

СТАТЬИ

УДК 626.02:612.274:54.08

**ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ БИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ  
В ВОДОЛАЗНЫХ БАРОКАМЕРАХ**

**Яхонтов Б.О.**

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

По результатам исследований, испытаний и научного использования средств измерения биофизических параметров гипербарической среды дана оценка пригодности и эффективности принципов газового анализа и измерения температуры и влажности в водолазных и исследовательских барокамерах. Пригодность этих принципов определяется устойчивостью измерительных средств к механическому действию высокого давления и возможностью получения корректных результатов. Для анализа дыхательных газов и газов крови ( $O_2$  и  $CO_2$ ) непосредственно в условиях высокого давления в барокамере наиболее пригодным, особенно для кислорода, является электрохимический принцип анализа. Его достоинство состоит в том, что датчик не подвержен деформации давлением и его чувствительность повышается в прямой зависимости от давления, что позволяет сохранять точность определения показателей дыхательного газообмена в условиях гипербарии. Анализ кислорода в газовой смеси, поступающей из барокамеры на анализ при нормальном давлении, дает корректные результаты при использовании парамагнитного и циркониевого датчиков, анализ  $CO_2$  и некоторых вредных примесей – инфракрасного. При газоанализе поверочные смеси должны быть максимально близкими по составу и величинам компонентов к анализируемым. Из методов измерения температуры в условиях гипербарии наиболее пригодным, отличающимся точностью, стабильностью работы и надежностью, является измерение температуры платиновым термометром сопротивления. Для измерения абсолютной и относительной влажности в барокамере всем требованиям отвечает принцип, основанный на определении температуры точки росы. Гигрометрический датчик зеркального типа, работающий на этом принципе, полностью сохраняет работоспособность на имитированных глубинах до 1000 м.

**Ключевые слова:** барокамера, гипербария, водолаз, дыхательная среда, принципы газоанализа, температура среды, влажность

**PRINCIPLES OF MEASURING BIOPHYSICAL PARAMETERS  
OF THE ENVIRONMENT IN DIVING PRESSURE CHAMBERS**

**Yakhontov B.O.**

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

Based on the results of research, testing and scientific use of tools for measuring biophysical parameters of hyperbaric environment, the suitability and effectiveness of the principles of gas analysis and measurement of temperature and humidity in diving and research pressure chambers are evaluated. The suitability of these principles is determined by the sustainability of measuring instruments to the mechanical action of high pressure and the possibility of obtaining correct results. For the analysis of respiratory gases and blood gases ( $O_2$  and  $CO_2$ ) directly under high pressure in the pressure chamber, the most suitable, especially for oxygen, is the electrochemical principle of analysis. Its advantage is that the sensor is not subject to pressure deformation, and its sensitivity increases in direct dependence on the pressure, which allows you to maintain the accuracy of determining the indicators of respiratory gas exchange in hyperbaric conditions. Analysis of oxygen in the gas mixture coming from the pressure chamber for analysis at normal pressure gives correct results when using paramagnetic and zirconium sensors. For the analysis of  $CO_2$  and some harmful impurities – infrared. During gas analysis, the calibration mixtures should be as close as possible in composition and values of the components to the analyzed ones. Of the methods for measuring temperature in hyperbaric conditions, the most suitable, characterized by accuracy, stability and reliability, is the measurement of temperature with a platinum resistance thermometer. For measuring absolute and relative humidity in the pressure chamber, the principle based on determining the dew point temperature meets all the requirements. A mirror-type hygrometer sensor based on this principle remains fully operational at simulated depths of up to 1000 meters.

**Keywords:** hyperbaric chamber, hyperbaria, diver, respiratory environment, principles of gas analysis, ambient temperature, humidity

Изучение и освоение человеком морских глубин связано с использованием водолазных методов работы под водой. Наиболее эффективным является метод длительного пребывания (ДП) под повышенным давлением [1], который реализуется многосуточным (до 4–5 недель в зависимости от глубины) пребыванием в жилых барокамерах судового или берегового водолазных комплексов, в которых по фактору давления имитируются глу-

бины. Жизнедеятельность водолазов при этом поддерживается системой жизнеобеспечения (СЖО). Одной из составных частей этой системы является подсистема измерения биофизических параметров гипербарической среды в отсеках барокамер. Высокие физиолого-технические требования к этим системам обусловлены необходимостью обеспечения безопасности погружений, сохранения здоровья и работоспособности человека [2].

К основным параметрам искусственной гипербарической среды в барокамере относятся: давление ( $P$ , кгс/см<sup>2</sup>), температура ( $t$ , °C), относительная влажность (RH, %), газовый состав ( $O_2$ , He,  $N_2$ ) и подвижность газовой среды, которые влияют на физиологические функции организма. В комплексе эти параметры формируют микроклимат в барокамере и регулируются подсистемой измерения и поддержания этих параметров на заданном уровне [3]. С повышением давления в барокамере допустимые величины концентраций дыхательных газов (кислорода и двуокиси углерода) и вредных примесей, в основном эндогенного происхождения, уменьшаются пропорционально повышению общего давления для сохранения их парциальных давлений на относительно нормальном уровне.

Все эффекты влияния измененной гипербарической газовой среды на организм требуют постоянного и точного газового анализа и измерения физических параметров, так как физиологическое значение измеряемой единицы каждого параметра возрастает с повышением давления в отсеках барокамер. При этом принципы и методы измерений биофизических параметров должны быть адекватными специфическим условиям в барокамере.

Целью данной работы является оценка пригодности и эффективности принципов и методов измерения биофизических параметров среды в барокамерах при давлениях, имитирующих глубины водолазных погружений, для обеспечения безопасности пребывания и работы в условиях гипербарии.

Методы исследования – экспериментальные и теоретические; анализ данных, полученных в экспериментах, при испытаниях и научном использовании средств анализа дыхательных газов и измерения физических параметров среды (давления, температуры, влажности), предназначенных для систем жизнеобеспечения водолазных комплексов и исследовательских барокамер; обобщение опыта исследований принципов и методов измерения биофизических параметров в условиях различных давлений в барокамерах с использованием отечественных и зарубежных разработок.

Результаты работы показали, что далеко не все существующие принципы, методы и способы приемлемы для газового анализа дыхательной среды и измерения физических параметров в барокамерах. Дело в том, что к средствам измерения параметров гипербарической среды предъявляются повышенные требования к их погрешности, чувствительности, стабильности показаний, инерционности датчиков, надежности. Это

при том, что анализируемая искусственная дыхательная смесь, как правило, многокомпонентная, с возможными примесями, которые в ряде случаев могут отрицательно влиять на результат газоанализа при использовании неадекватных условиям методов.

В идеале все измерения биофизических параметров должны бы выполняться при рабочем давлении в барокамере, что предполагает сохранение работоспособности прибора (по крайней мере датчика измеряемого параметра) под повышенным давлением. Альтернативный, хотя и не вполне равноценный, вариант – газовый анализ редуцированной (выпущенной из барокамеры через регулирующий вентиль) смеси при нормальном давлении. Такой способ газового анализа приемлем для контроля среды и в исследовательских целях для расчета показателей дыхательного газообмена до давлений порядка 11 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует глубине 100 м. При больших давлениях применять его следует, используя специальную схему калибровок анализатора минимум по двум точкам и систему подвода анализируемой смеси на участке выпускной вентиль – ячейка датчика. Главное – поверочные смеси должны подаваться на анализатор из барокамеры и быть максимально близкими по составу и величинам компонентов к анализируемым.

Сравнительные исследования способов анализа  $O_2$  и  $CO_2$  показали, что при анализе этих газов в редуцированной смеси их содержание немного занижается: кислорода – в среднем на 0,03 об. % (2,4 мм рт. ст.) на глубине 100 м при работе с гелиевыми смесями в зависимости в основном от гомогенизации дыхательной газовой среды (ДГС) в камере, колебаний температуры и некоторых других факторов [4]. Однако для контроля ДГС, в отличие от расчетов показателей дыхательного газообмена, это особого значения не имеет.

Дыхательная среда в барокамере для длительного пребывания всегда формируется таким образом, чтобы парциальное давление кислорода ( $PO_2$ ) оставалось близким к нормальному во избежание кислородной интоксикации [5]. Для этого процентное содержание кислорода в дыхательной среде должно снижаться пропорционально повышению давления. В результате нормоксическая среда в барокамере на «глубине» 100 м должна иметь не 20,93 об. % кислорода, а 1,971, на 200 м – 1,034, на 300 м – 0,701 об. %  $O_2$ , что соответствует  $PO_2$  на уровне 160 мм рт. ст. Понятно, что величины процентного содержания  $CO_2$  в выдыхаемом и альвеолярном газе в этих условиях

уменьшаются в той же зависимости от давления, но с индивидуальными различиями. Таким образом, для получения корректных результатов чувствительность и разрешение анализаторов  $O_2$  и  $CO_2$  в составе барокамерной СЖО и исследовательского приборного комплекса должны быть в разы выше, а погрешность ниже, чем анализаторов, предназначенных для работы в обычных условиях. Это особенно важно при газоанализе в исследовательских целях, так как абсолютная ошибка в показаниях анализатора по любым причинам, равная, например, 0,02 об. % уже на глубине 100 м, приводит к ошибке в расчетах потребления организмом  $O_2$  и выделения  $CO_2$  в состоянии покоя порядка 5–7%. На больших глубинах даже меньшая ошибка в показаниях прибора имеет большое значение.

Сравнительный анализ результатов исследований показал, что из многообразия физико-химических принципов и методов газового анализа наиболее пригодными для работы по проблемам влияния на функции организма гипербарической среды являются немногие, отвечающие повышенным требованиям. Для анализа кислорода в барокамерах водолазных комплексов применяются парамагнитные и электрохимические принципы, для анализа двуокиси углерода и характерных для барокамерной среды вредных микропримесей – инфракрасные и электрохимические, для дискретного анализа практически любых газов среды в барокамерах – хроматографический и масспектрометрический методы, которые используются в основном в исследовательских целях и как контрольные для ДГС.

Принцип действия парамагнитных анализаторов кислорода основан на измерении парамагнитной восприимчивости кислорода, которая в десятки раз выше, чем у большинства других газов. Особенно велика разница по сравнению с гелием, который является основной составляющей дыхательных газовых смесей при глубоководных погружениях. Поэтому парамагнитный принцип служит наиболее адекватным для анализа кислорода в кислородно-азот-

но-гелиевых средах. Достоинство этого метода состоит в том, что концентрация кислорода отражается на магнитной восприимчивости газовой смеси независимо (за небольшим исключением) от содержания в ней других компонентов. Это позволяет использовать магнитные свойства кислорода для измерения его концентрации и в многокомпонентных газовых смесях. Конструктивно парамагнитный анализатор может быть изготовлен так, что датчик является отдельным от анализатора блоком, который может быть установлен в барокамере и соединен с электронным блоком через гермоввод (герморазъем). Но это возможно лишь при полной компенсации колебаний давления и температуры, поскольку эти параметры влияют на объемную магнитную восприимчивость кислорода, но соблюсти это в условиях повышенного давления в барокамере непросто.

Проблему для анализа кислорода в принципе может представлять наличие в смеси примесей оксидов азота ( $NO$  и  $NO_2$ ), поскольку эти газы обладают магнитными свойствами, но их магнитная восприимчивость в несколько раз ниже кислородной. При использовании для дыхания в барокамере газовых смесей, приготовленных на основе чистых газов из баллонов, что характерно для глубоководных погружений методом ДП, такой проблемы практически нет. Следовые величины оксидов азота в ДГС возможны за счет эндогенной продукции [6], но их влияние на анализ кислорода при нормальном давлении незаметно.

Наиболее пригодным для анализа кислорода при научных исследованиях, включая анализ газов крови, является электрохимический метод полярографического измерения  $PO_2$  в среде высокого давления. В этих экстремальных условиях работоспособность датчика не нарушается при всех используемых при водолазных погружениях уровнях давления в барокамере. Независимо от конструктивного решения такой датчик кислорода состоит из четырех элементов – катода, анода, электролита и мембраны (рис. 1).

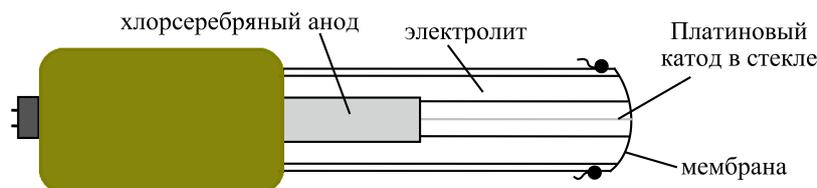
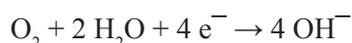
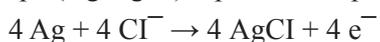


Рис. 1. Принципиальная схема полярографического датчика кислорода

Катод соприкасается с мембраной через прослойку электролита (насыщенный раствор KCl). На электрод подается постоянное напряжение для поляризации катода. Через полипропиленовую или тефлоновую мембрану находящийся в газовой смеси кислород диффундирует в электролит. При появлении в электролите кислорода генерируется ток, величина которого прямо пропорциональна парциальному давлению кислорода. Появление тока является результатом реакции восстановления кислорода на катоде:



Если анод состоит из серебра/хлористого серебра (Ag/AgCl), происходит реакция:



Из этого уравнения видно, что при работе такой электродной системы имеет место расход анода, особенно в режиме непрерывного измерения при нормальном давлении высоких концентраций  $\text{O}_2$ . Это ограничивает срок службы датчика. В условиях гипербарии анод расходуется в той же зависимости от  $\text{PO}_2$ , но уровень гипероксии в среде барокамеры при длительном пребывании невысок, чтобы еще больше сократить срок службы датчика.

Такие датчики отличаются высокой чувствительностью к изменению температуры. При снижении или повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$  регистрируемые величины  $\text{PO}_2$  изменяются на 6–7%. Поэтому при научных исследованиях для анализа кислорода в крови и выдыхаемом газе в барокамеру помещается термостатный блок с датчиком, управляемый электронным блоком, находящимся вне камеры. Для анализа кислорода в дыхательной среде достаточна электронная компенсация температурных влияний с помощью терморезистора, который монтируется в корпусе электрохимической ячейки.

Известна важная особенность электрохимических датчиков – при калибровке кислородно-азотной смесью и последующем анализе кислородно-гелиевой смеси показания кислорода значительно завышаются [7], что может представлять опасность, если это не учитывать.

Практика работы с полярографическими датчиками кислорода в барокамере при давлениях в диапазоне до 300 м вод. ст. в течение месяца показала, что при правильной подготовке датчика к работе в камере и его калибровке по специальной схеме он работает в условиях повышенного, но стабильного давления даже лучше, чем при нормальном давлении. Это обусловлено тем,

что содержащиеся в электролите и на границе мембрана – электролит микропузырьки газа при компрессии сдавливаются, что положительно влияет на качество анализа. Однако обратное происходит при декомпрессии. Остановить процесс образования пузырьков при снижении давления в камере невозможно, за исключением периодов изопрессии, т.е. на декомпрессионных остановках [4]. В некоторых конструкциях датчика для компенсации перепадов давления на его корпусе монтируется специальная гибкая мембрана, но она предотвращает лишь возможную его деформацию и не влияет на работу датчика и качество анализа. Практика показала, что для надежной работы полярографического датчика в барокамере необходимы частые калибровки и замена электролита, что обусловлено изменениями его концентрации в связи с возможным испарением на катодном конце электрода и протечками на уровне мембраны.

Приемлемым для анализа кислорода является и принцип детектирования кислорода керамическим элементом из оксида циркония. Такие датчики отличаются высокой скоростью реакции (до 100 мсек), стабильностью показаний, исключая частые калибровки, большим сроком службы в связи с полным отсутствием подвижных частей.

При высокой температуре окислительный элемент ведет себя как твердый электролит, в цепи которого возникает электродвижущая сила, регистрируемая как напряжение в соответствии с законом Нернста:

$$E = 2,3 \text{ RT}/4\text{F} \text{ Log}_{10} \text{ PmO}_2/\text{PrO}_2 + C,$$

где R – газовая постоянная для чистых газов;

T – абсолютная температура;

F – постоянная Фарадея;

$\text{PmO}_2$  – парциальное давление  $\text{O}_2$  в анализируемой смеси;

$\text{PrO}_2$  – парциальное давление  $\text{O}_2$  в сравнительном газе (окружающей атмосфере);

C – константа измерительной ячейки для данного потока газа.

Если анализ кислорода выполняется при нормальном давлении, сравнительным газом является воздух, в котором содержание кислорода, равное 20,93 об. %, принимается за условный ноль. Диапазон рабочих температур при таком методе анализа может составлять до  $700\text{--}800^\circ\text{C}$ , что практически исключает возможность использования такого анализатора в барокамере под давлением. Но это не снижает его достоинств при работе в условиях нормобарии, поскольку его высокая чувствительность и стабильность показаний позволяют работать практически в любом для барокамерных условий диапазоне измерений.

Из уравнения Нернста видно, что сигнал (напряжение) от измерительной ячейки является логарифмическим, он обратно пропорционален содержанию кислорода в смеси. Поэтому оказывается, что чувствительность анализатора тем выше, чем меньше содержание кислорода в смеси, что позволяет сохранять одну и ту же погрешность в относительных величинах по всей измерительной шкале. С помощью антилогарифмического модуля прибора сигнал преобразуется в линейный, что упрощает считывание результатов анализа.

Принимая во внимание высокую рабочую температуру и материал электрода (платина), при наличии в анализируемой смеси окисляющихся горючих газов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH$ ) результаты анализа не будут полностью соответствовать истине. Но такие примеси, включая их эндогенную долю, в искусственной газовой среде жилой барокамеры бывают на уровне ppm или долей ppm в зависимости от давления (глубины), так как они удаляются непрерывно работающей системой очистки ДГС. К тому же эти примеси извлекаются специальными очистителями на этапе подготовки пробы к анализу.

Таким образом, все основные принципы анализа кислорода имеют преимущества и недостатки, включая парамагнитные, циркониевые и электрохимические [8, 9].

Парциальное давление двуокиси углерода в условиях гипербарии может быть измерено с помощью электрохимического и инфракрасного датчиков. В первом случае  $PCO_2$  измеряется косвенно, через изменения pH электролита в измерительной ячейке.  $CO_2$  из окружающей среды диффундирует через мембрану в электролит, pH электролита изменяется, потенциал между стеклянным и сравнительным электродами датчика изменяется пропорционально логарифму  $PCO_2$  в анализируемой газовой смеси в барокамере.

Зависимость изменений pH и  $PCO_2$  описывается уравнением Гендерсона-Гессельбаха:

$$pH = pK + \text{Log} [HCO_3^-] / a \times PCO_2,$$

где pK – константа диссоциации угольной кислоты;

$[HCO_3^-]$  – концентрация  $HCO_3^-$ ;

a – коэффициент растворимости  $CO_2$  в электролите.

Из уравнения следует, что уменьшение pH электролита на 1 условную единицу приводит к увеличению  $PCO_2$  на 10 единиц.

Такой принцип анализа вполне пригоден для работы в условиях повышенного давления. Этот принцип реализован в конструкции классического  $PCO_2$ -электрода

Северингхауса, который обычно используется в анализаторах газов крови. Такой электрод имеет две мембраны, из которых внутренняя сеточная обеспечивает прослойку электролита между стеклянным pH-электродом и наружной мембраной, что улучшает условия диффузии  $CO_2$  через pH чувствительное стекло на мембранном конце стеклянного электрода. Измерительный блок анализатора располагается вне барокамеры, а сигнал от датчика передается по коаксиальному кабелю на регистратор через специальный гермоввод. Но такой электрод лучше, конечно, использовать в исследовательских целях для анализа  $PCO_2$  в крови и в выдыхаемом газе в комплексе с полярографическим электродом  $PO_2$ .

Наилучшим принципом анализа  $CO_2$  для контроля ДГС и при гипербарических научных исследованиях является поглощение инфракрасного (ИК) излучения двуокисью углерода. Он имеет преимущество по главным показателям: высокая чувствительность – до 0,1 ppm, время реакции измерительной ячейки – до 1 сек, погрешность анализа – до  $\pm 1\%$ . Кроме того, ИК-датчик в принципе может работать в условиях гипербарии, так как сравнительная ячейка и камеры приемника ИК-излучения герметичны. Они изготавливаются обычно из металла, имеют большую массу и поэтому могут выдерживать значительное давление. Оптические окна из монокристалла также не являются проблемой при воздействии внешнего давления. Однако ИК-анализаторы в условиях относительно высокого давления не испытывались. Но при анализе редуцированных смесей ИК-анализаторы являются наиболее подходящими для непрерывного и периодического контроля  $CO_2$  и вредных примесей – окиси углерода (CO) и углеводородов (HC). Для анализа углеводородов оптимальным является и метод ионизации газа пламенем, для анализа окислов азота (NO/NOx) – хемилюминесцентный метод.

Не менее важными биофизическими параметрами среды в барокамере, требующими контроля и поддержания на заданном уровне, являются температура и влажность.

Проверка и сравнительный анализ различных методов измерения температуры в условиях гипербарии показали, что наиболее пригодным и надежным является измерение температуры платиновым термометром сопротивления. Чувствительный термоэлемент представляет собой витую платиновую проволоку, замурованную в стекле в виде тонкого стержня, который помещается в металлической гильзе, заполняемой герметиком с добавлением окиси

алюминия для повышения теплопроводности. Единственным недостатком такого датчика является его значительная инерционность (не менее 1 минуты), обусловленная материалами изоляции чувствительного элемента. Изготовленный таким образом датчик температуры, как показали испытания, сохраняет работоспособность при давлениях в диапазоне до 100 кгс/см<sup>2</sup>. Сигнал передается по кабелю через гермоввод, показания регистрируются цифровым индикатором с разрешением 0,01 °С.

Существующие методы измерения влажности окружающей среды не всегда и не полностью отвечают требованиям применительно к условиям гипербарии. Это связано со специфическим действием на датчик влажности многих факторов. Наиболее приемлемыми для работы под повышенным давлением в барокамере являются методы: психрометрический, точки росы, сорбционный, электролитический датчик влажности.

Психрометрический метод измерения влажности при использовании стандартных таблиц расчета результатов в гипербарической среде немного завышает величины влажности, что исключает возможность использования этого метода при больших давлениях в барокамере. В таких условиях более пригодными являются электролитические датчики. Но и это не лучший по ряду причин метод, но вполне подходящий для измерения относительной влажности под давлением, эквивалентным глубинам примерно до 300 м.

Метод измерения влажности по температуре точки росы по всем параметрам пригоден для работы в барокамере. Испытания гигрометрического датчика зеркального типа в барокамере в диапазоне давлений,

соответствующих глубинам до 1000 м, показали, что он полностью сохраняет свою работоспособность. Принцип его работы заключается в том, что источник света (светодиод) в красном спектре направлен на зеркало, которое находится в термоконтакте с электропреобразователем Пельтье. Когда температура зеркала достигает точки росы, на его поверхности образуется конденсат, вследствие чего отраженный свет, воспринимаемый фотодетектором, ослабевает, и происходит уменьшение фотосигнала. При повышении температуры зеркала происходят испарение влаги и увеличение сигнала. Вмонтированный в зеркало платиновый термометр сопротивления регистрирует температуру точки росы, которая в барокамере повышается в зависимости от давления [10] и может легко корректироваться по табличным и диаграммным данным. По точке росы определяется абсолютная и относительная влажность.

Для обеспечения полного цикла газоанализа и контроля параметров среды необходимо наличие комплекса аппаратуры и оборудования, таких как анализаторы газов, средства подготовки смеси для анализа, оборудование для приготовления калибровочных газовых смесей, их сбора и хранения, компьютеры для обработки результатов анализа и управления средой. Основное требование к комплексу – он должен сохранять свои технические и эксплуатационные характеристики в течение всего времени работы в барокамере.

На рис. 2 представлена принципиальная блок-схема системы, которая совместно с Г.И. Куренковым разработана для контроля среды в исследовательской водолазной барокамере.

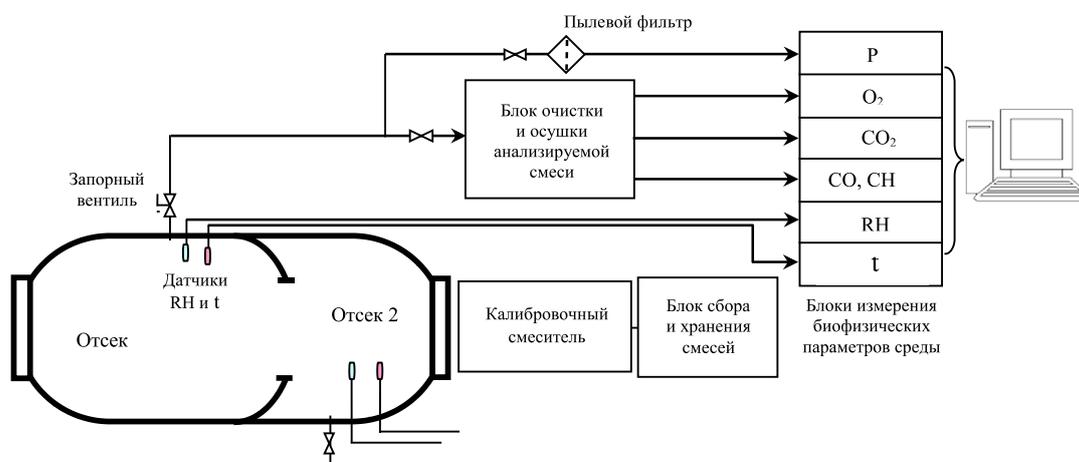


Рис. 2. Принципиальная блок-схема системы газоанализа и измерения биофизических параметров среды в отсеках барокамеры (для отсека 2 блок-схема аналогичная)

Независимо от способа газоанализа (под давлением в барокамере или в редуцированной смеси) схема подачи смеси на анализатор не меняется. Разница состоит лишь в том, что в первом случае при непрерывном газоанализе блок очистки и осушки смеси и датчики газов заключены в специальные боксы, которые монтируются в аппаратных стойках и выдерживают то же рабочее давление, что и в барокамере. Они снабжены побудителем потока смеси через измерительные ячейки датчиков с возвратом ее в камеру. При анализе редуцированной смеси небольшое падение давления в отсеках барокамеры компенсируется общей системой поддержания давления в составе СЖО.

Анализируемая газовая смесь поступает из барокамеры в блоки очистки и осушки. Обработанная для анализа смесь по отдельным пробоотборным линиям подается на анализаторные блоки, входящие в состав приборных стоек, количество которых должно соответствовать количеству отсеков в барокамере гипербарического комплекса.

Система газоанализа комплектуется смесителем для приготовления калибровочных смесей с блоком сбора и хранения смесей в специальных баллонах.

Аналоговые сигналы от контрольно-измерительных приборов поступают на компьютер для обработки информации и управления режимами работы всего оборудования.

### Заключение

Результаты исследований, испытаний и научного использования средств измерения биофизических параметров гипербарической среды показали, что пригодность принципов и методов измерения этих параметров определяется устойчивостью измерительных средств к механическому действию высокого давления и возможностью получения корректных результатов в искусственной газовой среде.

Для анализа дыхательных газов и газов крови ( $O_2$  и  $CO_2$ ) в условиях высокого давления в барокамере наиболее пригодным, особенно для кислорода, является электрохимический принцип анализа. Его достоинство состоит в том, что датчик не подвержен деформации давлением и его чувствительность повышается в прямой зависимости от давления, что позволяет сохранять точность определения показателей дыхательного газообмена в условиях гипербарии.

Анализ кислорода в газовой смеси, поступающей из барокамеры на анализ при нормальном давлении, дает корректные результаты при использовании парамагнитного и циркониевого датчиков, анализ  $CO_{2H}$  характерных для барокамерной среды вредных примесей – инфракрасного. При

давлениях, имитирующих глубины свыше примерно 100 м, применять способ анализа газов в редуцированной смеси следует, используя специальную схему калибровки анализатора. При любом способе газоанализа поверочные смеси должны быть максимально близкими по составу и величинам компонентов к анализируемым.

Сравнительный анализ различных методов измерения температуры в условиях гипербарии показал, что наиболее пригодным, отличающимся точностью, стабильностью работы и надежностью, является измерение температуры газовой среды платиновым термометром сопротивления.

Для измерения абсолютной и относительной влажности в барокамере всем требованиям отвечает принцип, основанный на определении температуры точки росы. Гигрометрический датчик зеркального типа, работающий на этом принципе, полностью сохраняет работоспособность при давлениях, соответствующих глубинам до 1000 м.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2020-0012).*

### Список литературы

1. Чумаков А.В., Мотасов Г.П., Неустроев А.П., Тюрин В.И., Мясникова А.А., Свистов А.С., Бардышева О.Ф., Мордовин И.С., Торшин Г.С., Реймов Д.В., Алпатов В.П. Метод длительного пребывания под повышенным давлением: история развития, направления исследований, перспективы применения // Экология человека. 2010. № 2. С. 17–21.
2. Соколов Г.М., Суворов А.В., Павлов Б.Н. Роль отечественных врачей и биологов в развитии водолазного дела // Освоение морских глубин / гл. редактор Н. Спасский. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2018. С. 457–467.
3. Яхонтов Б.О. Физиологические аспекты обеспечения жизнедеятельности водолазов при повышенном давлении в барокамере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 6. С. 135–139.
4. Яхонтов Б.О., Рогинский К.А. Особенности анализа дыхательных газовых смесей на основе гелия при повышенном давлении в барокамере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8. Вып. 3. С. 421–425.
5. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н., Демчишин М.Д. Глубоководные водолазные спуски и их медицинское обеспечение. М.: Слово, 2004. Т. 2. 723 с.
6. Кузнецова В.Л., Соловьева А.Г. Оксид азота: свойства, биологическая роль, механизмы действия // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21037> (дата обращения 22.06.2020).
7. Drager safety – Методическое руководство. Дефицит кислорода в закрытых помещениях (утечки гелия). [Электронный ресурс]. URL: <https://studylib.ru/doc/2393166/deficit-kisloroda-v-zakrytyh-pomeshheniyah--utechki-geliya> (дата обращения 23.06.2020).
8. Выбор анализатора кислорода для респирометрии. Технологии, используемые для определения содержания кислорода, их преимущества и недостатки. 12.06.2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://vivariy.com/articles/vybor-analizatora-kisloroda-dlya-respirometrii> (дата обращения 19.06.2020).
9. ГОСТ Р 52350.29.2-2010 Взрывоопасные среды. Часть 29-2. Газоанализаторы. Требования к выбору, монтажу, применению и техническому обслуживанию газоанализаторов горючих газов и кислорода. М.: Стандартинформ, 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200081656> (дата обращения 19.06.2020).
10. Физические принципы приборов измерения точки росы. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compressedair.ru/dewpoint/fp.html> (дата обращения 22.06.2020).