

УДК 612.274

## О НЕОБХОДИМОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ АЗОТА В КИСЛОРОДНО-АЗОТНО-ГЕЛИЕВОЙ СРЕДЕ БАРОКОМПЛЕКСА И КОРРЕКЦИИ ЕГО ВЕЛИЧИНЫ В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕННЫХ ПОГРУЖЕНИЙ

*Д.В.Реймов, Г.П.Мотасов, В.Н.Алпатов*

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г.Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия

## ON THE NECESSITY TO CONTROL THE PARTIAL PRESSURE OF NITROGEN IN THE OXYGEN-NITROGEN-HELIUM MEDIUM OF PRESSURE CHAMBER ASSEMBLY AND TO ADJUST THE PRESSURE IN THE COURSE OF INTENSIVE DIVING

*D.V.Reymov, G.P.Motasov, V.N.Alpatov*

Navy General Headquarters and N.G.Kuznetsov Navy Academy, Saint Petersburg, Russia

© Коллектив авторов, 2015 г.

В статье отражены некоторые результаты экспериментальных исследований по разработке отечественной технологии водолазных погружений методом длительного пребывания под повышенным давлением искусственной газовой среды на предельных глубинах. Показана важность поддержания обоснованной величины парциального давления азота во всем диапазоне глубин, в том числе для исключения возникновения у акванавтов декомпрессионной болезни, потенцированной противодиффузионным пересыщением организма индифферентными газами. Положения, содержащиеся в статье, могут быть использованы при выполнении водолазных погружений на новых спасательных судах с глубоководными водолазными комплексами.

**Ключевые слова:** акванавт, глубоководные насыщенные погружения, декомпрессионная болезнь, водолазные работы, кислородно-азотно-гелиевые смеси, медицинское обеспечение, метод длительного пребывания, парциальное давление азота, синдром изобарической противодиффузии.

The paper addresses some experimental findings concerning the development of domestic technologies of diving associated with prolonged dwelling under increased pressure levels of artificial gaseous media at utmost depths. The findings demonstrate the importance of maintaining a reasonably substantiated level of the partial pressure of nitrogen through the entire range of depths, in order to prevent the decompression disease potentiated by counter-diffusional oversaturation of human organism with inert gases. The provisions of the paper may be helpful as concerns diving jobs using novel deep-water diving suits.

**Key words:** aquanaut, deep-water intensive diving, decompression disease, diving jobs, oxygen-nitrogen-helium mixtures, medical corps, long-term dwell regimen, partial pressure of nitrogen, isobaric counter-diffusion syndrom.

В отечественной практике проведение глубоководных насыщенных погружений (водолазных спусков методом ДП — длительного пребывания под повышенным давлением) на глубины более 40 метров применяют кислородно-гелиевые или кислородно-азотно-гелиевые смеси — КГС или КАГС. Компрессия осуществляется в барокамере одним из трех способов:

- подачей воздуха до определенной глубины, затем — подачей гелия;
- подачей заранее приготовленной КГС;

— подачей утилизированной КАГС.

Согласно наиболее распространенной отечественной технологии, газовую среду в барокамере готовят посредством подачи воздуха с повышением давления до некоторой глубины, потом давление повышают (ступенчато) гелием до величины, соответствующей глубине водолазных работ, одновременно осуществляют корректировку парциального давления кислорода. В способе компрессии с этапом повышения давления воздухом достигается определенная величина парциального

давления азота, которая остается постоянной при последующей компрессии. При компрессии воздухом до глубины 5 метров (0,15 МПа) по достижении заданной глубины проведения водолазных работ парциальное давление азота составит в среднем 120 кПа. В период пребывания под рабочим давлением в барокамере парциальное давление кислорода должно быть в пределах 25–30 кПа, азота —  $100 \pm 20$  кПа (остальное — гелий).

Вследствие шлюзований и естественных утечек не исключено уменьшение парциального давления азота в среде барокамеры, и оно прогрессирует, если пополнение утечек осуществляется гелием. В документах, определяющих проведение насыщенных погружений на глубины до 300 метров, не отражена целесообразность контроля содержания азота в КАГС и его поддержания на требуемом уровне.

Согласно ПВС ВМФ-2002, при декомпрессии по рабочему режиму из условий ДП при использовании КАГС с глубин до 300 метров парциальное давление кислорода в среде барокамеры составляет от 50 до 35 кПа в зависимости от глубины. Величина парциального давления азота в среде барокамеры в период декомпрессии не оговорена, но изначально подразумевалось, что оно должно быть в тех же пределах, что и в период изопрессии — то есть в диапазоне  $100 \pm 20$  кПа. Нижняя граница этого диапазона обусловлена тем, что для организма человека и животных, существующих в естественных наземных условиях, напряжение азота в тканях составляет 80 кПа. Также известно, что добавки азота в газовую среду, содержащую гелий, улучшают ее теплофизические свойства и позволяют повысить разборчивость речи. Для сокращения продолжительности компрессии до глубины 300 метров могут использоваться КАГС с содержанием азота 8–10%, однако при достигнутом давлении поддержание концентрации азота в среде барокамеры более 5% нежелательно вследствие повышенной нагрузки на дыхательную систему из-за высокой плотности вдыхаемой среды, а также в связи с потенциальной необходимостью увеличения продолжительности последующей декомпрессии.

Недоработки в отношении вопросов контроля парциального давления азота в среде барокамер и его корректировки имеют негативные последствия, которые обусловлены риском возникновения изобарической противодиффузии индифферентных газов.

Под синдромом изобарической противодиффузии индифферентных газов подразумевают

комплекс реакций и повреждений организма в ответ на образование в его внутренних средах пузырьков газа вследствие пересыщения, возникающего при диффузии через ткани организма двух индифферентных газов в противоположных направлениях. Пересыщение возникает без изменения общего давления в случаях, когда индифферентные газы обладают различными диффузионными свойствами и растворимостью в тканях [3, 8]. По механизму возникновения и характеру проявлений различают противодиффузию в поверхностных тканях и противодиффузию в глубоких тканях организма. В прикладном отношении целесообразно рассматривать противодиффузию на примере пары «азот-гелий».

В клиническом проявлении противодиффузионного пересыщения поверхностных тканей возможна разнообразная симптоматика: кожный зуд, макуло-папулезная сыпь, вестибулярные расстройства, нарушения зрения — как следствие образования газовых пузырьков в подкожной клетчатке, эндолимфе вестибулярного аппарата и прозрачных средах глаз. Пересыщение в поверхностных тканях сохраняется, пока сохраняются условия, вызвавшие противодиффузию. При определенном для данной пары газов внешнем давлении пересыщение становится достаточным для образования газовых пузырьков. Эти пузырьки образуются в подкожной клетчатке, затем попадают в капилляры и в венозную систему. Если пересыщение поддерживается достаточно долго, пузырьки проходят через сосуды малого круга и попадают в артериальное русло. Газовые пузырьки оказывают локальное повреждающее действие на ткани, нарушают микроциркуляцию, воздействуют на нервные окончания в тканях и стенках сосудов, вызывают изменения системного кровотока, взаимодействуют с форменными элементами и белками крови, вызывая ответные реакции организма, формирующие клиническую картину поражения, сходную с декомпрессионной болезнью. При длительном сохранении условий для противодиффузии газов в поверхностных тканях может иметь место венозная газовая эмболия, приводящая к расстройствам сердечно-сосудистой системы и дыхания, ставя под угрозу здоровье и жизнь человека.

Клинические проявления встречной диффузии в глубоких тканях характеризуются нарушениями функций сердечно-сосудистой системы. Опасность глубокотканевого изобарического газообразования заключается в повреждающем

воздействии на ткани и перерастании в декомпрессионную болезнь, если декомпрессия сочетается с условиями, инициирующими и потенцирующими противодиффузионное пересыщение. Пересыщение глубоких тканей обусловлено тем, что снижение напряжения в них азота происходит медленнее, чем рост напряжения гелия. В результате, на определенном этапе суммарное напряжение азота и гелия становится больше окружающего давления. В отличие от пересыщения поверхностных тканей, глубокотканевое пересыщение носит временный характер: оно уменьшается по мере насыщения организма от медленно диффундирующего газа (азота).

В практике водолазных спусков нередко возникают предпосылки для противодиффузионного пересыщения тканей организма. Условия возникновения изобарической противодиффузии индифферентных газов определены отечественными специалистами на основании результатов экспериментальных исследований [3].

В частности, это ситуация, когда в герметизированном объекте под повышенным давлением осуществляется смена газовой среды или сменная подача газовых смесей, поступающих на дыхание. Например, возникновение изобарической противодиффузии возможно в ситуации, когда в барокамере поддерживается КАГС с повышенным парциальным давлением азота, а непосредственно при водолазных работах используется смесь, содержащая кислород и гелий. Данная ситуация осложняется, если из условий ДП проводятся экскурсионные спуски [2]. Потенциально неблагоприятная обстановка также складывается при использовании сменной подачи дыхательных газовых смесей на этапе декомпрессии в кратковременных глубоководных погружениях [1].

Тождественность основных патогенетических механизмов синдрома изобарической противодиффузии газов и декомпрессионной болезни может приводить к усилению проявлений декомпрессионной болезни, поэтому декомпрессию следует начинать не ранее полного исчезновения проявлений изобарического поражения. Противодиффузионное пересыщение тканей организма может «накладываться» на декомпрессионное пересыщение при снижении давления, и в этих условиях может потребоваться специализированное лечение, причем штатные способы лечения декомпрессионной болезни не всегда эффективны. Сходство симптоматики затрудняет дифференциальную ди-

агностику декомпрессионной болезни и противодиффузии газов в условиях декомпрессии [4].

Потенциально опасная ситуация, обусловленная противодиффузией гелия и азота, возникает при декомпрессии, если имеет место снижение парциального давления азота в среде барокомплекса ниже рекомендуемых значений [5]. Необходимость контроля парциального давления азота в КАГС и его коррекции в условиях насыщенных погружений показана в НИР, выполненных в 40-м НИИ Министерства обороны СССР во исполнение Постановлений Совета Министров СССР от 13 мая 1985 года № 414-143 «О проведении специальных исследований по обеспечению ДП человека под водой на больших глубинах» и от 17 июля 1986 года № 852-239 «О мерах по организации исследований Мирового океана и созданию технических средств для этих целей»:

«Исследования по разработке методов выполнения водолазных работ на глубинах до 400 м»: НИР 1-86-14п, шифр «Кинопроба-1», номер Государственной регистрации 6432889, завершена в 1989 году;

«Исследования по разработке методов выполнения водолазных работ на глубинах до 500 м»: НИР 1-89-7п, шифр «Кинопроба-2», номер Государственной регистрации 94330022, завершена в 1991 году.

Важным условием безопасности экспериментальных водолазных работ являлся контроль за парциальным давлением азота в среде отсеков барокомплекса ГБК-50 с поддержанием его парциального давления на уровне 80–120 кПа (или же 80–100 кПа) путем корректировки состава чистым азотом или воздухом, в том числе в процессе декомпрессии. Как отмечено выше, «вымывание» азота из среды отсека с достижением ничтожных его концентраций может вызвать встречную диффузию азота и гелия с формированием пересыщения тканей — в итоге суммарное пересыщение может превысить допустимую величину, заложенную в расчет режима декомпрессии, то есть стать негативным фактором, провоцирующим возникновение декомпрессионной болезни [6].

Способ контроля парциального давления азота в среде барокамеры допускает варианты исходя из имеющихся технических средств газового анализа.

Опыт проведения водолазных погружений под давлением 3,1–5,1 МПа обобщен в 2011 году в НИР «Исследования по совершенствованию мероприятий медицинского обеспечения глубоковод-

ных водолазных работ методом длительного пребывания на глубинах 300–500 метров» (шифр «Кинопроба-11»), разработан проект «Рекомендаций по медицинскому обеспечению и применению режимов декомпрессии водолазов при глубоководных водолазных работах методом длительного пребывания на глубинах 300–500 метров». В 2013 году Главкомандующим ВМФ утверждены «Рекомендации по организации и медицинскому обеспечению и применению режимов декомпрессии водолазов при глубоководных водолазных работах методом длительного пребывания на глубинах 300–500 метров», с перспективой использования на новом спасательном судне «Игорь Белоусов».

#### **Выводы.**

1. В действующие документы, регламентирующие проведение водолазных работ методом

ДП на глубинах до 300 метров с применением КАГС, целесообразно включить контроль величины парциального давления азота в среде (весь период погружения, включая декомпрессию) и, при необходимости, соответствующую коррекцию данного параметра.

2. В отечественной технологии выполнения водолазных работ методом ДП на глубинах до 500 метров с использованием КАГС требования по контролю величины парциального давления азота в среде барокамеры (весь период погружения, включая декомпрессию) и соответствующей коррекции являются обязательными во избежание возникновения у акванавтов декомпрессионной болезни, потенцированной противодиффузионным пересыщением организма индифферентными газами.

#### **Литература**

1. Ласточкин Г.И., Иванченко А.И., Дружинин В.В. Лечение тяжелой формы декомпрессионной болезни с синдромом Меньера и некоторые рекомендации по профилактике декомпрессионных нарушений // Медико-биологические проблемы декомпрессии: Материалы 1 Всесоюз. совещания, Москва, март 1991 г.— М., 1991.— С. 18–20.
2. Родченков С.В., Полищук И.П., Скудин В.К., Дмитрук А.И. Разработка режимов декомпрессии для экскурсионных спусков из условий длительного пребывания под давлением до 21 АТА // Космическая биология и авиакосмическая медицина.— 1991.— № 6.— С. 23–27.
3. Семко В.В., Бухарин А.Н., Ласточкин Г.И., Бардышева О.Ф. Условия развития изобарической противодиффузии индифферентных газов и критерии ее оценки // Физиол. журн. (Киев).— 1991.— Т. 37, № 4.— С. 46–52.
4. Семко В.В., Ласточкин Г.И., Бардышева О.Ф. Экспериментальные исследования синдрома изобарической противодиффузии // Медико-биологические проблемы декомпрессии: Материалы 1 Всесоюз. совещания, Москва, март 1991 г.— М., 1991.— С. 21–25.
5. Семко В.В., Ласточкин Г.И., Бардышева О.Ф., Бойцов А.Р., Ваккилайнен О.В. Разработка и испытания экспериментальных режимов декомпрессии акванавтов с глубин до 500 м // Медицинское и техническое обеспечение водолазных работ и спасения подводников / Науч.-техн. сб. в. ч. 20914.— 1990.— Вып. 9.— С. 18–25.
6. Семко В.В., Ласточкин Г.И., Бойцов А.Р., Бардышева О.Ф., Вакулук В.И. Развитие синдрома Меньера при испытаниях новых режимов экскурсионных и бездекомпрессионных спусков с базовой глубины 300 м и его лечение в этих условиях // Медицинское и техническое обеспечение водолазных работ и спасения подводников / Науч.-техн. сб. в. ч. 20914.— 1992.— Вып. 11.— С. 57–66.
7. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н., Демчишин М.Д. Глубоководные водолазные спуски и их медицинское обеспечение: в 3 тт.— М.: Фирма «Слово», 2003–2005.— Т. 2.— 2004.— С. 262–303.
8. D' Aoust B.G., Lambertsen C.J. Isobaric Gas Exchange and Supersaturation by Counterdiffusion // The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work / Eds. P.B.Bennett & D.H.Elliott.— 3<sup>rd</sup> ed.— London: Bailliere Tindal, 1982.— P. 383–403.

Дата поступления: 19.03.2015 г.