

УДК 626.02:612.2:57.042

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОДОЛАЗНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

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

На основе экспериментальных данных обсуждаются физиологические аспекты стратегии формирования состава дыхательных газовых смесей (ДГС), которые направлены на оптимизацию функционального состояния организма под водой и в водолазных барокамерах. Как главные факторы дыхательной среды и их эффекты, на которые можно воздействовать с помощью ДГС, рассматриваются: плотность (повышение работы дыхания), кислород (гипоксия и интоксикация), инертные газы (азотный наркоз и НСВД). Эти факторы составляют физиологическую основу стратегии разработки ДГС, которая включает основные направления: снижение плотности ДГС путем замены относительно тяжелого инертного компонента смеси более легким, это снижает нагрузку на легочное дыхание, улучшает элиминацию CO_2 из организма и поддерживает работоспособность; поддержание парциального давления кислорода в диапазоне допустимых величин во избежание развития кислородной недостаточности или токсичности при любых физиологических состояниях (покой, работа) и в любых условиях (под водой, барокамера), это поддерживает жизнедеятельность и работоспособность водолаза; ослабление азотного наркоза или его исключение путем ограничения глубины погружения с использованием кислородно-азотных смесей или замены азота в смеси на ненаркотичные газы при глубоководных погружениях; ослабление НСВД при глубоководных спусках путем использования азота в составе трехкомпонентной смеси и снижения скорости компрессии. Физиологические аспекты стратегии формирования ДГС относятся к любым смесям, предназначенным для дыхания под водой или в барокамерах, а также для декомпрессии, лечебной рекомпрессии, к «смесевым» аппаратам с замкнутым циклом дыхания типа «ребризер».

Ключевые слова: водолазные погружения, дыхательные смеси, водолазная барокамера, плотность газовой смеси, кислород, гиперкапния, азотный наркоз, работоспособность

PHYSIOLOGICAL STRATEGY FOR THE FORMATION OF THE COMPOSITION OF DIVING BREATHING MIXTURES

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

On the basis of experimental data, the physiological aspects of the strategy for the formation of the composition of breathing gas mixtures (BGM), which are aimed at optimizing the functional state of the body under water and in diving pressure chambers, are discussed. As the main factors of the respiratory environment and their effects, which can be influenced with the help of BGM, are considered: density (increase in the work of breathing), oxygen (hypoxia and intoxication), inert gases (nitrogen narcosis and NSHP). These factors constitute the physiological basis of the BGM development strategy, which includes the main directions: reducing the density of BGM by replacing a relatively heavy inert component of the mixture with a lighter one, this reduces the load on the pulmonary breathing, improves the elimination of CO_2 from the body and maintains performance; maintaining the partial pressure of oxygen in the range of permissible values in order to avoid the development of oxygen deficiency or toxicity in any physiological conditions (rest, work) and in any environment (under water, pressure chamber), this supports the vital activity and work capacity of the diver; weakening nitrogen narcosis or its exclusion by limiting the depth of immersion using oxy-nitrogen mixtures or replacing nitrogen in the mixture with non-narcotic gases during deep-sea dives; attenuation of NSHP during deep-water descents by using nitrogen as part of a three-component mixture and reducing the compression rate. The physiological aspects of the strategy for the formation of BGM relate to any mixtures intended for breathing under water or in pressure chambers, as well as for decompression, therapeutic recompression, and "mixed" apparatuses with a closed breathing cycle of the "rebreather" type.

Keywords: diving descents, breathing mixtures, diving pressure chamber, gas mixture density, oxygen, hypercapnia, nitrogen narcosis, working capacity

Стратегия формирования состава дыхательных газовых смесей (ДГС) направлена на поддержание умственной и физической работоспособности водолаза, качественное решение поставленных производственных или научных задач под водой, безопасность и сохранение здоровья. При этом наибольшее значение имеют физиологические аспекты, от которых зависит функциональное состояние организма под водой и в водолазных барокамерах, управляемое посредством дыхательных газовых смесей.

Любые ДГС состоят из кислорода и инертных компонентов. Количественное соотношение этих газов в смесях зависит в основном от двух факторов, которые влияют на проявление их биологической активности – от рабочей глубины погружения и длительности пребывания и работы водолазов (акванавтов) в измененной гипербарической газовой среде. Поэтому принцип формирования состава ДГС сводится к нормированию кислорода и азота, так как в условиях повышенного давления кислород об-

ладает токсическим действием на организм водолаза при его избытке по парциальному давлению, азот – наркотическим [1]. Другие инертные газы, которые в настоящее время используются в водолазной практике (гелий) или в принципе могут использоваться (водород, неон) в составе водолазных ДГС, не проявляют наркотических свойств в диапазоне достигнутых человеком глубин, поэтому они включаются в состав ДГС как газы-разбавители (дилуэнты) кислорода и всегда занимают наибольшую долю в смеси.

Действие гипербарической среды на организм можно свести к действию нескольких физических и физиологических факторов, которые являются первичными источниками дискомфорта и опасностей, особенно на больших глубинах. Главные из них – плотность газовой среды (влияние на механику дыхания и дыхательный газообмен), кислород (кислородная недостаточность и интоксикация кислородом), биологическое действие инертных газов (гипербарический азотный наркоз и связанный с влиянием гелия нервный синдром высокого давления), обмен инертными газами между организмом и средой (компрессия и декомпрессия), теплообмен [2].

Все эти эффекты в равной степени относятся и к реальным спускам водолазов методом кратковременных погружений (КП) на глубину [3], и к насыщенным погружениям акванавтов в барокамерах методом длительного пребывания (ДП). В последнем случае большое значение имеет длительность и многократность воздействия этих факторов на организм, что может привести к перегрузке физиологических систем организма и неблагоприятным отдаленным последствиям [4].

Все водолазные дыхательные смеси направлены на поддержание оптимального дыхательного газообмена (потребление O_2 и выделение CO_2), работоспособности и приемлемого временного и безопасного режима компрессии и декомпрессии. Это возможно достичь в основном путем использования эффектов действия газов на организм и оптимизации их количественного соотношения в смеси, что и составляет физиологическую основу стратегии формирования состава дыхательных смесей. Кроме основных, используемых в водолазной практике инертных газов (азот и гелий), в состав ДГС могут включаться и более легкие и ненаркотичные газы – водород и неон. Водород имеет перспективу использования его на больших глубинах, но при решении проблемы пожаро-взрывобезопасности кислородно-водородных смесей и стоимо-

сти обеспечения погружений. благородный газ неон в основном в связи с его высокой стоимостью в составе водолазных ДГС на практике не используется, другие, более тяжелые инертные газы, такие как аргон, криптон и ксенон, не перспективны для использования по причине их высокой плотности и наркотического действия [5]. Неон применялся в научных целях для имитации больших глубин по фактору плотности. В России были проведены исследования на имитированных в береговом водолажном комплексе глубинах до 400 м с использованием дыхательных смесей на основе неона [6]. В этих экспериментальных погружениях физиологические исследования проводились при плотностях дыхательной смеси до 32,5 г/л, что во много раз превосходит плотность воздуха при нормальном давлении. Высокая плотность среды ограничивала возможности пребывания человека и выполнения физической работы в таких условиях. Эффект плотности до 20 г/л проявлялся в умеренном изменении биомеханики дыхания, газообмена, снижении показателей вентиляторной функции легких и физической работоспособности [7]. В исследованиях на животных (морские свинки) было показано [8], что гипоксия мозга появляется при очень высокой гипербарической плотности (77 г/л) кислородно-неоновой смеси с нормальным парциальным давлением кислорода (PO_2). Это многократно превышает плотность смеси без неона, при которой развивается гипоксия мозга. Важно, что это преимущество неона наблюдалось при большом повышении мозгового кровотока и уровня PO_2 в структурах головного мозга.

Все газы, которые могут использоваться для приготовления дыхательных смесей, обладают разными физическими свойствами, поэтому в различных количественных соотношениях они изменяют физические свойства смеси (прежде всего, плотность) и её биологическое действие на организм при повышении давления, что позволяет учитывать и использовать эти эффекты при формировании ДГС.

Целью данной работы является физиологическая оценка влияния физических и биологических свойств газовых смесей и их компонентов на организм для обоснования стратегии формирования адекватной для гипербарических условий дыхательной смеси, обеспечивающей рабочую эффективность и безопасность водолазных погружений.

Методы исследования – экспериментальные и теоретические. Анализ экспериментальных данных, полученных авто-

ром при погружениях водолазов методом КП на различные глубины и методом ДП с использованием имитационного моделирования глубин в барокамерах наземных глубоководных водолазных комплексов. Обобщение результатов многолетних научных исследований функционального состояния человека в условиях повышенного давления в барокамерах и под водой в обитаемых гипербарических системах (научные подводные лаборатории, подводные аппараты с водолазными отсеками). Исследования проводились в различных гипербарических условиях в покое и во время физических нагрузок при дыхании смесью на основе азота и гелия с регистрацией специфических для данной среды реакций и показателей дыхательной функции.

Исследования в барокамере и под водой показывают, что наиболее выраженным эффектом гипербарии является повышение плотности дыхательной смеси, которое при постоянной температуре прямо зависит от роста давления. Априори можно считать, что влияние повышенной плотности ДГС выражается в увеличении сопротивления дыханию и механической работы дыхания. Это связано с расходом энергии и отражается в повышении общего потребления кислорода. В барокамере – в среднем на 5–8% в условиях покоя в диапазоне относительных плотностей примерно до 5,0 и в зависимости от легочной вентиляции. Известно, что в нормальных условиях энерготраты на дыхание в покое не превышают 2–3% от общих энерготрат, выраженных в потреблении кислорода, а при тяжелой физической работе – 10–15% и более [9]. В условиях гипербарии эти величины должны возрастать в зависимости от плотности, режима дыхания и физической нагрузки. Очевидно, что прирост потребления кислорода в условиях гипербарии поглощается дыхательными мышцами для поддержания легочной вентиляции. То есть обеспечение

дыхательной мускулатуры кислородом находится для организма в приоритете, но такое перераспределение кислорода в пользу дыхания приведет к снижению работоспособности под влиянием плотности, которая повышается из-за увеличения давления или глубины погружения. Это должно происходить как в «сухих» условиях барокамеры, так и при работе в воде. В последнем случае влияние плотности и обусловленного им повышенного сопротивления и работы дыхания усугубляется влиянием самого водолазного дыхательного аппарата. Поэтому общее потребление кислорода при работе в воде может резко возрастать по сравнению с аналогичной работой в «сухих» условиях барокамеры. Это – влияние аппарата. Но не только. При работе в воде есть ряд и других причин повышения энергообмена, например градиенты гидростатического давления в зависимости от положения тела и конструкции дыхательного аппарата, а также сопротивление водной среды и амуниции водолаза. Эти факторы создают сопротивление не только дыханию, но и движениям водолаза. Повышенный кислородный запрос может возникать и в связи с изменением теплообмена при работе в воде при недостаточном обогреве водолаза, поскольку теплопроводность воды почти в 25 раз, а теплоемкость в 4 раза выше, чем воздуха в нормальных условиях. Для удовлетворения повышенных потребностей в энергии при работе под водой требуется и большее поступление кислорода в легкие водолаза. Это может обеспечить только вентиляторная функция легких и повышенное содержание кислорода в дыхательной смеси.

Возросшее сопротивление и работа дыхания под действием плотности приводят к снижению произвольной максимальной вентиляции легких (МВЛ) на 18–20% на глубинах при дыхании из аппарата даже с хорошими техническими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

МВЛ (л/мин, ВТПС) у водолазов (8 чел.) в барокамере под влиянием дыхательного аппарата и плотностей кислородно-азотно-гелиевых смесей с $PO_2 = 0,24$ кгс/см² при различных давлениях

Давление, кгс/см ²	Плотность ДГС относительно воздуха	Дыхание без аппарата	Дыхание из аппарата	% МВЛ от дыхания без аппарата
1 (воздух)	1	189,1 ± 20,1	157,5 ± 17,1	83
11	2,31	142,2 ± 13,8	115,3 ± 10,3	81
21	3,94	119,1 ± 15,8	97,6 ± 14,1	82
25	4,50	111,6 ± 8,2	90,4 ± 10,5	81
31	5,32	101,2 ± 12,3	81,1 ± 12,0	80

Таблица 2

Повышение $PACO_2$ (%) от величин при нормальном давлении у водолазов (8 чел.) в покое и во время работы в воде при дыхании из аппарата смесями равной плотности

Давление, кгс/см ²	Дыхательная смесь	Плотность ДГС относительно воздуха	PO_2 в ДГС, кгс/см ²	Покой	Работа 300 кгм/мин, 10 мин
31	O ₂ -He	4,93	0,69	11,3	13,1
5	O ₂ -N ₂	4,95	0,63	14,5	21,4

Это означает снижение резерва дыхания у водолазов, что отрицательно влияет на доставку кислорода в легкие при тяжелой работе и ограничивает работоспособность. Основные причины снижения МВЛ заключаются, вероятно, не только в трудности преодоления сопротивления дыханию в связи с плотностью ДГС, но и в коллапсе малых и средних бронхов в фазе выдоха. Считается, что это происходит вследствие образования разницы давлений между полостью бронхов и плевральным давлением при высокой легочной вентиляции, в том числе во время тяжелой работы. При этом, если водолаз и способен увеличить дыхательное усилие, его легочная вентиляция все равно не возрастает. Это его максимум на пониженном уровне, который, например, при дыхании их аппарата на имитируемой глубине 300 м составляет 43 % (81,1 л/мин) от величин в нормальных условиях (189,1 л/мин).

Легочная вентиляция во время физической работы снижается от уровня при нормальном давлении по мере увеличения нагрузки в условиях гипербарии. Это всегда сопровождается развитием гиперкапнии и респираторного ацидоза в организме, что указывает на недостаточную вентиляцию.

Парциальное давление CO_2 в альвеолярной смеси ($PACO_2$), которое определялось по PCO_2 в конечной порции выдыхаемого газа (end tidal – $PetCO_2$), повышается не только по причине снижения альвеолярной вентиляции под влиянием плотности, но и под действием азотного наркоза при дыхании O₂-N₂ смесью (табл. 2).

Из этой таблицы видно, что при равной плотности и меньшем давлении водной среды $PACO_2$ выше при действии наркотической ДГС на имитируемой в гидробарокамере глубине 40 м, где азотный наркоз проявлялся (по поведенческим реакциям и субъективным оценкам) у всех обследованных водолазов. Этому способствовало большее содержание азота в данной смеси по сравнению со сжатым воздухом. Но $PACO_2$ во всех случаях не превышало 50 мм рт. ст. Все эти изменения показателей дыхательной функции приводят к снижению физической работоспособности. Результаты наших

исследований дают основание считать, что основной физиологический критерий работоспособности в условиях нормобарии – максимальное потребление кислорода (МПК) – существенно не изменяется при давлениях в барокамере до 31 кгс/см², эквивалентных глубинам до 300 м. Уровень МПК достигается при сниженной в зависимости от величин плотности вентиляции легких за счет повышенного использования кислорода из 1 л легочной вентиляции. Можно с уверенностью полагать, что при этом доля потребления кислорода из общей величины МПК, направленная на обеспечение полезной работы, уменьшается из-за повышенного расхода кислорода на дыхание, в том числе благодаря подключению к работе дыхания дополнительных групп мышц. Так что истинная (эффективная для выполнения полезной работы) величина МПК в условиях гипербарии все-таки, вероятно, уменьшается, и это должно отражаться в еще большем снижении работоспособности при повышении плотности ДГС и работы дыхания с увеличением глубины погружения.

Маловероятно, что величина МПК сохранится также и в водной среде при тех же давлениях. Представляется очевидным, что и МВЛ, и МПК при дыхании из аппарата любого типа под водой на доступных глубинах под влиянием плотности ДГС и сопротивления воды должны быть меньше величин, регистрируемых в барокамере. При этом доля кислорода, направленная на обеспечение полезной работы, уменьшится за счет повышенного расхода кислорода на дыхание из-за плотности и преодоления других сопротивлений в водной среде. Увеличение содержания кислорода и, соответственно, PO_2 в дыхательной смеси будет не более чем компромиссным решением проблемы, так как это может привести к возникновению других сложностей, связанных с токсическим действием кислорода на организм и еще большим ограничением вентиляции легких в связи с дополнительным увеличением плотности дыхательной смеси при добавлении относительно тяжелого компонента-кислорода.

Рассмотренные эффекты влияния плотности на легочное дыхание и газообмен обосновывают необходимость её снижения при формировании ДГС. Это может быть достигнуто только за счет использования в основе состава смеси наиболее легких по сравнению с азотом инертных газов – неона, гелия, водорода или смеси этих газов в определенных соотношениях.

Парциальное давление кислорода в составе водолазных дыхательных смесей должно строго поддерживаться в пределах допустимых значений во избежание развития гипоксии или интоксикации кислородом [10]. Следовательно, стратегия формирования ДГС относительно кислорода направлена на исключение этих опасных факторов. Поэтому нормирование кислорода в искусственных газовых смесях направлено на решение важнейшей задачи – определение нижней границы PO_2 , которое обеспечивало бы потребности организма в кислороде в покое и при физической нагрузке и определение верхней границы PO_2 , которое не вызывало бы токсических проявлений у водолаза.

Имитационное моделирование погружений в барокамерах водолазных комплексов показало, что все основные факторы гипербарической дыхательной среды (давление, плотность, температура, влажность), воздействуя прямо или опосредованно на функции организма водолаза (дыхание, теплообмен и другие), создают условия для повышенного энергообмена и кислородного запроса в организме, особенно в водной среде. Поэтому PO_2 в дыхательных смесях, как правило, находится в диапазоне величин выше нормоксического уровня ($0,21 \text{ кгс/см}^2$), соответствующего нормальному давлению. Гипоксический уровень ДГС при этом не обсуждается, этого не должно быть. Любая водолазная ДГС не должна быть причиной развития гипоксии в организме, так же как и причиной кислородной интоксикации. К таким экстремальным медицинским ситуациям могут привести: несоблюдение установленных правил, аварийные ситуации, технические сбои в работе водолазного снаряжения, оборудования и некоторые другие факторы, не связанные с газовым составом смеси.

Реакции организма уже примерно на двукратно (относительно нормобарии) повышенное PO_2 независимо от уровня гипербарии появляются прежде всего в дыхательной системе. Снижение легочной вентиляции при кратковременных воздействиях такой гипероксии приводит к повышению PCO_2 в альвеолярной смеси и артериальной крови, которое и без того может

иметь место под влиянием повышенной плотности в барокамере. Но при длительном (многосуточном) воздействии в условиях гипербарии даже такая умеренная гипероксия (PO_2 немногим выше $0,40 \text{ кгс/см}^2$, что соответствует 40% кислорода в нормальных условиях) может приводить к появлению симптоматики кислородной интоксикации. В связи с этим общепринятый допустимый предел PO_2 для длительного воздействия в условиях повышенного давления не должен превышать этот уровень [9]. Но на практике допустимый предел PO_2 не применяется, а используются меньшие величины, соответственно действующим правилам и нормам.

Развитию токсического действия кислорода может способствовать, как известно, и задержка выведения CO_2 из организма. Независимо от причин развития нежелательных реакций организма на действие недостатка или избытка кислорода они должны учитываться при формировании состава ДГС. Но в любом случае диапазон допустимых величин PO_2 должен обеспечивать оптимальное физиологическое состояние водолаза для выполнения рабочих заданий под водой и в барокамере. Следует отметить, что токсические уровни чистого кислорода при спусках методом КП в зарубежных (США) и российских правилах несопоставимы. Американские требования (NOAA – Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы) ограничивают водолазные спуски при дыхании чистым кислородом 6 м ($PO_2 - 1,6 \text{ кгс/см}^2$), тогда как российские (Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ. ПОТ Р М-030-2007 и другие) допускают погружения до 20 м ($PO_2 - 3,0 \text{ кгс/см}^2$) с выполнением физической работы, которая, кстати, приводит к сокращению времени начала развития интоксикации. Однако на основании результатов исследований предлагается сохранить допустимую в России глубину 20 м при дыхании чистым кислородом, но ограничить экспозицию 10–15 минутами при любой степени физической нагрузки [11].

Не менее важным в общей физиологической стратегии формирования дыхательных смесей для водолазных погружений является сведение к минимуму влияния азота (азотный наркоз) и гелия (нервный синдром высокого давления – НСВД) на организм. Эти влияния проявляются в неврологических расстройствах при погружениях с использованием дыхательных смесей на основе этих газов.

Первые признаки азотного наркоза при дыхании сжатым воздухом появля-

ются обычно на глубинах порядка 30–35 м (давление 4–4,5 кгс/см²) с отклонениями в зависимости от индивидуальной предрасположенности к наркозу и проявляются (в барокамере) в легкой эйфории, беспричинной веселости, излишней разговорчивости. В целом реакции на азотный наркоз сравнимы с действием алкоголя. При возрастании глубины наркоз проявляется в изменении поведенческих реакций, нарушении умственной деятельности, усилении эйфории, появлении беспричинного смеха, ложного чувства безопасности и других, иногда опасных, реакциях. При декомпрессии водолаз быстро приходит в норму, но чаще всего не помнит, что с ним происходило на глубине. Такие проявления азотно-го наркоза являются одной из причин ограничения глубины погружения при дыхании сжатым воздухом и снижении парциального давления азота с увеличением глубины погружения при дыхании кислородно-азотно-гелиевыми смесями (тримикс).

Проявления нервного синдрома высокого давления возникают при дыхании кислородно-гелиевыми смесями в зоне больших глубин – примерно свыше 150 м. Это выражается в треморе рук, нарушении координации движений, ориентации в действиях и пространстве, появлении спутанности сознания, тошноты и других нежелательных реакций. Общеизвестно, что проявления НСВД зависят от величины давления и скорости компрессии (погружения). Многочисленные исследования в России и за рубежом и мировая практика водолазных погружений показали, что этот синдром достаточно эффективно ослабляется снижением скорости компрессии, дополнительными остановками при погружении и внесением в дыхательную смесь небольшого количества азота или водорода [12]. Поэтому, а также и по некоторым другим причинам, почти все дыхательные смеси, предназначенные для глубоководных водолазных спусков методами КП и ДП, имеют в своем составе азот. Исключение (согласно Правилам водолазной службы ВМФ (ПВС ВМФ-2002) составляют: смесь для спусков методом КП на глубины от 160 до 200 м и смесь для работы на грунте при выходе в воду из условий длительного пребывания в жилой барокамере глубоководного водолазного комплекса. В этих случаях отсутствие азота в смеси выражается в исключении азотного наркоза и в снижении плотности ДГС, что сводит к минимуму повышение сопротивления и работы дыхания при выполнении заданий под водой.

В принципе все проблемы, связанные с влиянием инертного газа на организм (наркоз, НСВД и декомпрессионные расстрой-

ства), могут быть решены путем перехода с дыхания газовой смесью на жидкостное. Эффект такого дыхания обусловлен тем, что в дыхательной жидкости не содержатся никакие инертные газы. В нашей лаборатории проводились исследования на лабораторных животных по этой проблеме. Было показано, что животные, по крайней мере в пределах одного часа, могут дышать оксигенированной жидкостью (перфторорганические соединения), которая в 1600 раз тяжелее воздуха при нормальном давлении [13]. Но этот способ дыхания может в будущем иметь перспективу, вероятно, только при спасении человека под водой и при решении некоторых экстраординарных задач на больших глубинах.

Все вышерассмотренные эффекты влияния основных физических и физиологических факторов на организм водолазов и акванавтов в условиях гипербарии (под водой или в барокамере) могут управляться воздействием дыхательной смеси того или иного состава. Это определяет физиологическую стратегию формирования ДГС, которая включает основные направления:

- снижение плотности ДГС путем замены относительно тяжелого инертного компонента смеси более легким, это приводит к понижению нагрузки на легочное дыхание и кардиореспираторную систему, повышает элиминацию CO₂ из организма и поддерживает работоспособность водолазов в условиях гипербарии;

- сохранение парциального давления кислорода в диапазоне допустимых величин во избежание развития кислородной недостаточности или токсичности при любых физиологических состояниях (покой, работа) и в любых условиях (барокамера, под водой), это поддерживает общее функциональное состояние организма, умственную и физическую работоспособность;

- минимизацию азотного наркоза или его исключение путем ограничения глубины погружения с использованием кислородно-азотных смесей или замены азота в смеси на ненаркотичные газы при глубоководных погружениях;

- ослабление НСВД при глубоководных спусках путем добавления азота в состав смеси, который в условиях гипербарии действует как физиологический антагонист гелия.

Главными в реализации этих направлений являются два аспекта: обоснованный газовый состав дыхательных смесей по диапазонам глубин и количественное соотношение компонентов смеси в зависимости от длительности пребывания в условиях гипербарии и работы под водой.

Заключение

С учетом рассмотренных влияний факторов гипербарии на функции организма главное в физиологической стратегии формирования водолазных ДГС заключается в снижении плотности дыхательных смесей. Это направлено на снижение сопротивления и работы дыхания, что поддерживает вентиляторную функцию легких и минимизирует её влияние как одного из главных факторов, лимитирующих работоспособность человека на глубине. При этом не менее важное значение имеют поддержание парциальных давлений кислорода и азота в ДГС в пределах допустимых величин, так как кислород вне этих пределов может вызвать или гипоксические, или гипероксические реакции вплоть до патологических, а азот – наркотические, опасные для водолаза. Поэтому при формировании водолазных ДГС следует учитывать влияние каждого компонента ДГС на данной глубине. При глубоководных погружениях, помимо влияния плотности, возможного токсического действия кислорода и азотного наркоза, важным является нервный синдром высокого давления, который «тормозит» погружение проявлением неблагоприятных и даже опасных реакций организма. Но в данном случае проблема решается не только с помощью дыхательной смеси, но и путем снижения скорости погружения и увеличения количества и длительности остановок в процессе спуска.

Физиологические аспекты стратегии формирования ДГС относятся к любым смесям для работы в условиях гипербарии в барокамерах водолазных комплексов и под водой. Развитие водолазных технологий тесно связано с разработкой эффективных, безопасных дыхательных смесей и методиками их использования. Это в первую очередь относится к «смесевым» аппаратам с замкнутой схемой дыхания типа «ребризер», которые отличаются возможностью изменения под водой газового состава ДГС, поддержания постоянного PO_2 на глубинах и другими преимуществами [14]. Активно развивается и технология водолазных спусков с использованием кислородно-азотных смесей на средних (до 60 м) глубинах. Изменяя соотношения этих компонентов в смеси, минимизируются проявления азотного наркоза, сокращается время декомпрессии или даже отпадает необходимость её проведения при определенных режимах

погружения, поддерживается работоспособность [15]. Все положительные эффекты дыхания искусственными ДГС позволяют расширить области их практического использования производственными и научными водолазами.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128-2021-0011).

Список литературы

1. Единые правила безопасности труда на водолазных работах. Ч. 2. Медицинское обеспечение водолазов. М.: Моркнига, 2021. 132 с.
2. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. Л.: Медицина, 1979. 320 с.
3. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Слово, 2013. 608 с.
4. Чумаков А.В. Длительное пребывание человека на предельных глубинах, взгляд на изменения функциональных систем акванавтов с позиции патофизиологии критических состояний // Клиническая патофизиология. 2016. Т. 22. № 4. С. 118–123.
5. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы оптимизации водолазных дыхательных газовых смесей // Нептун. Водолазный проект. 2014. № 5. С. 74–79.
6. Гусейнов Т.Ю., Семенов В.Н. Забытый мировой рекорд // Нептун. Водолазный проект. 2012. № 1. С. 88–97.
7. Суворов А.В. Дыхание и газообмен человека в условиях высокой плотности газовой среды: 14.00.13: автореф. дис. ... докт. мед. наук. Москва, 1998. 44 с.
8. Аточин Д.Н. Оксигенация и кровоснабжение головного мозга животных при дыхании газовыми смесями высокой плотности: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 1992. 22 с.
9. Кисляков Ю.Я., Бреслав И.С. Дыхание, динамика газов и работоспособность при гипербарии. Л.: Наука, 1988. 237 с.
10. Яхонтов Б.О. Физиологические аспекты обеспечения жизнедеятельности водолазов при повышенном давлении в барокамере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 6. С. 135–139.
11. Бакланов Д.В. Особенности патогенеза острого кислородного отравления у водолазов и подводников: дис. ... канд. мед. наук. Санкт-Петербург, 2015. 132 с.
12. High-pressure nervous syndrome Нервный синдром высокого давления [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/High-pressure_nervous_syndrome (дата обращения: 22.07.2021).
13. Яхонтов Б.О. Физиологические факторы, лимитирующие глубину водолазных погружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 7. С. 23–30.
14. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски в автономном режиме. Перспективы развития // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 518–527.
15. Яхонтов Б.О. Водолазные методы океанологических исследований // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 491–497.