

## ОБЗОРЫ

УДК 626.02(574.2)

**ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ,  
ЛИМИТИРУЮЩИЕ ГЛУБИНУ ВОДОЛАЗНЫХ ПОГРУЖЕНИЙ****Яхонтов Б.О.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: giper28@ocean.ru*

Обсуждаются основные факторы, которые являются «физиологическими барьерами», препятствующими погружению на большие глубины: давление *per se*, плотность дыхательной газовой среды (ДГС), нервный синдром высокого давления (НСВД). Анализ проблемы показал, что в диапазоне давлений, где эффект сжатия биологических структур незаметен, глубину погружения лимитирует не давление, а факторы, обусловленные влиянием этого давления на измененную ДГС. Но действие этих факторов купируется газовым составом и режимами погружений. На больших глубинах допустимый предел давления должен ограничиваться величиной, ниже которой отсутствует практически значимое объемное сжатие жидких сред и тканей организма. Это приблизительно 100 кгс/см<sup>2</sup> (1000 м). Факты дыхания человека и животных в условиях чрезвычайно больших величин плотности убеждают, что непреодолимой плотности в большом диапазоне глубин для человека нет. Водолаз мог бы дышать газовой смесью на основе гелия или водорода-гелия-азота при плотностях, соответствующих глубинам примерно 2000 м. Однако погружения на такие глубины, вероятно, невозможны в связи с отрицательными эффектами давления. Предел глубины, обусловленный НСВД, не установлен. Но поскольку этиология этого синдрома в большой степени связана с эффектами давления, НСВД может стать серьезным фактором, лимитирующим глубину. Реальный предел по глубине для водолаза определяется не только давлением и НСВД, но и социально-экономическими причинами, связанными с высоким риском и стоимостью обеспечения погружений. Но даже при решении этих проблем эффективность водолазных погружений на сверхбольшие глубины невысока в связи с неприемлемой длительностью компрессии и декомпрессии.

**Ключевые слова:** глубоководные погружения, высокое давление, плотность газовой среды, дыхание, физическая работоспособность, нервный синдром высокого давления, теплообмен

**PHYSIOLOGICAL FACTORS LIMITING THE DEPTH OF IMMERSION OF DIVERS****Yakhontov B.O.***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: giper28@ocean.ru*

The main factors which are «physiological barriers» that impede immersion to great depths: pressure *per se*, the density of the breathing gas environment (BGE), the high pressure nervous syndrome (HPNS), are discussed. The analysis of the problem showed that in the pressure range, where the effect of compression of biological structures is invisible, the depth of immersion is limited not by pressure, but by factors due to the influence of this pressure on the changed BGE. But the effect of these factors is stopped by the gas composition and diving modes. At great depths, the permissible pressure limit should be limited to a value below which there is no practically significant volumetric compression of liquid media and tissues of the body. This is approximately 100 kgf/cm<sup>2</sup> (1000 m). The facts of human and animal respiration in conditions of extremely high densities convince us that there is no insurmountable density in a large range of depths for humans. The diver could breathe a gas mixture based on helium or hydrogen-helium-nitrogen at densities corresponding to depths of about 2000 m. However, diving to such depths is probably impossible due to the negative effects of pressure. The depth limit due to the HPNS has not been established. But since the etiology of this syndrome is largely related to the effects of pressure, HPNS can be a serious factor limiting the depth. The actual depth limit for a diver is determined not only by pressure and HPNS, but also by socio-economic reasons related to the high risk and cost of providing dives. But even when solving these problems, the efficiency of diving to very large depths is low due to the unacceptable duration of compression and decompression.

**Keywords:** deep-sea diving, high pressure, density of the gaseous medium, breathing, physical performance, high pressure nervous syndrome, heat exchange

Физиологические проблемы глубоководных водолазных погружений связаны с воздействием на организм двух главных факторов: давления и искусственной дыхательной газовой среды (ДГС). Под их влиянием возникают «физиологические барьеры» проблемного уровня, которые человек должен преодолевать, поскольку они препятствуют погружению на большие глубины. Это – давление *per se*, плотность дыхательной газовой среды, нервный синдром высокого давления (НСВД), теплообмен организма со средой, обмен инертными

газами между организмом и средой при компрессии и декомпрессии [1]. С таким комплексом воздействий на организм человек в своей обыденной жизни никогда не встречается. К действию высокого давления организм может быть устойчив, вероятно, в пределах проявления эффектов давления – изменения объемов биологических жидкостей и тканей, что не должно быть безразличным для организма. Адаптация к измененной газовой среде в условиях гипербарии возможна за счет компенсаторных физиологических реакций, которые также

имеют ограничения. Но каковы эти пределы относительно человека, неизвестно. И стоит ли стремиться к достижению предельных глубин при развивающихся эффективных технологиях подводных наблюдений, исследований и работ с использованием глубоководных обитаемых аппаратов с нормальным давлением [2, 3], нормобарических жестких скафандров [4], необитаемых (телеуправляемых) подводных аппаратов и роботов [5, 6], которые способны работать на недоступных водолазу глубинах, но не могут в полной мере его заменить. Очевидно, что водолаз работать на предельной для него глубине не должен, но знать этот предел необходимо для установления предельно допустимой, то есть относительно безопасной, глубины.

Конечно, при погружениях достичь полной безопасности невозможно, доля риска есть всегда. Гипербарическая среда, особенно водная, по понятным причинам является враждебной для человека, что требует сведения к минимуму действия на организм комплекса опасных и вредных факторов, обусловленных повышенным давлением дыхательной смеси, водной иммерсией и водолазным снаряжением. Поэтому любые работы под водой в России законодательно отнесены к категории опасных, вредных и тяжелых видов труда [7]. При наличии допустимой степени риска должен быть и компромисс между этим риском и целесообразностью, эффективностью использования водолазных методов работы под водой независимо от целей погружений. Потребности и вековая практика выполнения подводно-технических работ водолазами это подтверждают. При погружениях в научных целях это было показано работами специалистов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН начиная с 1960-х гг. [8–10]. Но это в пределах освоенных глубин, хотя потребности эффективной работы возрастают и на много больших глубинах.

Принципы построения методов и технологий водолазных погружений, особенно глубоководных, являются исключительно физиологическими, потому что они неизбежно связаны с воздействием на организм человека большого количества экстремальных факторов гипербарической дыхательной среды и ответными, специфическими для данных условий, реакциями организма [11]. Глубоководные спуски могут выполняться двумя методами: ограниченно по глубине – метод кратковременных погружений (КП), на любых доступных глубинах – метод длительного пребывания (ДП) под повышенным давлением [12].

Цель данной работы: на основе анализа эффектов действия гипербарической газовой и водной среды обосновать роль основных факторов в лимитировании глубины погружений водолазов и их работоспособности, дать прогноз допустимого предела глубины погружения с сохранением относительно нормальной жизнедеятельности.

В работе использованы основные отечественные и зарубежные литературные материалы, собственные экспериментальные данные автора и сотрудников, полученные при моделировании водолазных погружений в барокамерах наземных глубоководных водолазных комплексов (ГВК) на различные глубины с участием водолазов.

Анализ данных по проблеме показывает, что один из физиологических барьеров глубоководных погружений – давление *per se* – в диапазоне достигнутых человеком глубин (701 м в барокамере, 1992 г., Франция, фирма Comex – мировое достижение [13]) видимых препятствий погружению не создает, потому что это уже демонстрирует сам факт достижения данной глубины, которая выражается давлением в метрах водного столба. Но препятствует ли при этом само давление погружению по каким-то биофизическим и биохимическим параметрам, не известно. Механическое действие на организм давления не ощущается, если водолаз находится в газовой среде барокамеры. Это объясняется равномерностью распределения давления по всей поверхности тела, сбалансированностью внутреннего и наружного давления и несжимаемостью воды, из которой в основном состоят ткани организма. В водной среде гидростатическое давление на тело человека распределяется неравномерно. Разница давления на верхние и нижние участки тела при вертикальном положении человека приводит к перераспределению, отжатию, крови и лимфы по направлению снизу вверх. При работе водолаза в воде эффект разницы гидростатического давления выражается неприятным обжимом нижних частей тела водолаза при сжатии газовой прослойки в вентилируемом снаряжении или гидрокомбинезоне «сухого» типа. Но это не связано с абсолютным давлением на глубине.

Вероятно, что в пределах нескольких сотен метров, доступных водолазу для работы, погружению препятствует не само механическое давление, а факторы, обусловленные влиянием давления на измененную дыхательную газовую среду. Важно, что отрицательное действие этих факторов может купироваться изменением газового состава ДГС по инертному компоненту и режимами погружений. Однако это может быть лишь

до определенной глубины, когда эффект сжатия биологических структур давлением незаметен. Это ограничено диапазоном давлений при погружениях 100–150 кгс/см<sup>2</sup>, при котором твердые образования (кости) и жидкие среды организма (кровь, лимфа, тканевая жидкость) практически несжимаемы [14]. По мере увеличения глубины погружения давление оказывает все более сильное воздействие на организм. Поскольку вода все-таки не является абсолютно несжимаемой (в Марианской впадине на глубине 11000 м вода сжата примерно на 4%), воздействие высокого давления приводит к изменению межмолекулярных взаимодействий, конформационным изменениям, сжатию биологических жидкостей организма и тканей (изменению объема), деформации мембран клеток, а также нарушению метаболизма клеток и тканей [15]. В целом высокое давление является повреждающим фактором для живых клеток, что, в частности, выражается в нарушении биосинтеза белка и других клеточных биохимических и молекулярных процессов [16] и не может не сказаться на их функциональном состоянии. Но более чем сомнительно, что человек сможет приблизиться к глубинам, при которых в тканях организма под влиянием давления начнутся биофизические, биохимические и физико-химические изменения, выходящие за компенсаторные и приспособительные возможности организма. Это слишком большие величины давления, которые выражаются сотнями, а то и тысячами атмосфер. С другой стороны, имеются данные [17], согласно которым уменьшение объема ткани организма при давлении 100 кгс/см<sup>2</sup>, соответствующем глубине 1000 м, не превысит 1% с учетом сжимаемости тканей 10<sup>-4</sup> см<sup>2</sup>/кгс. Это может частично компенсироваться в соответствии с принципом Ле-Шателье увеличением объема за счет растворенного инертного компонента дыхательной смеси и повышения температуры. Есть ли такая компенсация в реальных условиях погружения на 1000 м, неизвестно. Но 1% сжатие ткани вряд ли следует считать ничтожно малым. Уменьшение под влиянием давления объема жидкой среды на 0,01 в живых системах – это немало. В жидкости молекулы и так находятся в «тесном строю», поэтому сжатие давлением может привести к их, хотя и весьма незначительной для 100 атмосфер, деформации и опосредованным влиянием на функции организма. Последнее может, в частности, выражаться нарушением у животных нормального электрического режима сердца и быть одной из причин развития гипербарической брадикардии под влияни-

ем гидростатического давления на синусовый узел сердца [18].

Безотносительно эффектов давления и компенсаторных механизмов были получены факты пребывания людей в барокамере под давлением, эквивалентным глубине 500 м (Россия), 686 м (США), 701 м (Франция), приматов – 1000 м (Россия и другие страны), мелких животных – 1500–2000 м (Россия и другие страны). Но являются ли эти факты обнадеживающими для практического освоения таких глубин и означают ли они возможность поддержания функционального состояния организма на достаточном для жизнедеятельности уровне и отсутствие их влияния на отдаленные последствия?

По оптимистичным прогнозам специалистов в области физиологии гидростатического давления [19] достигнутое человеком давление 70 кгс/см<sup>2</sup>, безусловно, меньше безопасного физиологического предела, глубина погружения человека может составить 2000 м (200 кгс/см<sup>2</sup>). В целостном организме некоторые первичные молекулярные возмущения, вероятно, компенсируются и не вызывают неблагоприятных проявлений действия давления, хотя другие эффекты могут усиливаться и препятствовать преодолению давления. Однако следует учитывать, что этот прогноз был сделан порядка сорока лет назад на основе результатов фундаментальных исследований и без учета одновременного влияния на организм других, кроме давления, факторов. А такой подход к проблеме прикладного смысла не имеет. От действия плотности, парциальных давлений газовых компонентов в смеси и других физических и физиологических факторов уйти невозможно. А ведь именно от них зависит жизнедеятельность и работоспособность человека, которая определяет эффективность и вообще целесообразность спусков на различные глубины [20].

Таким образом, допустимый, но сомнительно, что вполне безопасный, физиологический предел давления *per se*, или глубины погружения водолаза, может составить свыше 70 кгс/см<sup>2</sup> (700 м), потому что эта величина, хотя и в эксперименте, уже достигнута. Но более точно указать предел невозможно, пока не будет доказательств значимого для организма человека влияния давления в большем диапазоне глубин. На данном этапе развития проблемы можно предположить, что поскольку эффект давления может проявляться только через изменение молекулярного объема [19], допустимый предел давления должен ограничиваться величиной, ниже которой этого не происходит, то есть отсутствует практиче-

ски значимое объемное сжатие жидких сред и тканей организма. Это приблизительно, как упоминалось выше, порядка 100 кгс/см<sup>2</sup> (1000 м). Но по некоторым данным, полученным на эритроцитах крови человека *in vitro* [21], и такое давление смещает кривую диссоциации оксигемоглобина влево, что означает повышение сродства гемоглобина к кислороду, причем в зависимости от природы инертного газа (с азотом больше, чем с гелием). Это может быть одной из важных причин недостаточного снабжения тканей кислородом под влиянием высокого давления, но значение этого эффекта для практики переоценивать не стоит. В организме человека подтверждения этому *in vivo* нет. В противном случае PO<sub>2</sub> могло бы стать фактором, лимитирующим глубину погружения, потому что для поддержания обеспечения тканей организма кислородом потребовалось бы повышение его парциального давления в дыхательной газовой среде, но это допустимо только в пределах его токсической величины [22].

Кроме давления, глубину погружения могут ограничивать и другие гипербарические и физиологические факторы, обусловленные давлением и газовым составом.

Действие наиболее выраженного гипербарического фактора плотности газовой среды, которая зависит от давления, приводит к изменению дыхательной функции организма (механика дыхания, альвеолярно-артериальный газообмен), что отражается на доставке и потреблении кислорода, выведении CO<sub>2</sub> из организма [23]. Наибольшие сдвиги в функции внешнего дыхания и газообмена происходят при физических нагрузках. Это сказывается на физической работоспособности.

Экспериментально установлено, что при повышении плотности дыхательной среды сопротивление дыханию возрастает, но не прямо пропорционально, а в меньшей зависимости от плотности, что связано с изменением режима дыхания. При этом потребление кислорода увеличивается. Это дополнительное потребление кислорода направлено в основном на обеспечение усиленной работы дыхательной мускулатуры [23]. При тяжелой физической нагрузке это может привести к перераспределению дополнительно потребляемого кислорода почти целиком в пользу обеспечения вентиляции легких, уменьшению его доставки для обеспечения полезной работы и снижению физической работоспособности. Однако на осваиваемых человеком глубинах энергетических пределов для вентиляции нет. В материалах пятого международного симпозиума по подводной физиологии

1976 г. в США были представлены результаты исследований К. Ламбертсена (С. Lambertsen), который пришел к выводу, что, несмотря на большое снижение максимальных дыхательных потоков при плотностях до 25 г/л, при дыхании кислородно-неоновой смесью под давлением 37 кгс/см<sup>2</sup>, не должно быть ограничений вентиляторной функции человека, которые препятствовали бы погружению на 1520 м с использованием для дыхания кислородно-гелиевой смеси и на 3040 м – кислородно-водородной смеси.

Уникальные эксперименты в барокамере [24] при еще больших величинах плотности кислородно-неоновой дыхательной среды (32,5 г/л при давлении 41 кгс/см<sup>2</sup>), в 27 раз превышающей плотность воздуха при нормальном давлении, показали, что человек и в таких условиях способен дышать и даже сохраняет возможности для выполнения легкой физической работы. А такая плотность, по расчетам автора, эквивалентна глубине примерно 2000 м при дыхании кислородно-азотно-водородно-гелиевой смесью. При меньших величинах плотностей (7–20 г/л) человек выполнял работу средней тяжести, что позволило бы погружаться на глубины до 1000 м при дыхании кислородно-азотно-гелиевой смесью. Показана также возможность выполнения работы предельной тяжести в газовой среде с плотностью до 10 г/л при сохранении уровня максимального потребления кислорода (МПК), что является наиболее надежным критерием физической работоспособности. Аналогичные результаты были ранее получены и нами при тестировании работоспособности в барокамере по максимальному потреблению кислорода на имитированных глубинах 100 и 200 м. Сохранение МПК на исходном уровне достигается, несмотря на 20–25-процентное снижение легочной вентиляции, за счет повышения использования кислорода из вдыхаемой смеси. Это указывает, по крайней мере, на сохранение эффективности газообмена в условиях гипербарии до 21 кгс/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что физическая работа в основном средней тяжести и тяжелая в условиях повышенной плотности почти всегда выполняется на фоне сниженной вентиляции легких и повышенного парциального давления CO<sub>2</sub> в альвеолярном газе и в артериальной крови. Причем вентиляция в абсолютных величинах снижается тем больше, чем тяжелее физическая нагрузка. Причина этого, возможно, связана с утомлением дыхательной мускулатуры из-за повышенного сопротивления и работы дыхания. Одной из причин является и сжатие дыхательных путей на

выдохе (бронхиальный коллапс) на уровне субсегментарных отделов бронхов при вентиляции во время работы. Это происходит вследствие образования при повышенной плотности разницы давлений внутри и снаружи бронхов [23]. В результате усугубляется и без того отрицательный эффект повышенного сопротивления дыханию, обусловленный плотностью.

Фактор плотности дыхательной среды не только увеличивает нагрузку на дыхание, но и оказывает опосредованное влияние на деятельность сердечно-сосудистой системы и функцию кровообращения. Нами установлено, что минутный объем кровообращения (МОК) при плотностях кислородно-азотно-гелиевых смесей до 6,4 г/л при дыхании в барокамере на имитированных глубинах до 300 м (31 кгс/см<sup>2</sup>) в покое практически не изменяется. Во время физических нагрузок до 900 кгм/мин МОК увеличивается на 10–20% за счет увеличения ударного объема крови [23]. Этим поддерживается уровень потребления кислорода во время физической работы при повышенной плотности, но за счет большей нагрузки на сердце. Можно считать, что значение МОК, как фактора лимитирующего потребление кислорода, в частности МПК, в условиях гипербарии сохраняется или даже повышается.

В условиях высокой плотности (32,7 г/л при давлении 41 кгс/см<sup>2</sup> в кислороднеонеоновой среде) выявлен важный феномен – осцилляции дыхательных потоков в бронхах на фоне снижения скоростей форсированного дыхания [25]. Эти осцилляции соответствуют частотам физиологического тремора. Осцилляторный режим дыхания в таких условиях является более выгодным, поскольку помогает поддерживать уровень легочного газообмена за счет лучшего смешивания газов в альвеолах и меньшего расхода энергии на дыхание.

Повышенная плотность газовой смеси оказывает влияние на скорость диффузии в ней газовых компонентов, что, казалось бы, должно иметь определенное значение для газообмена через альвеоларно-капиллярную мембрану. С увеличением плотности диффузия в соответствии с законом Грэма должна замедляться и приводить к нарушению газообмена на больших глубинах. Однако наши и другие исследования, проведенные при различных давлениях в барокамере и плотностях ДГС, эти предположения не подтвердили. Человек способен выполнять работу средней тяжести и тяжелую в большом диапазоне глубин при дыхании смесями с парциальным давлением кислорода (PO<sub>2</sub>), близким к нормальному. В таких условиях PO<sub>2</sub> в артериальной

крови находится в зависимости от PO<sub>2</sub> во вдыхаемой смеси. Умеренное снижение легочной вентиляции при повышенной плотности не влечет за собой существенного нарушения кислородного режима организма. Но это приводит к задержке удаления CO<sub>2</sub>, хотя уровни гиперкапнии при этом для организма не критичны.

Наглядно демонстрируют возможность дыхания средой экстремально высокой плотности эксперименты с жидкостным дыханием животных. В нашей лаборатории было показано (А.В. Уваров), что лабораторные животные (кошки) способны в течение часа дышать жидкостью (перфторорганические соединения) с PO<sub>2</sub> в среднем 562 мм рт. ст., плотность которой в 1600 раз выше плотности воздуха. При этом вентиляция легких постепенно снижалась и к 60-й минуте дыхания снижение доходило до 70%, что свидетельствует об утомлении дыхательной мускулатуры и приводит к большим сдвигам в альвеоларно-артериальном газообмене – гиперкапния и неявно выраженная гипоксемия. Но сам факт преодоления такой плотности не вызывает сомнений.

Все эти экспериментально выявленные эффекты плотности опровергают мнение некоторых авторов, что плотность дыхательной среды устанавливает предел по глубине погружения [26]. Непреодолимой плотности в реально доступном диапазоне глубин для человека нет. Он, как было показано выше, мог бы дышать, по крайней мере в покое и при легкой работе, газовой смесью на основе водорода-гелия-азота при плотностях, имитирующих глубины до 2000 м, на основе водорода – до 4000 м.

Одним из важнейших физиологических барьеров, который может препятствовать достижению больших глубин, является комплекс неврологических расстройств, или нервный синдром высокого давления (НСВД) [17]. Эти расстройства у человека могут проявляться как при кратковременных погружениях, так и при погружениях методом ДП. Они становятся явными, начиная с глубин 100–200 м, и небезопасными на глубинах 250–300 м и более при дыхании кислородно-гелиевыми смесями. Такие смеси, кстати, в настоящее время при глубоководных погружениях редко применяются, за исключением КП в ограниченном диапазоне глубин (в России от 160 до 200 м) и выхода в воду для работы из условий ДП в барокамере водолазного комплекса. Клинически эти явления выражаются в появлении ряда признаков, прежде всего: тремор (дрожание рук, наиболее заметно в кистях), нарушение мышечной координации, сонли-

вость с возможными периодами микросна, снижение внимания, нарушение равновесия, головокружение, тошнота, спутанность сознания и другие проявления. Эти признаки определяются в большей степени режимом компрессии, чем увеличением глубины погружения. Признаки НСВД проявляются не только при действии давления кислородно-гелиевой среды, но и при использовании смесей на основе водорода, неона и других газов, и даже при жидкостном дыхании у животных. Различия имеются лишь в пороговых величинах давления, при которых эти признаки проявляются.

Большое значение имеет зависимость появления и тяжести НСВД от скорости и профиля компрессии. С увеличением глубины спуска необходимо все большее снижение скорости компрессии с выдержками на остановках. Это дает эффект, но за счет больших затрат времени. Однако для спусков на глубину 300 м в России разработана методика быстрой компрессии, за 30–40 мин, в отличие от многочасовой при спусках на большие глубины. Эта методика основана на подборе состава ДГС и его изменения при компрессии, что позволяет избежать проявления у водолазов НСВД в этом диапазоне глубин [27].

Для купирования НСВД в кислородно-гелиевую смесь добавляется азот, который является наркотичным газом и антагонистом гелия в условиях высокого давления. Не вдаваясь в детали имитированного погружения с использованием такой смеси, отметим, что в США глубины 650 и 686 м были достигнуты (Дьюкский университет, 1981 г.) при содержании в смеси 10% азота, что, конечно, существенно повышает плотность ДГС. Но в таких условиях выраженных признаков НСВД не наблюдалось, испытуемые могли выполнять даже тяжелую работу (240 Вт, или 1440 кгм/мин) на велоэргометре. Но это не означает, что профилактика НСВД может ограничиться азотом. Перспективу имеют и другие газы, и фармакологические препараты с анестетическими свойствами.

В отличие от физиологического барьера, связанного с плотностью, которая, как было показано выше, преодолевается человеком в большом диапазоне глубин, предел глубины, определяемый нервным синдромом высокого давления, для человека неизвестен. И хотя симптоматика НСВД у человека и животных мало чем отличается, у животных при давлениях 70–100 кгс/см<sup>2</sup> наблюдаются судороги и конвульсии, чего у человека не выявлено. Но он и не погружался на глубины, соответствующие этому диапазону давлений. Предполагается, что

этиология этого синдрома в большой степени связана с давлением *per se*. Если это так, то НСВД может стать серьезным фактором, лимитирующим глубину погружения. Но этот предел, вероятно, может быть отодвинут, поскольку НСВД поддается купированию вышеупомянутыми методами, включая и выбраковывание водолазов, более подверженных неврологическим расстройствам при глубоководных погружениях.

Не менее важной проблемой для глубоководных погружений является теплообмен человека в газовой и водной средах. Это связано с тем, что в первом случае с повышением давления комфортная температура среды закономерно повышается, приближаясь к температуре тела, а зона температурного комфорта сужается [23, 28]. В водной среде высокая теплопроводность гелия, как основного компонента дыхательной смеси, является причиной того, что уже на глубинах порядка 200 м потеря тепла водолазом близка к его продукции при метаболизме. Для компенсации больших теплотерь необходимы системы искусственного обогрева водолаза. Но даже при их использовании на больших глубинах теплотери через дыхательный тракт при работе в воде столь велики, что поддержание теплового баланса путем обогрева только поверхности тела недостаточно, требуется еще и обогрев дыхательной смеси. Но это уже техническая проблема, которая, можно считать, решена и серьезным барьером для погружений в настоящее время не является. Созданы эффективные системы жизнеобеспечения водолазов для глубоководных водолазных комплексов, водолазное снаряжение (дыхательные аппараты и гидрокомбинезоны с системами обогрева), обеспечивающие соблюдение физиолого-гигиенических требований в части поддержания теплового баланса при глубоководных погружениях.

Проблема обмена инертными газами между организмом и дыхательной средой при компрессии и декомпрессии – это проблема выхода с глубины на поверхность с минимальными рисками. Поэтому она прямо не относится к физиологическим барьерам погружений, хотя без её решения никакие глубоководные водолазные спуски невозможны.

### Заключение

Основные факторы, которые являются «физиологическими барьерами», устанавливающими предельную глубину погружения – это давление *per se* и нервный синдром высокого давления. Допустимый предел давления должен ограничиваться величиной, ниже которой отсутствует прак-

тически значимое объемное сжатие жидких сред и тканей организма. Это приблизительно на уровне 100 кгс/см<sup>2</sup> (1000 м).

В диапазоне меньших глубин, когда эффект сжатия биологических структур давлением незаметен, погружение лимитируется факторами, обусловленными влиянием этого давления на измененную дыхательную газовую среду. Но действие этих факторов купируется режимами погружений, газовым составом ДГС, тепловыми режимами.

Экспериментальные факты дыхания человека и животных в условиях чрезвычайно больших величин плотности убеждают, что непреодолимой плотности в реально доступном диапазоне глубин для человека нет. Он мог бы дышать газовой смесью на основе гелия или водорода-гелия-азота при плотностях, соответствующих глубинам примерно до 2000 м, на основе водорода – до 4000 м. Однако погружения человека на такие глубины, наверное, невозможны, и прежде всего в связи с отрицательными влияниями давления.

Предел глубины, обусловленный НСВД, не установлен, так как этот физиологический барьер преодолевался в диапазоне достигнутых человеком глубин. Но если этиология этого синдрома связана с эффектами давления, то НСВД может стать серьезным фактором, лимитирующим глубину погружения. В любом случае предел глубины должен устанавливаться по наименьшей глубине, на которой начинают проявляться отрицательные эффекты какого-либо действующего на организм фактора.

Реальный предел по глубине для погружений человека будет определяться не только давлением и НСВД, но и социально-экономическими причинами, связанными с высоким риском и стоимостью обеспечения погружений методом длительного пребывания под повышенным давлением. Эффективность погружений на сверхбольшие глубины (1000 м и более) в любом случае невысока в связи с длительностью компрессии и особенно декомпрессии (в среднем порядка 3 сут на каждые 100 метров). Если бы даже давление и НСВД не препятствовали бы погружению на глубины 1000 и 2000 м, длительность только декомпрессии с таких глубин составила бы примерно 30 и 60 сут, что вряд ли приемлемо для водолазной практики.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2019-0012).*

#### Список литературы

1. Яхонтов Б.О. Эффекты действия факторов гипербарической среды на организм водолаза // Современные мето-

ды и средства океанологических исследований: материалы XIII международной научно-практической конференции «МСОИ-2013». М.: ООО АПР, 2013. Т. 2. С. 146–149.

2. Сагалевич А.М. Опыт использования глубоководных обитаемых аппаратов в научных и прикладных целях // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана / Гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2011. С. 64–91.

3. Королев А.Б. Штурм гидрокосмоса. М.: printLETO (ООО «Лето Индастриз»), 2011. 192 с.

4. Гайкович Б.А. Подводно-технические работы с применением жестких водолазных скафандров // Освоение морских глубин / Гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2018. С. 426–428.

5. Римский-Корсаков Н.А. Создание и эксплуатация подводных аппаратов и других технических средств для океанологических исследований // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана / Гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2011. С. 46–63.

6. Ёлкин А.В., Комаров В.С., Розман Б.Я. Телеуправляемые подводные аппараты-роботы «ГНОМ» // Освоение морских глубин / Гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2018. С. 332–336.

7. Водолазно-медицинские и санитарно-гигиенические характеристики условий труда работников, занятых производством работ под водой. Текст правового акта по состоянию на август 2012 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://7law.info/russia/law2e/n175.htm> (дата обращения: 10.06.2019).

8. Айбулатов Н.А. Океанологические исследования из обитаемых подводных лабораторий // Океанология. 1972. Т. 12. № 1. С. 144–154.

9. Яхонтов Б.О., Римский-Корсаков Н.А. Развитие гипербарических технологий океанологических исследований // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 167–171.

10. Яхонтов Б.О. Оценка эффективности водолазных технологий изучения океана // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10–1. С. 111–115.

11. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы построения технологий водолазных погружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 12–1. С. 132–136.

12. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски методом кратковременных погружений // Наука и транспорт. 2011. Спец. вып. 2011. С. 36–39.

13. Кочергина И.Н., Соколов Г.М. COMEX на пороге 50-летия // Нептун. Водолазный проект. 2010. № 4. С. 24–35.

14. Chouteau J., Corriol J.H. Physiological aspects of deep sea diving. Reprinted from Endeavour. 1971. vol. 30. no. 110. P. 7–76.

15. Довгуша В.В. Дискуссионные вопросы действия индифферентных газов на организм. СПб.: Пресс-Сервис, 2011. 116 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://vit-dovgusha.ru/diskussionnie-voprosi> (дата обращения: 10.06.2019).

16. Медведев К.Е. Компьютерное исследование влияния высокого давления и температуры на структуру и функцию РНК-связывающего белка семейства npr7 архей: дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2014. 211 с.

17. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. Л.: Медицина, 1979. 319 с.

18. Lundgren C.E.G., Ornhagen H.C. Heart rate and respiratory frequency in hydrostatically compressed liquid breathing mice. Undersea Biomedical Research. 1976. no. 3. P. 303–320.

19. MacDonald A.G. Hydrostatic pressure physiology. In: The Physiology and Medicine of diving. Third Edition. Edited by P.V. Bennett and D.H. Elliott. Bailliere Tindal. London. 1982. P. 157–188.

20. Яхонтов Б.О. Как влияют давление и плотность дыхательной среды на организм водолаза // Нептун. Водолазный проект. 2010. № 4. С. 74–78.

21. Kiesow L.A. Hyperbaric inert gases and the hemoglobin-oxygen equilibrium in red blood cells. *Undersea Biomedical Research*. 1974. vol. 1. no. 1. P. 29–43.
22. Яхонтов Б.О. Физиологические принципы оптимизации водолазных дыхательных газовых смесей // *Нептун. Водолазный проект*. 2014. № 5. С. 74–79.
23. Куренков Г.И., Яхонтов Б.О., Сыровегин А.В. и др. Действие гипербарической среды на организм человека и животных // *Проблемы космической биологии* / Под ред. акад. В.Н. Черниговского. М.: Наука, 1980. Т. 39. 259 с.
24. Суворов А.В. Дыхание и газообмен человека в условиях высокой плотности газовой среды: автореф. дис. ... докт. мед. наук. Москва, 1998. 44 с.
25. Гуляр С.А. Медико-физиологические гипербарические исследования в рамках программы «Черномор»: результаты и перспективы // *Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XI Международной научно-технической конференции*. М., 2009. Ч. 1. С. 105–109.
26. Фишман Р. Сверхглубокие погружения: может ли человек жить на глубине 700 м? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/235827-sverkhglubokie-pogruzheniya-mozhet-li-chelovek-zhit-na-glubine-700-m/> (дата обращения: 14.05.2019).
27. Мотасов Г.П., Кадетов С.Н. Роль НИИ спасания и подводных технологий в развитии медицинского обеспечения аварийно-спасательных и водолазных работ // *Освоение морских глубин* / Гл. ред. Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2018. С. 451–456.
28. Яхонтов Б.О. Физические параметры газовой среды и микроклимата барокамер водолазных комплексов // *Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019): материалы XVI всероссийской научно-технической конференции*. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 2. С. 146–149.