УДК 626.02:574.2:66.074

СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВОДОЛАЗНЫХ БАРОКАМЕР

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

Проведен анализ структуры и принципов функционирования технических систем жизнеобеспечения (СЖО) для водолазных барокамер и комплексов. Приведены основные подсистемы, входящие в структуру общей СЖО. Наибольшее внимание уделяется принципам построения и функционирования подсистемы регенерации, кондиционирования и очистки (РКО) дыхательной газовой среды (ДГС). Эта подсистема рассматривается как главная в системе жизнеобеспечения, поскольку обеспечивает поддержание заданного газового состава искусственной среды, температуры и влажности при рабочих давлениях в барокамере. Но по принципам построения и функционирования она является наиболее консервативной. Способы регенерации и очистки ДГС остаются неизменными, но надежными и эффективными: способ осушки – конденсационный, очистки – адсорбционный, восполнение среды кислородом – через объемные дозаторы. Обсуждаются преимущества внешних СЖО и целесообразность использования внутренних систем в барокамерах длительного пребывания. Приведена принципиальная схема системы РКО. Описан цикл прохождения газовой среды через контур системы РКО с осушкой ДГС и очисткой от двуокиси углерода и вредных микропримесей эндогенного и экзогенного происхождения. Рассмотрены способы формирования теплового режима в барокамере: через нагрев ДГС и обогрев барокамеры. Тенденции развития СЖО заключаются в основном в повышении технического и функционального уровней всех комплектующих системы и совершенствовании систем автоматического управления процессами жизнеобеспечения.

Ключевые слова: водолазная барокамера, система жизнеобеспечения, дыхательная газовая среда, регенерация, кондиционирование, очистка газовой среды

STRUCTURE AND FUNCTION OF LIFE SUPPORT SYSTEMS FOR DIVING HYPERBARIC CHAMBERS

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

The structure and principles of functioning of technical life support systems (LSS) for diving hyperbaric chambers and complexes are analyzed. The main subsystems included in the structure of the general LSS are given. The greatest attention is paid to the principles of construction and functioning of regeneration, conditioning and purification (RCP) subsystem of the respiratory gas environment (RGE). This subsystem is considered as the main one in the life support system, because it provides maintenance of the given gas composition of the artificial environment, temperature and humidity at operating pressures in the hyperbaric chamber. However according to the principles of construction and functioning it is the most conservative. Methods of regeneration and purification of RGE remain unchanged, but reliable and effective: the method of drying – condensation, purification – adsorption, replenishment of the medium with oxygen – through volumetric dispensers. The advantages of external LSS and the expediency of using internal systems in long-stay pressure chambers are discussed. The schematic diagram of the RCP system is given. The cycle of gas medium passing through the RCP system circuit with RGE drying and purification from carbon dioxide and harmful micro-impurities of endogenous and exogenous origin is described. The methods of forming the thermal regime in the pressure chamber: by heating the RGE and heating the pressure chamber, are considered. Trends in the development of LSS are mainly to increase the technical and functional levels of all system components and to improve the automatic control systems of life support processes.

Keywords: diving hyperbaric chamber, life support system, respiratory gas environment, regeneration, conditioning, gas environment purification

Наземные водолазные комплексы, в том числе для разработки и освоения технологий водолазных погружений в научных целях, состоят из двух частей – барокамера и система жизнеобеспечения. Барокамера – это техническое средство для моделирования глубин и условий погружения человека под воду. Система жизнеобеспечения (СЖО) представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для создания, изменения и поддержания в отсеках барокамер условий для относительно нормальной жизнедеятельности людей в период их пребы-

вания, в том числе многосуточного, под повышенным давлением. Очевидно, что основной функцией СЖО является формирование и поддержание на заданных уровнях в диапазоне допустимых значений параметров дыхательной газовой среды (ДГС) и микроклимата в замкнутом объеме барокамеры [1]. В целом функция СЖО поддерживается работой комплекса подсистем, входящих в структуру общей СЖО:

- хранения сжатых газов и смесей, подачи кислорода, азота, гелия в отсеки;
- аварийной подачи газовой смеси на дыхание под маску;

- газового анализа и измерения физических параметров среды;
- удаления из дыхательной среды CO_2 и очистки от других вредных примесей;
- обеспечения микроклимата и циркуляции гипербарической газовой среды;
- обеспечения санитарно-бытовых потребностей;
- постоянной связи водолазов со службами обеспечения;
- медицинского контроля состояния водолазов.

Подсистемы удаления из дыхательной среды CO_2 и очистки от других вредных примесей и обеспечения микроклимата целесообразно объединить в одну систему – регенерации, кондиционирования и очистки дыхательной среды (РКО), которая является главной в системе жизнеобеспечения. Это наиболее ответственная система, потому что она в течение всего цикла работ в условиях повышенного давления (до 4–5 недель) функционирует непрерывно, сохраняя адекватные для организма условия в камере длительного пребывания [2]. Система РКО обеспечивает поддержание заданного газового состава искусственной среды, температуры и влажности при рабочих давлениях в барокамере. Работа системы происходит в условиях нестационарности параметров среды в жилых отсеках барокамер. Переменные составы дыхательных смесей, изменяющиеся давления и физические свойства газовых смесей (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость) под влиянием первых двух факторов осложняют задачи, которые необходимо решать при проектировании и эксплуатации систем жизнеобеспечения. Все это определяет высокие требования к системе, особенно при использовании метода длительного пребывания (ДП) водолазов в условиях повышенного давления: она должна быть высокоэффективной и надежной в работе, что является главным критерием обеспечения безопасности в таких условиях.

Современные системы жизнеобеспечения для барокамер через подсистему РКО обеспечивают поддержание жизненно важных параметров ДГС в отсеках (парциальные давления кислорода и двуокиси углерода, температуру, относительную влажность, содержание вредных микропримесей в пределах ПДК, скорость движения газовой среды в камере) с допустимой погрешностью при рабочих давлениях в барокамере.

Понятно, что проблемы жизнеобеспечения человека в обитаемых гипербарических системах и принципы построения СЖО во многом схожи с космическими системами жизнеобеспечения и с системами в обитаемых подводных аппаратах. Но специфика

условий функционирования СЖО наземных водолазных барокамер отличается от космических и подводных систем: практически все процессы жизнеобеспечения человека происходят в условиях повышенного давления искусственной газовой среды. Наземная водолазная барокамера (водолазный комплекс) может классифицироваться как объект, который в отличие от космического и подводного, окружен обычной атмосферой [3], что делает доступным его медико-техническое обслуживание. Поэтому технические системы жизнеобеспечения водолазного комплекса основаны целиком на запасах расходных материалов (кислорода, азота, гелия, химпоглощителей, воды, медикаментов и других), на физико-химических процессах регенерации дыхательной газовой среды (удаление CO_2 и вредных микропримесей, запахов, восполнения среды кислородом).

Цель работы: провести анализ структуры и функций технической системы жизнеобеспечения водолазных барокамер и оценить тенденции их развития и возможности повышения эффективности и надежности системы, безопасности работы водолазов на имитированных в барокамере глубинах.

Методы исследования: анализ данных, полученных при испытаниях и эксплуатации технических систем жизнеобеспечения для барокамер и водолазных комплексов, обобщение отечественного и зарубежного опыта, моделирование глубин погружения водолазов в барокамерах по фактору давления.

Результаты исследования показывают, что система регенерации, кондиционирования и очистки ДГС, хотя и является условно главной в общей СЖО, по принципам построения и функционирования является наиболее консервативной. Практически все отечественные и зарубежные гипербарические комплексы для длительного пребывания водолазов под повышенным давлением всегда были оснащены регенеративными системами на основе физико-химических способов обработки дыхательной газовой смеси, несмотря на то, что существуют, и другие способы, основанные, например, на использовании регенерируемых синтетических цеолитов (молекулярных сит), электрохимических аппаратов, диффузии через полупроницаемые мембраны. Однако недостаточная эффективность и надежность этих способов пока не позволяет заменить ими традиционные способы и методы регенерации и очистки ДГС. Последние являются более простыми, а поэтому считаются и более надежными. Системы РКО в существующих гипербарических комплексах, как правило, расположены вне жилых барокамер (рисунок) в герметичных корпусах.

Принципиальная схема системы РКО ДГС в барокамере ДП [2]: 1 – фильтр очистки от вредных примесей, 2 – осушитель с влагоотделителем и вентилем слива, 3, 6 – теплообменные аппараты, 4 – побудитель расхода, 5 – поглотительный аппарат для очистки ДГС от CO_2 , 7 – запорные вентили

При такой компоновке системы РКО упрощается обнаружение неполадок, обеспечивается возможность срочного их устранения, а также резервирования основных устройств и аппаратов. Это существенные преимущества внешних систем, потому что они прямо связаны с безопасностью работы в барокамере. Внутренние системы имеют другие преимущества – более простое конструктивное исполнение, отсутствие прочных корпусов, значительно меньшие массогабаритные показатели, более благоприятные тепловые условия работы электродвигателей. Такую систему РКО для жилых барокамер гипербарических комплексов следует рассматривать в основном как резервную. Оснащение наземного гипербарического комплекса такими системами во многом зависит от мощности имеющейся основной системы жизнеобеспечения. Если разовый ресурс поглотительных аппаратов обеспечивает проведение работ в барокамере без их перезарядки химпродуктом в течение ДП, то внутренние системы РКО будут использоваться по назначению лишь в случае необходимости ремонта каких-либо узлов и агрегатов СЖО. В системах жизнеобеспечения при наличии основного резервного оборудования (нагнетатели, поглотительные аппараты) наличие еще внутренней системы, вероятно, не обязательно. Оснащать наземные барокомплексы для длительного пребывания водолазов только внутренней системой жизнеобеспечения также нецелесообразно. Использование внутренних систем может быть обосновано на судовых водолазных комплексах при малых площадях помещений вблизи камер и в водолазных барокамерах относительно небольшого объема для пребывания в условиях

повышенного давления двух-трех человек в течение лишь нескольких суток.

Все барокамеры водолазного комплекса, а также отсеки барокамеры, рассчитанные на работу при разных давлениях, должны иметь отдельные взаимозаменяемые контуры регенерации, кондиционирования и очистки газовой среды. В любом случае система РКО через систему автоматики, не исключая ручного управления, должна обеспечивать 2–3-кратный обмен газовой среды в час и поддержание параметров среды в замкнутом объеме барокамеры (газовый состав, температура, относительная влажность, скорость движения газовой среды) в широких диапазонах значений, превышающих допустимые.

Функционирование системы РКО осуществляется при включении нагнетательных аппаратов (побудителей расхода). При работе контура, обслуживающего барокамеру или обитаемые отсеки камеры, дыхательная газовая смесь всасывается нагнетательным аппаратом (4) из отсека, проходит через фильтр очистки от вредных примесей (окиси углерода, аммиака, сероводорода, углеводородов), запахов и аэрозолей (1), например, палладиевый фильтр. Затем смесь поступает в осушитель (2) с влагоотделителем и вентилем слива, в котором происходит высвобождение влаги в результате понижения температуры ДГС за счет работы контура холодной воды общей СЖО и доведения смеси до точки росы. Количество высвобождаемой влаги регулируется увеличением или уменьшением количества холодной воды, подаваемой в осушитель с помощью вентилей, установленных в линиях контура холодной воды. Конденсат скапливается во влагоотделителе и удаляется путем слива через вентиль. Это наиболее удобный для

условий гипербарии физический способ осушки ДГС. Осушенная таким образом и охлажденная смесь поступает в теплообменный аппарат (3). В теплообменнике ДГС подогревается до необходимой температуры и поступает на работающий нагнетатель, где подогревается ещё на несколько градусов. Далее смесь поступает в поглощательный аппарат (5), там она очищается от CO_2 , проходя через кассету с химпоглотителем ХП-И (химпоглотитель известковый), активированным углем и противопылевым фильтром, установленными в этом же аппарате, для задержки частиц ХП-И. После поглощательного аппарата смесь поступает в теплообменник (6), где нагревается до заданного значения температуры и направляется обратно в жилой отсек. При наличии в отсеке фильтра очистки от вредных примесей (1) ДГС должна разделяться на два потока: часть (в зависимости от номинального расхода через фильтр) направляется в фильтр, остальное распределяется в отсеке и направляется во внешний контур РКО.

Тепловой режим в барокамере может поддерживаться за счет нагрева ДГС при функционировании системы РКО, как было описано выше, и обогрева камеры. Нагрев ДГС осуществляется через контур горячей воды, которая подается на теплообменные аппараты. При этом температура дыхательной смеси регулируется количеством горячей воды, подаваемой на эти теплообменники, с помощью вентиля, установленных в водяных линиях, или изменением температуры горячей воды в подогревателях воды.

Обогрев барокамеры может производиться с использованием: электрических обогревателей; системы обогрева горячей водой с температурой не выше 95°C ; системы парового обогрева с давлением пара не более 3 кгс/см^2 ; газовой смеси с температурой до 60°C , пропускаемой от теплообменника внутри барокамеры [4].

Для очистки газовой среды от загрязнений могут использоваться криогенный и адсорбционный методы. При криогенном методе газовый поток охлаждается в теплообменнике с помощью жидкого азота, в результате чего все загрязнения переходят в жидкое или твердое состояние и удаляются из газовой среды. В адсорбционном методе используется физическая или химическая адсорбция загрязнений различными поглотителями. Адсорбционный метод является более надежным и пригодным для автоматического управления. Для удаления CO_2 в отечественных системах очистки в основном используется гранулированный твердый поглотитель ХП-И. Сна-

ряжение поглотительного аппарата может дополняться, кроме активированного угля, и силикагелем на выходе ДГС из аппарата для повышения эффективности осушки, так как процесс поглощения двуокиси углерода ХП-И сопровождается выделением влаги. Для обеспечения оптимальных условий работы химпоглотителя температура ДГС на входе в аппарат должна находиться в пределах $15\text{--}40^\circ\text{C}$, относительная влажность – в пределах $40\text{--}80^\circ\text{C}$, что укладывается в диапазон этих показателей в реальных условиях работы в барокамерах ДП. Кроме ХП-И, для поглощения CO_2 могут применяться и регенерируемые поглотители – молекулярные сита. В принципе пригодны и жидкие поглотители. Системы с такими поглотителями имеют даже и некоторые преимущества. Они отличаются небольшими габаритами. При использовании жидких поглотителей потребление электроэнергии и, соответственно, тепловыделение могут быть сведены к минимуму. Но такие системы имеют один существенный недостаток – загрязнение очищаемого газа парами самого сорбента.

Эффективность очистки зависит от многих факторов, связанных с конструктивными особенностями системы – объема и количества аппаратов поглощения примесей, производительности побудителей расхода, качества фильтра, поглотителя, осушителя.

Функционирование систем очистки газовой среды от вредных примесей направлено на их ликвидацию и недопущение превышения ПДК. Скорость накопления примесей зависит от количества людей в камере, от их физической активности, от объема камеры. Для поддержания требуемой чистоты дыхательной среды в замкнутом объеме скорость удаления вредных примесей системой очистки должна быть не ниже скорости их накопления.

Все примеси в замкнутых объемах, коим является и барокамера, как правило, эндогенного происхождения. В редких случаях их источником могут быть газы, используемые для приготовления дыхательных смесей, отделочные материалы, красители, медицинские препараты, оборудование. Известно, что даже при дыхании в обычных условиях или в гермокамере при нормальном давлении человек выделяет с выдыхаемым воздухом и через другие источники сотни вредных микропримесей [5, 6]. Из них наиболее изученной является окись углерода [7], скорость выделения которой резко возрастает при действии ряда факторов, характерных для гипербарии (гипероксия, гиперкапния и другие). Результатом токсического действия большинства из-

ученных вредных микропримесей эндогенного и экзогенного происхождения является прямое или опосредованное нарушение дыхательной функции крови и развитие кислородной недостаточности.

За пределами допустимого диапазона величин вредных примесей и физических параметров среды функциональные возможности организма недостаточны для сохранения его компенсаторных реакций, поэтому СЖО должна иметь эффективные подсистемы поддержания заданных величин этих параметров в пределах допустимых значений.

Кроме очистки ДГС от CO_2 и вредных микропримесей процесс регенерации связан и с пополнением среды кислородом. В жилых барокамерах необходимо пополнять дыхательную среду кислородом в количестве, примерно, 30 л в час на человека. Однако это зависит от физической активности находящихся в камере водолазов.

Подача кислорода в камеру в идеале должна бы осуществляться непрерывно со скоростью, равной потреблению кислорода находящимися в камере людьми, но реализовать это практически довольно сложно, поскольку при этом необходимо контролировать изменяющееся в зависимости от многих факторов общее потребление кислорода экипажем. Добавление кислорода в отсеки барокамер до сих пор производится в основном через объёмные дозаторы. Современные отечественные водолазные барокамеры комплектуются надёжной системой дозированной подачи кислорода, исключающей возможность неконтролируемой его подачи в отсек барокамеры, минуя дозирующий баллон [8].

Кислород обычно подается в дыхательную газовую среду барокамеры в зоне поступления ДГС в отсек после ее прохождения через весь контур системы РКО. Это обеспечивает лучшее смешивание газов, недопущение застойных зон с недопустимым уровнем содержания кислорода и, главное, подачу в отсек предварительно нагретой в контуре смеси до заданной температуры. При этом для интенсивного перемешивания кислорода с газовой средой камеры имеет значение, конечно, и скорость газового потока. Но при этом способе масса и частота дозированной подачи кислорода рассчитывается для принимаемых за стандартные условий: давление в камере, её объем, количество водолазов и, главное, потребление кислорода каждым водолазом постоянны. Последнее условие в водолазных барокамерах ДП практически невыполнимо, поэтому колебания PO_2 в допустимых пределах в от-

секе барокамеры неизбежны, но они и не представляют опасности.

Кислородный режим в барокамере в принципе может поддерживаться и другими способами и методами. Ещё не реализована, хотя и обоснована возможность обеспечения кислородом методом электролиза воды в барокамере. Представляет интерес и метод получения кислорода из твердых кислородсодержащих соединений на основе пероксидов и перхлоратов щелочных металлов [9], а также другие, более современные способы. Но почти все они по ряду причин вряд ли могут рассматриваться как основные для использования их в водолазных барокамерах и комплексах.

Заключение

Структура, основные принципы построения и функционирования систем жизнеобеспечения для водолазных барокамер и комплексов за последние десятилетия почти не изменились. Основной функцией СЖО является формирование, изменение и поддержание на заданных уровнях параметров дыхательной газовой среды и микроклимата в замкнутом объеме барокамеры. Эту функцию выполняет подсистема регенерации, кондиционирования и очистки ДГС, которая обеспечивает поддержание газового состава искусственной среды, температуры, влажности и скорости движения газовой среды при рабочих давлениях в барокамере, то есть она управляет условиями поддержания жизнедеятельности человека в камере. Это наиболее ответственная система в составе общей СЖО.

Современные системы жизнеобеспечения обладают высокой степенью автоматизации создания и поддержания газовых режимов и микроклимата в отдельных барокамерах комплексов и отсеках барокамер и управляются, как правило, с помощью ЭВМ. Тенденции развития СЖО заключаются в основном в повышении технического и функционального уровня всех комплектующих системы (устройств, агрегатов, аппаратов, приборов) и совершенствовании систем автоматического управления процессами жизнеобеспечения. Значительно повысились и реализуются требования к надежности и эффективности системы в целом, к точности и надежности систем газового анализа и измерения физических параметров среды. Появились более эффективные способы обеспечения тепловлажного режима в водолазных барокамерах. Однако не получили распространения способы и методы регенерации ДГС в условиях гипербарии, основанные на использовании регенерируемых синтетических

цеолитов, электрохимических аппаратов, диффузии через полупроницаемые мембраны и другие, так как их эффективность и целесообразность использования в водолазных барокамерах весьма неочевидны. Консервативные способы регенерации ДГС на основе запасов расходных материалов, кондиционирования и очистки среды остаются надежными и эффективными, отвечающими современным требованиям.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2018-0011).

Список литературы

1. Яхонтов Б.О. Физиологические аспекты обеспечения жизнедеятельности водолазов при повышенном давлении в барокамере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 6. С. 135–139.
2. 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.
3. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов. М.: Издательский дом «Спектр», 2016. 204 с.
4. ПУБЭК-2007. Правила устройства и безопасной эксплуатации водолазных барокамер (утв. Минобороны России) Документ по состоянию на август 2014 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://lawru.info/dok/2007/01/03/n298465.htm> (дата обращения: 29.10.2018).
5. Степанов Е.В. Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров. М., 2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studmedlib.ru/book/ISBN9785922111522.html> (дата обращения: 29.10.2018).
6. Синяк Ю.Е. Актовая речь «Системы жизнеобеспечения обитаемых космических объектов (Прошлое, настоящее и будущее)». М., 2008. [Электронный ресурс]. URL: http://light-water.ucoz.ru/statii/aktovaja_rech_ju.e-sinjaka-sistemy_zhizneobespeche.pdf (дата обращения: 29.10.2018).
7. Шулагин Ю.А., Степанов Е.С. Выделение эндогенной окиси углерода у человека и животных. Лазерный мониторинг окиси углерода в выдыхаемом воздухе. Lap Lambert Academic Publishing, 2012. 196 с.
8. Храмов А.Г. Технические средства выполнения и обеспечения поисковых, аварийно-спасательных, водолазных и подводно-технических работ // Освоение морских глубин / гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2018. С. 418–425.
9. Солдатов П.Э. Физиолого-гигиеническое обоснование новых методов обеспечения организма кислородом в экстремальных условиях: автореф. дис. ... докт. мед. наук. Москва, 2006. 40 с.