы обеспечения жизнедеятельности водолазов при повышенном давлении в барокамере. Показано, что обеспечение жизнедеятельности осуществляется через систему жизнеобеспечения путем формирования искусственной дыхательной среды и микроклимата. Гипербарическая среда в барокамере формируется на физиолого-гигиенических принципах с учетом действия факторов среды на организм водолаза. Главным параметром при формировании среды является парциальное давление кислорода, которое в условиях повышенного давления должно находиться в пределах, исключающих развитие гипоксии в организме и токсического действия кислорода. Под влиянием физических свойств специфической искусственной среды в барокамере формируется микроклимат. Наиболее характерным при повышении давления является повышение комфортной температуры среды и сужение зоны температурного комфорта. В замкнутом объеме камеры в результате жизнедеятельности человека и за счет дыхательного газообмена снижается PO_2 , повышается PCO_2 и накапливаются вредные микропримеси, в основном эндогенного происхождения. Все изменяющиеся параметры среды в камере должны восстанавливаться в реальном времени системами регенерации, кондиционирования и очистки. Этим поддерживается относительно нормальная жизнедеятельность водолазов и безопасность в период пребывания, особенно длительного, в условиях повышенного давления искусственной газовой среды.

Ключевые слова: гипербария, жизнедеятельность, система жизнеобеспечения, барокамера, водолаз, дыхательная среда, микроклимат

PHYSIOLOGICAL ASPECTS PROVISIONS THE LIFE ACTIVITY OF THE DIVERS IN INCREASED PRESSURE IN THE HYPERBARIC CHAMBER

Yakhontov B.O.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: giper28@ocean.ru

Have done the analysis of the problem of ensuring the life activity of divers at increased pressure in hyperbaric chamber. It is shown that life activity is carried out through the life support system, by the formation of an artificial respiratory environment and microclimate. Hyperbaric environment in the chamber is formed on physiological and hygienic principles, taking into account the effect of environmental factors on the body of the diver. The main parameter in the formation of the medium is the partial pressure of oxygen, which in hyperbaric conditions should be within the limits excluding the development of hypoxia in the body and the toxic effect of oxygen. Under the influence of the physical properties specific artificial environment in the hyperbaric chamber formed microclimate. The most characteristic with increasing pressure is to increase the comfortable ambient temperature and narrow the zone of temperature comfort. In a closed chamber, as a result of life activity human and due to respiratory gas exchange, PO_2 decreases, PCO_2 increases and harmful micro-impurities of mainly endogenous origin accumulate. All changing environment parameters in the chamber must be restored in real time by regeneration, conditioning and purification systems. This supports the relatively normal life activity of divers and safety during their stay, especially for a long time, in conditions of increased pressure of the artificial gas environment.

Keywords: hyperbaria, life activity, life support system, hyperbaric chamber, diver, breathing environment, microclimate

Решение проблемы изучения и освоения человеком глубин Мирового океана связано с необходимостью создания современных экспериментальных и производственных баз с водолазными комплексами для имитации глубин в барокамерах и для натуральных погружений. Такие комплексы должны быть оснащены эффективными и надежными системами жизнеобеспечения (СЖО), которые представляют собой совокупность технических средств, предназначенных для создания в отсеках барокамер условий для относительно нормальной жизнедеятельности людей в период их многосуточного пребывания под повышенным давлением. Очевидно, что основной функцией СЖО является формирование и поддержание на заданном уровне параметров дыхательной

газовой среды (ДГС) и микроклимата в замкнутом объеме барокамеры. Это обеспечивается функционированием комплекса подсистем, входящих в состав общей СЖО.

Для водолазных гипербарических систем, как и для любых замкнутых обитаемых систем, наиболее жесткие требования предъявляются к контролю основных параметров среды: давление (P), парциальное давление кислорода (PO_2) и двуокиси углерода (PCO_2), температура ($T^{\circ}C$), относительная влажность (RH,%), скорость движения среды, вредные микропримеси, – а также к системам их регулирования и поддержания на заданном уровне. Это обусловлено тем, что все указанные факторы в условиях повышенного давления оказывают влияние на функциональное состояние

организма водолаза, его работоспособность и здоровье, что прямо связано с безопасностью работы в таких условиях [1, 2]. В этой связи целью данной работы является анализ проблемы обеспечения жизнедеятельности человека в замкнутом объеме барокамеры, реализуемого на физиолого-гигиенических принципах формирования гипербарической среды, для повышения безопасности пребывания в условиях гипербарии.

Методы исследования – теоретические и экспериментальные (анализ, обобщение литературных и экспериментальных данных), основанные на многолетнем опыте проведения исследований в условиях повышенного давления в барокамерах при моделировании различных глубин погружения водолазов и под водой в обитаемых гипербарических системах (подводные дома, убежища, аппараты).

Результаты исследования показывают, что жизнедеятельность человека в любых условиях поддерживается в основном за счет адекватного этим условиям дыхательного газообмена: потребления кислорода и выделения двуокиси углерода. Особенностью ДГС в условиях повышенного давления является то, что для больших глубин или длительного пребывания даже на средних (до 40 м) глубинах она является искусственной, соответствующей специальным физиолого-гигиеническим требованиям [3, 4].

Количественное соотношение газовых компонентов (кислород, азот, гелий) в смеси изменяется с изменением давления или соответствующей ему глубины. При имитации погружений в барокамере на большие глубины азот воздуха замещается гелием, хотя небольшая доля азота в смеси от остаточного перед компрессией воздуха в камере сохраняется. Но в любом случае формирование дыхательной среды и поддержание газового состава смеси на заданном уровне является основой для обеспечения жизнедеятельности. Парциальное давление кислорода в таких условиях должно находиться в допустимых пределах, исключающих развитие гипоксии в организме и интоксикации кислородом (5, 6). На фоне даже умеренной гипоксии в условиях повышенного давления в барокамере функциональные возможности человека снижаются, а при развитии токсического действия кислорода реакции организма переходят в патологические. Поэтому в зависимости от давления, состава газовой среды и длительности пребывания в барокамере PO_2 в отсеках должно поддерживаться в диапазоне 0,25–0,30 кгс/см² [3], что соответствует 184–221 мм рт. ст. Это умеренно гипероксический, но не токсический уровень PO_2 . Не бу-

дет проявлять токсичность и PO_2 на уровне 0,35 кгс/см² (258 мм рт. ст.), но при ограничении длительности пребывания под повышенным давлением. Следует отметить, что дыхание в условиях гипербарии и нормоксической смесью (PO_2 – 0,21 кгс/см², или 156 мм рт. ст.) в условиях относительного покоя не приводит к изменению кислородного режима организма [7].

Кроме оптимального газового состава гипербарической среды, на функциональные возможности организма оказывает влияние и микроклимат в барокамере. Он характеризуется температурой (конвекционной и радиационной), влажностью и подвижностью газовой среды. Температура является основным параметром обитаемости камер.

Теплофизические свойства гипербарической газовой среды в барокамерах обусловлены действием двух факторов: изменением давления газовой среды и изменением её состава. При замене азота на гелий изменяется не только плотность, но и вязкость, теплопроводность и теплоёмкость смеси. Гелий обладает в 6 раз большей теплопроводностью и в 5,2 раза большей теплоёмкостью, чем воздух, и это является причиной того, что при недостаточном обогреве при повышенном давлении потеря тепла находящимся в барокамере человеком может оказаться равной его продукции при обмене веществ в организме. Это вызывает необходимость повышения температуры окружающей газовой среды в барокамере для компенсации увеличения теплопотерь в связи с повышением теплопередающих свойств искусственной атмосферы. Например, при дыхании кислородно-азотно-гелиевой смесью температура в среде барокамеры при давлении 31 кгс/см², имитирующем глубину 300 метров, может находиться в диапазоне допустимых температур – 29,2–31,2 °С при относительной влажности 60–80 % [3]. Но эти величины температуры могут иметь и несколько другие значения, в зависимости от других параметров микроклимата, физической активности человека и его одежды.

При повышении давления зона температурного комфорта закономерно сужается. Это приводит к тому, что изменение температуры в указанных условиях всего лишь на 0,5 °С, в пределах диапазона допустимых значений, довольно быстро приводит к нарушению температурного комфорта для человека.

Большое значение в условиях барокамеры имеет влажность газовой среды. Высокая относительная влажность является не только причиной неприятных субъективных ощущений водолазов. Известно, что при относительной влажности среды более 70 % в условиях гипербарии происходит

интенсивное размножение грибковой флоры, которая может вызвать даже порчу оборудования и являться источником вредных микропримесей. Помимо этого, грибковая флора может вызывать специфические заболевания у находящихся в барокамере людей в связи со снижением их иммунно-биологической устойчивости.

Существенную роль в формировании микроклимата играет также и скорость движения газовой среды. Для барокамер длительного пребывания (ДП) она должна находиться в пределах 0,05–0,1 м/с, для камер кратковременного пребывания (КП) – 0,1–0,15 м/с [4]. При повышении скорости движения гипербарической среды влияние её на теплообмен усиливается. Это объясняется большим, чем в нормальных условиях, увеличением коэффициента теплопередачи конвекцией при увеличении подвижности среды. Таким образом, этот фактор микроклимата может весьма эффективно использоваться в гипербарической среде для обеспечения поддержания теплового комфорта человека.

В любых гермообъектах, каковым является и водолазная барокамера, основным источником загрязнений исходного газового состава дыхательной среды является человек, а также находящиеся в камере материалы и работающие аппараты [8]. За счет потребления человеком кислорода его содержание в замкнутой дыхательной среде снижается, при этом содержание двуокиси углерода повышается. Кроме того, человек выделяет из организма в окружающую среду через легкие, кожу, почки, кишечник небольшие количества эндогенных продуктов метаболизма (окись углерода, аммиак, метан, сероводород и другие примеси, а также водяные пары, запахи, тепло). В атмосфере обитаемых отсеков гермокамеры было обнаружено более 200 летучих вредных микропримесей [9]. В обычных условиях человек выдыхает порядка 600 летучих соединений [10]. Образующаяся специфическая для замкнутого объема дыхательная газовая среда и микроклимат должны управляться системой жизнеобеспечения и поддерживаться ею за счет восстановления в реальном времени всех изменяющихся и имеющих значение для организма параметров среды с учетом физиолого-гигиенических требований. Этим обеспечивается жизнедеятельность водолазов в период пребывания, особенно длительного, в условиях повышенного давления искусственной газовой среды. Поэтому в общей системе жизнеобеспечения водолазов в барокамере целесообразно выделить, как наиболее ответственные, следующие подсистемы:

регенерации ДГС (подача кислорода для восполнения потребляемого, инертных газов и удаление двуокиси углерода), кондиционирования (поддержание параметров микроклимата: температуры, относительной влажности, скорости движения газовой среды) и очистки дыхательной среды от вредных микропримесей в отсеках барокамеры (рисунок). Эти системы работают непрерывно в течение всего срока (иногда до 4–5 недель) пребывания водолазов в барокамере, формируют и поддерживают под управлением систем автоматики дыхательную среду в отсеках камеры. В структуре этих систем, которые обычно располагаются снаружи барокамеры (но бывают и внутренние, и комбинированные системы), находятся и функционируют находящиеся в герметичных корпусах побудители расхода, осушители, теплообменные и химические аппараты с поглотительными реагентами для очистки среды от CO_2 и вредных микропримесей. Весь этот комплекс аппаратов и устройств в составе общей СЖО обеспечивает создание, изменение и поддержание условий для пребывания и работы водолазов в барокамерах с сохранением здоровья, то есть он направлен на формирование адекватной условиям дыхательной газовой среды и микроклимата [11, 12].

Управление этим процессом осуществляется на основе измеряемых величин параметров микроклимата и газовой среды. С повышением давления в камере значение этих параметров повышается. В таких условиях управлять системами гипербарического объекта становится сложнее. Это особенно проявляется при переводе системы жизнеобеспечения с одного режима на другой, то есть в процессе повышения или понижения давления.

Мировой опыт эксплуатации водолазных комплексов и проведения медико-физиологических экспериментов в исследовательских барокамерах показал, что эффективность этих работ определяется не только оперативным управлением режимами работы основных технических средств водолазного объекта в соответствии с программой погружения или научного эксперимента, но и оперативной обработкой технической и медико-физиологической информации и отображением её на пульте оператора. Это реализуется с помощью современных систем компьютерной оперативной обработки данных, обеспечивающих наблюдение за параметрами среды в камере, подачу сигналов тревоги в случаях выхода величин этих параметров за допустимые пределы, ведение протокола пребывания в барокамере и выполнение других функций.



Структурно-функциональная схема системы жизнеобеспечения с основными подсистемами формирования газовой среды и микроклимата в барокамере

Очевидно, что управление гипербарической средой через систему жизнеобеспечения не должно ограничиваться поддержанием на заданном уровне параметров среды, при этом необходимо учитывать и состояние человека в барокамере. Поскольку организм человека является сенсорной системой, он может рассматриваться как элемент системы жизнеобеспечения самого человека. Выраженные реакции организма на измененные условия гипербарической среды являются сигналом к необходимости приведения этих условий к относительной норме. Поэтому высокие требования к контрольно-измерительной аппаратуре дополняются повышенными требованиями к физиологической и медицинской аппаратуре, обеспечивающей экспресс-информацию о функциональном состоянии организма водолазов в барокамере в газовой и водной среде (гидротанк берегового водолазного комплекса) для принятия мер воздействия на дыхательную среду со стороны системы жизнеобеспечения.

Поскольку все эти цели и задачи реализуются при непосредственном участии человека, находящегося в условиях повышенного давления в барокамере, он должен быть защищен от возможных опасных воздействий на организм при отклонении параметров гипербарической среды обитания от допустимых значений. Это определяет высокие требования к дыхательной среде и самой системе жизнеобеспечения, особенно при использовании наиболее эффективного

метода длительного (многосуточного) пребывания водолазов под повышенным давлением в научных или производственных целях [13, 14].

Проблемы жизнеобеспечения человека в обитаемых гипербарических системах во многом схожи с проблемами в космических системах и обитаемых подводных аппаратах – контроль и поддержание заданного газового состава и физических параметров среды в замкнутом объеме, сохранение работоспособности и здоровья в измененной газовой среде и другие. При разработке и эксплуатации любых систем жизнеобеспечения за основу принимаются требования безопасности, включающие три главных компонента: обнаружение неполадок, возможность их срочного устранения и резервирование основных подсистем.

Заключение

Обеспечение жизнедеятельности водолазов в барокамерах осуществляется через систему жизнеобеспечения, предназначенную для создания, изменения и поддержания необходимых условий для пребывания водолазов в отсеках камеры с сохранением здоровья. Эти условия заключаются в формировании искусственной среды и поддержании её параметров на заданном уровне. Гипербарическая среда формируется на физиолого-гигиенических принципах с учетом действия факторов среды на организм. Главным параметром формирования дыхательной среды является оптимальное

парциальное давление кислорода, которое в условиях гипербарии должно находиться в допустимых пределах, исключающих развитие гипоксии в организме и интоксикации кислородом. В любом случае формирование и поддержание параметров дыхательной среды на оптимальном уровне является основой для обеспечения жизнедеятельности.

Не менее важным для поддержания функциональных возможностей организма является и микроклимат в среде барокамеры. Он связан с изменением теплофизических свойств гипербарической газовой среды под влиянием изменения давления и газового состава. Наиболее характерным при повышении давления в барокамере является повышение комфортной температуры среды. Это особенно проявляется при дыхании смесями на основе гелия. В таких условиях зона температурного комфорта значительно сужается.

В замкнутом объеме барокамеры в результате жизнедеятельности человека в дыхательной газовой среде снижается PO_2 , повышается PCO_2 , среда загрязняется вредными микропримесями эндогенного и экзогенного происхождения. Все изменяющиеся параметры среды должны восстанавливаться в реальном времени системами регенерации, кондиционирования и очистки. Этим поддерживается относительно нормальная жизнедеятельность водолазов и безопасность в период пребывания, особенно многосуточного, в условиях повышенного давления искусственной газовой среды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0011).

Список литературы

1. Кисляков Ю.Я., Бреслав И.С. Дыхание, динамика газов и работоспособность при гипербарии. – Л.: Наука, 1988. – 237 с.
2. Дудков М.Д. Медицинские аспекты обеспечения безопасности водолазного труда // Нептун. Водолазный проект. – 2010. – № 10. – С. 80–87.
3. Глубоководные водолазные спуски и их медицинское обеспечение / В.В. Смолин, Г.М. Соколов, Б.Н. Павлов, М.Д. Демчишин. – М.: Слово, 2004. – Т. 2. – 723 с.
4. ГОСТ Р 52264-2004 Барокамеры водолазные. Общие технические условия. – Введен впервые, введ. 2004 – 10 – 11. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 39 с.
5. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы оптимизации водолазных дыхательных газовых смесей // Нептун. Водолазный проект. – 2014. – № 5. – С. 74–79.
6. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы построения технологий водолазных погружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 12-1. – С. 132–136.
7. Гуляр С.А. Медико-физиологические гипербарические исследования в рамках программы «Черномор»: результаты и перспективы // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XI Международной научно-технич. конф. – М., 2009. – Ч. 1. – С. 105–109.
8. Гладышев Н.Ф. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.И. Дворецкий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016. – 204 с.
9. Синяк Ю.Е. Актовая речь «Системы жизнеобеспечения обитаемых космических объектов (Прошлое, настоящее и будущее)». – М., 2008. URL: http://light-water.ucoz.ru/statii/aktovaja_rech_ju.e-sinjaka-sistemy_zhizneobespeche.pdf. (дата обращения 25.05.2018).
10. Анализ состава выдыхаемого человеком воздуха для диагностики галитоза / С.А. Тараканов [и др.]. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_72A_tarakanov.pdf_2058.pdf (дата обращения 25.05.2018).
11. Куренков Г.И., Скалацкий О.Н., Яхонтов Б.О. Развитие технологий глубоководных водолазных погружений для освоения шельфа России и других прикладных задач // Proceedings of International Conference on Subsea Technology (Saint-Petersburg, Russia 22–25 June 2009). – St-Petersburg State Marine Technical University, 2009. – pp. 1–20. ISBN 978-5-88303-453-3.
12. Яхонтов Б.О. Принципы построения и функционирования систем жизнеобеспечения водолазных комплексов // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XV Всероссийской научно-технич. конф. – М., 2017. – Т. 2. – С. 190–193.
13. Смолин В.В., Соколов Г.М. Метод длительного пребывания под давлением – высокоэффективный метод выполнения водолазных работ // DIVETEK. – 2007. – № 1 (21). – С. 26–33.
14. Мотасов Г.П. Медицинское обеспечение водолазных спусков методом ДП в 40 ГосНИИ МО РФ // Нептун. Водолазный проект. – 2010. – № 4. – С. 40–45.