

УДК 57.042:551.46.077

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОЛАЗНЫХ ПОГРУЖЕНИЙ

Яхонтов Б.О.

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

Проблема развития технологий водолазных погружений находится на стыке технических и биологических наук, и эта связь должна быть незыблема для эффективного и безопасного использования этих технологий при изучении и освоении океана. Основные принципы построения технологий водолазных погружений являются физиологическими, так как они связаны с эффектами действия на организм человека большого количества экстремальных и неблагоприятных факторов гипербарической среды. Решающее значение физиологических принципов построения технологий и методов водолазных погружений обусловлено дыханием измененной газовой средой и эффектами действия гипербарической среды на организм. Методы и режимы погружений, входящие в структуру водолазных технологий, учитывают эффекты действия на организм основных факторов гипербарии и направлены на их ликвидацию или минимизацию. Технический компонент технологии направлен на практическую реализацию этих методов с помощью технических средств в зависимости от методов погружений, водолазного снаряжения, оборудования и системы жизнеобеспечения.

Ключевые слова: гипербария, водолаз, гипербарические факторы, водолазные технологии, методы погружений, гипоксия, гипероксия, дыхательные газовые смеси

PHYSIOLOGICAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTING TECHNOLOGIES OF DIVING

Yakhontov B.O.

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

The problem of diving technology development is at the intersection of technical and biological sciences, and this connection should be unshakable for the effective and safe use of these technologies in the study and development of the ocean. The basic principles of constructing diving technologies are physiological, since they are associated with the effects of a large number of extreme and unfavorable factors of the hyperbaric environment on the human body. The decisive importance of the physiological principles of the construction of technologies and methods of diving is due to the breathing of the altered gas medium and the effects of the action of the hyperbaric environment on the organism. The methods and modes of diving, which are included in the structure of diving technology, take into account the effects of the main hyperbaric factors on the human organism and are aimed at their elimination or minimization. The technical component of technology is aimed at practical implementation of these methods by technical means, depending on the methods of diving, diving outfit, equipment and life support system.

Keywords: hyperbaria, diver, hyperbaric factors, diving technology, diving techniques, hypoxia, hyperoxia, respiratory gas mixture

Любая технология водолазных погружений является совокупностью технических средств (водолазное снаряжение и оборудование) и методов погружений, которые основаны исключительно на физиологических возможностях организма. Комплекс современных технических средств обеспечивает возможность погружений человека на различные глубины океана, примерно до 450 метров, и имитацию в научных целях значительно больших глубин в барокамерах водолазных комплексов в береговых условиях [1]. В этой связи проблема развития технологий водолазных погружений находится на стыке технических и биологических наук, и эта связь должна быть незыблема для эффективного и безопасного использования этих технологий при изучении и освоении океана.

Главные принципы построения технологий водолазных погружений являются физиологическими, потому что они связаны с воздействием на организм человека большого количества факторов гипербарической

дыхательной среды и ответными реакциями организма. Главные из этих факторов – давление *per se*, плотность дыхательной газовой среды (влияние на механику дыхания и газообмен), кислород (гипоксия и гипероксия), биологическое действие инертных газов (гипербарический азотный наркоз, нервный синдром высокого давления), теплообмен, обмен инертными газами между организмом и дыхательной средой (компрессия и декомпрессия). Реакции на действие этих факторов являются неблагоприятными, поэтому их нормализация или минимизация является главным принципом, основой для построения эффективной и безопасной технологии погружений. Кроме того, эти факторы являются не только физиологическими барьерами при погружениях, но и потенциальными источниками опасности. При этом система обеспечения безопасности водолазных спусков, которая также входит в структуру технологии, должна соответствовать рискам и включать не только нормативные правовые докумен-

ты, надежное снаряжение и оборудование, но и физиолого-гигиеническое обоснование режимов погружений и работы на глубинах.

Технологии водолазных погружений основаны на двух классических методах, учитывающих влияние на организм вышеотмеченных факторов: кратковременного погружения (КП) и длительного (много-суточного) пребывания (ДП) в условиях повышенного давления (гипербария). При погружениях методом КП ткани организма частично насыщаются инертным газом (азотом или гелием), при этом продолжительность декомпрессии зависит от времени работы под водой или в барокамере. При длительном пребывании (более суток) в условиях стабильного давления ткани организма полностью насыщаются инертным газом в зависимости от его парциального давления в дыхательной среде, поэтому длительность декомпрессии после этого не зависит от времени пребывания под давлением [2]. Такие особенности методов КП и ДП имеют принципиальное значение для организации водолазных спусков и обеспечения их безопасности при проведении научных исследований и других работ под водой.

Решающее значение физиологических принципов построения технологий и методов водолазных погружений обусловлено дыханием измененной газовой средой и эффектами действия этой среды на организм. Эти эффекты сводятся к физиологическим реакциям, которые почти не зависят от метода водолазного спуска (КП или ДП), поскольку основные действующие факторы гипербарической среды одинаковы. Разница состоит лишь в степени выраженности этих реакций, так как временная разница между этими двумя методами огромна и может быть более чем 100-кратной. Поэтому выраженность одних и тех же реакций может по некоторым физиологическим системам значительно различаться, а при нарушениях условий ДП, или даже КП, эти реакции могут переходить в патологические. Но если физиологические реакции считаются специфическими для данных условий, то есть они неизбежны, то патологические к таковым не относятся, так как они возникают лишь при нарушении установленных правил и режимов работы в условиях гипербарии. Необходимо иметь в виду, что при длительном (многосуточном) воздействии гипербарических факторов на организм физиологические реакции в течение всего периода пребывания под давлением по степени выраженности не бывают одинаковыми. Они могут быть циклическими, а иногда, после нескольких суток пребывания под давлением, ослабевать или даже

отсутствовать [3]. Это может быть связано с процессами адаптации к условиям гипербарии, хотя утверждать возможность адаптации к экстремальным условиям высокого давления затруднительно.

Различие между методами КП и ДП заключается ещё и в том, что при традиционных кратковременных спусках на глубины до 60 метров водолаз, как правило, дышит сжатым воздухом, но при многосуточном пребывании под давлением, эквивалентным даже малой глубине (10–12 м), дыхание сжатым воздухом неприемлемо в связи с возможным развитием токсического действия кислорода. Поэтому при погружениях методом ДП парциальное давление кислорода (PO_2) в дыхательной среде должно поддерживаться на нетоксичном уровне независимо от глубины и длительности пребывания под давлением [3]. Снижение PO_2 в условиях гипербарии ниже нормоксического уровня ($0,21 \text{ кгс/см}^2$) может привести к гипоксии (кислородной недостаточности в организме), превышение допустимого уровня – к гипероксии и, как следствие, к отравлению кислородом при длительном дыхании.

Все реакции на умеренную гипоксию направлены на компенсацию недостатка кислорода. В диапазоне содержания кислорода в смеси 18–14% ($0,18\text{--}0,14 \text{ кгс/см}^2$) в условиях покоя недостаток кислорода может быть компенсирован, хотя и немалой «физиологической ценой» (за счет повышения легочной вентиляции, усиления кровообращения и дыхательной функции крови). При такой гипоксии водолаз не способен эффективно выполнять физическую работу под водой.

Повышение PO_2 так же отрицательно влияет на функциональные возможности организма. Гипероксия сопровождается развитием комплекса реакций. Все реакции на гипероксию зависят от уровня повышенного PO_2 и длительности воздействия. Первые выраженные физиологические реакции на гипероксию приблизительно в пределах PO_2 до 1 кгс/см^2 (соответствует чистому кислороду при нормальном давлении) обнаруживаются в дыхательной системе, они направлены на ограничение доставки кислорода. Угнетение дыхательной функции под влиянием гипероксии при повышенной плотности дыхательной смеси в условиях гипербарии приводит к задержке выделения CO_2 и накоплению его в организме, что в свою очередь может усиливать токсическое действие кислорода в связи с расширением сосудов головного мозга [4, 5] и наркотическое действие азота [6]. В целом реакции на гипероксию противоположны тем, которые наблюдаются при гипоксии.

Длительное действие гипероксии сопровождается реакциями прежде всего со стороны центральной нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем. Физиологические реакции переходят в патологические, когда кислород начинает оказывать токсическое действие на организм. При длительных (многосуточных) воздействиях умеренно гипероксических смесей признаки кислородной интоксикации могут возникнуть при PO_2 более $0,3 \text{ кгс/см}^2$. По обобщенным данным нетоксичные величины PO_2 находятся в пределах 200–220 мм рт. ст. ($0,27\text{--}0,30 \text{ кгс/см}^2$) [7]. Это подтверждено многими исследователями и практикой водолазных спусков методом длительного пребывания в жилых отсеках барокамер. Вместе с тем, действующими правилами допускается работа под водой при дыхании кислородом на глубинах не более 20 метров ($PO_2 - 3 \text{ кгс/см}^2$) в течение 20 минут с учётом предрасположенности водолаза к токсическому действию кислорода [8].

При спусках методом КП, кроме гипероксии, на организм водолаза оказывает влияние повышенное парциальное давление азота. Его наркотическое действие проявляется, начиная с глубин приблизительно 30 метров, и внешне выражается в изменении поведенческих реакций в зависимости от глубины [9]. Поэтому водолазные спуски на сжатом воздухе в России ограничены глубиной 60 м. Длительное пребывание на глубинах до 40 м с использованием кислородно-азотных смесей возможно лишь при поддержании PO_2 на нетоксичном уровне. Но при этом давление азота будет повышено на величину снижения давления кислорода, что приведёт к более сильному наркотическому эффекту.

Для метода ДП, который признан самым эффективным методом водолазных погружений на большие глубины [10], характерным является то, что для дыхания водолазов используются дыхательные смеси, основным компонентом которых является гелий. Этот инертный газ не обладает наркотическим действием подобно азоту. Кроме того, плотность гелия в семь раз меньше, чем азота, поэтому в такой среде частично снимается ряд проблем, связанных с механикой дыхания. Но в связи с тем, что теплопроводность гелия в 6 раз выше, чем азота, появляются другие проблемы, связанные с теплообменом между организмом и средой и его влияниями на центральную нервную систему. Все эти проблемы имеют лимитирующее значение для изучения и освоения глубин водолазным методом. Однако в диапазоне достигнутых человеком глубин (534 м в море и 701 м в барокамере – француз-

ская фирма Comex) плотность и теплопроводность дыхательной среды не являются лимитирующими факторами. Плотность может быть нивелирована путем частичной замены гелия более лёгким водородом. Температурный режим искусственно поддерживается в оптимальных пределах для определенного диапазона глубин и состава дыхательной смеси. Фактор плотности дыхательной смеси, по-видимому, не будет лимитировать глубину погружения, так как имеются экспериментальные подтверждения возможности пребывания и работы при плотности газовой смеси на основе неона, соответствующей глубине около 2000 метров [11] при условии дыхания кислородно-гелиевой смесью. Кроме того, известно, что дыхательный газообмен почти не зависит от плотности дыхательной среды. Но это не означает, что человек достигнет таких глубин. Влияние подобных давлений на организм человека неизвестно, а длительность декомпрессии с таких глубин неприемлема, так как может превысить 45 суток.

Серьёзным барьером является развитие нервного синдрома высокого давления (НСВД). Этот физиологический барьер на пути в глубину может появляться при давлениях, соответствующих глубинам более 100 метров и при дыхании смесями на основе гелия. Симптоматика НСВД проявляется как тремор конечностей, сонливость, нарушение мышечной координации. При давлениях порядка 3,0 МПа (глубина 300 м) и более у водолазов могут наблюдаться апатия, тошнота, расстройства равновесия, спутанность сознания, изменение электрической активности мозга [9]. Все эти проявления являются результатом действия исключительно давления и скорости его повышения при компрессии. Но этот физиологический барьер преодолим в диапазоне достигнутых человеком глубин при снижении скорости компрессии и применении ступенчатой компрессии с выдержками на промежуточных глубинах. Эффективным является и добавление в кислородно-азотно-гелиевую смесь дополнительного количества азота (до 10%), который в данном случае действует как физиологический антагонист гелия.

Методы водолазных погружений (КП и ДП) учитывают вышеотмеченные эффекты действия на организм основных факторов гипербарии, поэтому и принципы построения технологий и особенно методов погружений являются физиологическими [12]. Они направлены на минимизацию отрицательных последствий влияния факторов гипербарии на организм водолаза и обеспечение безопасности погружений.

Кроме методов и нормативной документации (технической, медицинской, правовой), неотъемлемой частью технологий водолазных погружений являются технические средства обеспечения спусков и работ: водолазные комплексы (судовые, береговые, мобильные и другие), водолазное снаряжение (вентилируемое, дыхательные аппараты различных типов, гидрокombинезоны, теплозащитная одежда и другое), водолазные барокамеры и прочая водолазная техника. Для погружений в научных целях следует особо выделить дыхательные аппараты с замкнутым циклом дыхания, электронной регулировкой состава дыхательной газовой смеси, автоматическим поддержанием заданного PO_2 во всем диапазоне глубин и компьютерным расчетом режима декомпрессии на месте [13, 14]. Как показала сравнительная оценка методик погружений, такие аппараты обеспечивают спуски в автономном режиме и позволяют расширить диапазон глубин, увеличить время работы под водой и значительно сократить продолжительность декомпрессии [2]. Преимущества таких аппаратов обеспечивают перспективу развития метода КП и ставят его на более высокий уровень [15].

На физиологических принципах основаны и развивающиеся технологии водолазных спусков в автономном режиме с использованием в дыхательном аппарате вместо сжатого воздуха дыхательных газовых смесей (ДГС): кислородно-азотных смесей (КАС), воздушно-гелиевых смесей (ВГС) и кислородно-азотно-гелиевых смесей (КАГС).

Дыхательные смеси на основе гелия, особенно КАГС, конечно, являются более сложными в приготовлении и использовании под водой. Кроме того, стоимость гелия и дыхательного аппарата для гелийсодержащих смесей существенно ограничивает их практическое использование, хотя такие смеси позволяют водолазу работать на значительно больших глубинах. Поэтому на данном этапе разработки технологии и методики водолазных спусков в научных целях целесообразно ограничиться использованием кислородно-азотных смесей. Главный принцип обеспечения большей эффективности водолазных спусков в автономном режиме с использованием КАС заключается в повышении (относительно воздуха) содержания кислорода в ДГС в пределах нетоксичной зоны (конечно, с учетом продолжительности дыхания на глубине) и снижении за счет этого содержания азота.

Внедрение в практику КАС значительно расширит возможности водолазных спусков и научных работ на малых (до 12 м)

и средних (по крайней мере, до 45 м) глубинах. Такие смеси имеют явные преимущества по сравнению со сжатым воздухом. Это выражается в увеличении глубины и длительности научной работы под водой без проведения декомпрессии. Например, декомпрессия после 35 минут работы под водой при дыхании воздухом на глубине 35 метров составляет 43 минуты, а при дыхании КАС с 40% содержанием кислорода – 3 минуты (время выхода на поверхность). При такой технологии уменьшается насыщение организма азотом в связи с его меньшим содержанием в дыхательной смеси и поэтому сокращается время декомпрессии и риск возникновения декомпрессионного заболевания. Декомпрессия после спуска на глубину 35 метров и работы на грунте в течение 90 минут при дыхании воздухом составит 2 часа 42 минуты, а при дыхании КАС с 40% содержанием кислорода время декомпрессии сокращается до 1 час 05 минут, то есть более чем в два раза. Кроме того, при дыхании гипероксической смесью минимизируется или блокируется азотный наркоз за счет снижения содержания азота в дыхательной КАС. И главное – поддерживается физическая работоспособность при работе под водой за счет повышенного содержания кислорода в дыхательной смеси. Такая эффективность дыхания под водой кислородно-азотными смесями является примером удачного использования физиологических принципов при разработке этой технологии.

Заключение

Эффективность любой водолазной технологии зависит от заложенных в нее физиологических принципов, или основ, направленных на поддержание в допустимых пределах параметров дыхательной среды на данной глубине и обеспечивающих адекватное условиям физиологическое состояние водолаза. Основные из этих принципов: поддержание величин парциальных давлений кислорода в зависимости от глубины и длительности дыхания, удаление CO_2 и вредных примесей, поддержание температуры в зависимости от состава ДГС, влажности, минимизация плотности дыхательной смеси, обеспечение в допустимых пределах сопротивления дыхательного аппарата и работы дыхания.

С учетом различия физиологических эффектов действия на организм гипербарических факторов при погружениях методами КП и ДП технологии водолазных погружений целесообразно разделить на две структурно похожие, но принципиально разные группы. Технологии кратковременных по-

гружений, основанные на совокупности метода КП и специальных технических средств для обеспечения спусков. Технологии длительного пребывания под повышенным давлением, основанные на совокупности метода ДП и технических средств обеспечения многосуточных погружений, включая систему жизнеобеспечения, которая является главным средством управления физиологическими и физическими параметрами дыхательной газовой среды.

Список литературы

1. Яхонтов Б.О. Технологии глубоководных водолазных спусков // Нептун. Водолазный проект. – 2012. – № 4. – С. 24–31.
2. Яхонтов Б.О. Оценка эффективности водолазных технологий изучения океана // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 10–1. – С. 111–115.
3. Яхонтов Б.О. Эффекты действия факторов гипербарической среды на организм водолаза // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XIII Междунар. научно-технич. конф. – Москва, 2013. – Т. 2. – С. 146–149.
4. Кларк Дж.М. Токсическое действие кислорода // Медицинские проблемы подводных погружений / под ред. П.Б. Беннетта и Д.Г. Эллиотта, пер. с англ. – М.: Медицина, 1988. – С. 190–246.
5. Тюрин В.И. Внимание, глубина! / В.И. Тюрин. – СПб: ЦСИ, 2009. – 284 с.
6. Беннетт П.Б. Наркотическое действие нейтральных газов // Медицинские проблемы подводных погружений / под ред. П.Б. Беннетта и Д.Г. Эллиотта, пер. с англ. – М.: Медицина, 1988. – С. 247–273.
7. Жиронкин А.Г. Кислород. Физиологическое и токсическое действие. – Л.: Наука, 1972. – 172 с.
8. Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ (ПОТ РМ-030-2007). Информационно-справочный материал / Под ред. В.А. Рогожникова. – М.: Слово, 2007. – 320 с.
9. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. – Л.: Медицина, 1979. – 319 с.
10. Смолин В.В., Соколов Г.М. Становление в ВМФ метода проведения водолазных работ из условий длительного пребывания // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XI Междунар. научно-технич. конф. – Москва, 2009. – Ч. 2. – С. 57–61.
11. Гусейнов Т.Ю., Семенов В.Н. Забытый мировой рекорд // Нептун. Водолазный проект. – 2012. – № 1. – С. 88–97.
12. Яхонтов Б.О., Римский-Корсаков Н.А. Развитие гипербарических технологий океанологических исследований // Океанология. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 167–171.
13. Черкашин С.В. Вопросы внедрения метода глубоководных погружений в автономном режиме в практику отечественных водолазных работ // Морские испытания. – 2008. – № 2. – С. 4–14.
14. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски методом кратковременных погружений // Наука и транспорт. – 2011. – Спец. вып. 2011. – С. 36–39.
15. 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.