

УДК 626.02. 612.2. 543.062

**ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ДЫХАТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
НА ОСНОВЕ ГЕЛИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ В БАРОКАМЕРЕ****Яхонтов Б.О., Рогинский К.А.***ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: giper28@ocean.ru*

Сравнительные исследования способов анализа дыхательных газов в смесях на основе гелия (непосредственно в барокамере при повышенном давлении до 1,08 МПа и в газовой смеси, выпущенной из барокамеры, при нормальном давлении) показали, что имеются различия в результатах анализа. Разница парциальных давлений кислорода составляет в среднем 2,4 мм рт. ст. и не имеет большого значения для контроля кислорода в среде барокамеры. Однако несоответствие результатов анализа O_2 и CO_2 в этих средах имеет научно-методическое значение, так как использование их для расчета показателей дыхательного газообмена у человека в барокамере приводит к существенной разнице величин потребления O_2 и выделения CO_2 . При условии поддержания стабильного давления, гомогенности газовой среды, температуры и влажности в измерительных ячейках датчиков, оптимального расхода смеси при выпуске через вентиль из барокамеры и при использовании высокочувствительных анализаторов эти способы могут применяться в научных целях при изучении дыхательного газообмена.

Ключевые слова: барокамера, повышенное давление, газовый анализ, газообмен, газовые смеси, гелий, кислород, двуокись углерода

**THE PECULIARITIES OF ANALYSIS OF BREATHING GAS MIXTURES BASED
ON HELIUM AT INCREASED PRESSURE IN THE PRESSURE CHAMBER****Yakhontov B.O., Roginsky K.A.***P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, e-mail: giper28@ocean.ru*

A comparative study of the ways of analysis of breathing gas in mixtures based on helium (directly in the pressure chamber at elevated pressure to 1.08 MPa and in gas mixture, released from the pressure chamber, at normal pressure) showed that there are differences in the results of the analysis. The difference in the partial pressures of oxygen averaging 2.4 mm Hg and does not matter much for control of oxygen in environment of the chamber. However, the discrepancy between the results of the analysis of O_2 and CO_2 in these environments has a scientific and methodological importance, as their use for the calculation of indicators of respiratory gas exchange in humans in the chamber leads to a significant difference of consumption values of O_2 and excretion of CO_2 . While maintaining stable pressure, homogeneity of the gas environment, temperature and humidity in the measuring cell sensors, the optimum flow rate of the mixture at release through the valve from the pressure chamber and with the use of highly sensitive analyzers, these ways may be used for research purposes in the study of respiratory gas exchange.

Keywords: pressure chamber, increased pressure, gas analysis, gas exchange, gas mixtures, helium, oxygen, carbon dioxide

Газовый анализ дыхательных смесей на основе гелия является одной из важнейших составляющих системы жизнеобеспечения людей (водолазов, исследователей) длительно, иногда по многу суток, находясь под повышенным давлением в барокамере. Кроме того, количественный анализ газовых смесей является неотъемлемой частью методики исследований дыхательной функции организма, в частности, дыхательного газообмена. Для этого необходимы точные измерения объемных концентраций дыхательных газов (O_2 и CO_2), которые снижаются, примерно, обратно пропорционально повышению давления в барокамере, чтобы парциальные давления сохранялись на уровне, близком к нормальному. Это требует надежного способа, методики анализа и приборов, обеспечивающих измерение сотых и тысячных долей объемных процентов анализируемых газов, что особенно важно при научных исследованиях в усло-

виях гипербарии. Существует два способа анализа при исследованиях в условиях повышенного давления – анализ в барокамере под давлением и анализ той же смеси вне камеры в условиях нормального давления. Оба способа применялись при изучении дыхательного газообмена на имитированных в барокамере глубинах до 300 и более метров [8, 3, 4, 5]. Возможность применения этих способов обосновывалась в основном тем, что при использовании прецизионных газоанализаторов результаты исследований находятся в диапазоне вероятных величин.

Цель исследования – дать оценку способам и методам анализа дыхательных газов непосредственно при повышенном давлении в барокамере и той же смеси при нормальном давлении вне барокамеры.

Материалы и методы исследования

Анализы дыхательных газов в смесях на основе гелия проводились одновременно в барокамере

под давлением 1,08 МПа (11 кгс/см²), имитирующей глубину погружения на 100 метров, обученным водолазом-исследователем и вне камеры при нормальном давлении. В барокамере использовался блок с электрохимическими датчиками (электродами) PO₂ и PCO₂ (Instrumentation Laboratory – Италия) с системой термостатирования. Индикаторный блок располагался вне камеры. Соединения между блоками осуществлялись через герморазъем. Датчики калибровались в барокамере поверочными газовыми смесями для измерения парциальных давлений газов и объемных процентов.

При нормальном давлении вне барокамеры использовался анализатор кислорода с электрохимическим датчиком (OM-11-Beckman, Австрия) и анализатор CO₂ с инфракрасным датчиком (LB-2-Beckman). Анализаторы подключались к усилительной системе для расширения шкал измерений. Определялись объемные проценты газов, которые с учетом давления в камере пересчитывались в парциальные давления. Для проверки влияния результатов анализа в двух средах (повышенное и нормальное давление) на газообмен у испытуемого определяли дыхательный коэффициент (RQ), потребление кислорода (VO₂, л/мин) и выделение углекислого газа (VECO₂, л/мин) по классической методике.

Из барокамеры пробы для анализа отбирались через вентиль тонкой регулировки с тройником на наружной стороне камеры по схеме «со сбросом» с помощью системы отсоса анализаторов, обеспечивающей стабильное давление в измерительных ячейках датчиков.

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее простым является анализ газов в редуцированной (выпущенной из барокамеры через вентиль) смеси при нормальном давлении. Опыт работы многих исследователей показал, что такой способ вполне приемлем для контроля дыхательной среды и анализа газов в научных целях, если человек дышит в барокамере сжатым воздухом или кислородно-азотными смесями [2, 1]. При давлениях в барокамере, когда используются дыхательные газовые смеси (ДГС) на основе гелия, он менее надежен.

Сравнительные исследования способов анализа кислорода показали, что имеются различия в результатах анализа смесей на основе гелия в барокамере и редуцированной смеси (табл. 1). Но как интерпретировать эти результаты, вопрос непростой. Завышаются результаты анализа в барокамере или занижаются при нормальном давлении?

В среднем разница парциальных давлений кислорода (PO₂) при анализах в двух средах составила 2,4 мм рт. ст. Эти результаты трудно связать с какими-то другими причинами, кроме как с неполной гомогенизацией дыхательной среды в камере и попаданием выдыхаемой смеси в зону выпуска пробы из барокамеры на анализ. Нельзя полностью исключить и некоторую сепарацию смеси на уровне проходного сечения в микровентиле в связи с 8-ми кратной разницей молекулярных масс между относительно «тяжелым» кислородом и «легким» гелием. Возможно также влияние и других факторов (градиент давлений на входе и выходе выпускного вентиля, температура, влажность, длина и внутренний диаметр трубки, расход смеси при сбросе через тройник на анализ и в атмосферу). Обнаруженные различия статистически незначимы (P > 0,05). Почти не имеют они и практического значения, так как в водолазной практике парциальные давления кислорода в среде барокамер длительного пребывания измеряются в более грубых единицах – кгс/см². При пересчете получается, что средние величины PO₂ при анализе в барокамере под давлением и при нормальном давлении составляют соответственно 0,24 и 0,23 кгс/см². Такое различие несущественно. К этому следует добавить, что на практике для непрерывного контроля дыхательной среды в барокамерах длительного пребывания способ газового анализа редуцированных смесей не применяется, хотя такие комплексы газоанализа разрабатывались [7], но использовались для периодического анализа. Оптимальный вариант – комплексы непрерывного газового анализа с системой возврата смеси в камеру, в которых датчики находятся в герметичных прочных корпусах, соединенных со средой барокамеры.

Кажущаяся незначительной средняя разница по кислороду (2,4 мм рт. ст., что соответствует 0,03 об. % при давлении в барокамере, полученная при анализе в двух средах, имеет научно-методическое значение, так как при одновременном снижении величин PO₂ и PCO₂ в выдыхаемой смеси, выпущенной из барокамеры, приведет к различию в величинах рассчитываемых показателей газообмена.

Таблица 1

Результаты измерения парциального давления кислорода (PO₂, мм рт. ст.) в среде барокамеры под давлением 1,08 МПа и при нормальном давлении

Условия анализа	№ пробы									M ± σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
В барокамере	198,8	162,0	174,3	175,0	166,2	177,5	158,1	180,6	171,0	173,7 ± 11,93
При нормальном давлении	198,0	157,3	167,9	177,3	162,0	171,7	163,5	178,2	166,1	171,3 ± 12,10

Таблица 2

Показатели газообмена, рассчитанные по результатам газоанализа в барокамере и при нормальном давлении

Условия анализа	PO ₂ во вдыхаемой смеси, мм рт.ст.	PO ₂ в выдыхаемой смеси, мм рт.ст.	PCO ₂ в выдыхаемой смеси, мм рт.ст.	RQ	VECO ₂ , л/мин	VO ₂ , л/мин
В барокамере	171,0	145,1	21,03	0,81	0,283	0,349
При нормальном давлении	166,1	142,0	19,40	0,80	0,262	0,328

Выделение CO₂ из организма при использовании для расчетов результатов анализа редуцированной смеси было снижено у испытуемого на 7,4%, а потребление кислорода на 6,0% (табл. 2). Конечно, эти изменения газообмена не связаны с дыхательной функцией организма. Это результат влияния исключительно способа, методики газового анализа. В противном случае различий в показателях газообмена быть не должно, потому что анализируется одна и та же смесь.

Все приведенные в таблицах изменения парциальных давлений в пересчете на объемные проценты составляют сотые и тысячные доли относительно давления в барокамере. При больших давлениях эти величины должны быть еще меньше. Поэтому при газовом анализе редуцированной смеси чувствительность анализатора должна быть, примерно, во столько раз выше, во сколько раз повышается давление в барокамере.

Интересно, что при повышенном давлении чувствительность электрохимических (полярнографических) датчиков повышается пропорционально давлению. Например, при нормальном давлении (PO₂-150 мм рт.ст.) 1 мм рт.ст. кислорода соответствует 0,14 об.%, под давлением 11 кгс/см² (глубина 100 м) – 0,0124 об.%, под давлением 21 кгс/см² (глубина 200 м) – 0,0065 об.%. То есть, при анализе в барокамере такие величины объемной доли кислорода могут быть измерены, но для анализа редуцированной смеси необходим высокочувствительный и точный анализатор.

Таким образом, электрохимический метод прямого полярнографического измерения парциального давления кислорода в барокамере является наиболее пригодным как для контроля среды, так и для научных исследований. Экспериментально установлено и подтверждено на практике, что полярнографический датчик (электрод Кларка) сохраняет свою работоспособность при любых применяемых в водолазной и исследовательской практике давлениях в барокамере [6]. Практикой нашей

работы с такими датчиками кислорода в барокамере при давлениях в диапазоне до 3,04 МПа (31 кгс/см²) установлено, что при аккуратной подготовке датчика к работе и его калибровке непосредственно в камере под давлением он работает в условиях повышенного, но стабильного давления, даже лучше, чем при нормальном давлении. Стабильность показаний и воспроизводимость величин парциальных давлений кислорода значительно выше. Это обусловлено в основном тем, что неизбежно содержащиеся в электролите микропузырьки газа при компрессии сдвливаются, что положительно сказывается на качестве анализа. Однако обратное происходит при декомпрессии и остановить процесс образования пузырьков при снижении давления невозможно, за исключением периодов изопрессии, то есть на декомпрессионных остановках.

Для измерения парциального давления двуокиси углерода в условиях гипербарии также являются эффективными электрохимические датчики. CO₂ из газовой пробы диффундирует через мембрану в электролит. При этом pH электролита изменяется, потенциал между стеклянным pH-электродом и сравнительным электродом также изменяется пропорционально логарифму PCO₂ в анализируемой смеси. Датчик, функционирующий по такому принципу, достаточно стабильно работает при повышенном давлении в барокамере. Небольшая, но решаемая, проблема связана с удлинением кабеля и передачей сигнала от электрода PCO₂ через герморазъем.

Вообще, по опыту исследований в условиях гипербарии, надо отметить, что анализаторные системы с электрохимическими датчиками (электродами PO₂ и PCO₂) прошлых поколений более пригодны для работы в условиях повышенного давления, поскольку могут легко модифицироваться для работы в барокамере. К тому же, это тот случай, когда полная автоматизация процесса анализа является излишней.

Лучшими для анализа кислорода в редуцированных смесях являются парамаг-

нитные и электрохимические датчики. Для анализа CO_2 – инфракрасные. Для анализа кислорода применяется и метод, основанный на детектировании кислорода с помощью керамического элемента из окиси циркония. Преимущество таких датчиков – быстрое действие, высокая стабильность показаний и относительно большой срок службы. Диапазон рабочих температур при таком методе анализа составляет $600-850^\circ\text{C}$, что исключает возможность его использования в барокамере. Но в условиях нормобарии его высокая чувствительность и точность позволяют работать практически в любом диапазоне измерений.

При любом способе газоанализа важным условием является использование для калибровки анализаторов таких же по составу и близкий к анализируемой смеси по количественному соотношению компонентов поверочных газовых смесей, подаваемых к измерительным ячейкам датчиков по возможно более короткой пробоотборной трубке.

Основным недостатком редуцирования является понижение давления в барокамере при выпуске газовой смеси в атмосферу. Это особенно заметно при работе со смесями на основе гелия. Общий расход смеси в зависимости от расхода через анализаторы, сброса в атмосферу и давления в камере может составлять до 3 и более литров в минуту. Это много, учитывая, что продолжительность эксперимента может выражаться в часах. В результате адиабатического расширения температура смеси заметно снижается. Проходя через короткую пробоотборную трубку, она не успевает нагреться, попадая в ячейку датчика, что приводит к ошибке анализа.

Небольшое снижение давления в барокамере – процесс постоянный. Даже без учета неизбежных шлюзований, заборов проб для других анализов, возможных утечек, постоянное, хотя и медленное, снижение давления обусловлено дыханием находящихся в барокамере людей. Кислород потребляется организмом, а выдыхаемая двуокись углерода удаляется непрерывно работающей системой очистки. Потребление кислорода приводит к снижению его объемного содержания в дыхательной среде замкнутого объема. Это при одновременном понижении давления сопровождается и постоянным снижением PO_2 в барокамере. Скомпенсировать эти процессы системой поддержания этих параметров в реальном времени непросто. Снижение давления в барокамере от ис-

ходных 1,08 МПа (11 кгс/см² или 8059 мм рт.ст. сухой смеси) всего на 20 мм рт. ст. (это 0,027 кгс/см², или 0,27 м глубины) и объемной доли кислорода на 0,03 об. % приведет к снижению PO_2 в дыхательной среде на 2,8 мм рт. ст., что вместе со снижением PCO_2 и PO_2 в редуцированной выдыхаемой смеси существенно повлияет на расчетные показатели газообмена. В таких нестабильных условиях добиться совпадения результатов газового анализа одной и той же смеси в барокамере и при нормальном давлении сложно. Больше шансов получить ошибочные результаты анализа все-таки в барокамере. В замкнутом объеме под повышенным давлением есть много источников ошибок. Там имеют место постоянные, хотя и довольно медленные колебания величин физических параметров среды. Главное – это давление, температура и влажность, которые влияют на функционирование электрохимических датчиков. Небольшое изменение этих параметров среды искажает результаты анализа и требует обязательной перекалибровки анализатора. Даже незначительное для организма снижение давления сопровождается появлением микропузырьков газа в электролите и на границе электролит-мембрана, что приводит к ошибке в результатах измерения парциальных давлений газов. Это может быть одной из главных причин вышеописанных различий в парциальных давлениях газов при анализе в этих двух средах.

Заключение

Способы анализа дыхательных газов в смесях на основе гелия (непосредственно в барокамере при повышенном давлении и при нормальном давлении вне барокамеры) могут применяться в научных целях при изучении дыхательного газообмена при условии соблюдения всех тонкостей методики газоанализа в этих средах. Особенно важным является поддержание стабильного давления, гомогенности газовой среды, температуры и влажности в барокамере и в измерительных ячейках датчиков, а также оптимального расхода смеси при выпуске через вентиль из барокамеры. В итоге можно добиться хороших результатов в большом диапазоне давлений, что показано в крупных исследованиях с использованием различных газовых смесей [5]. Для анализа дыхательных газов в редуцированной смеси с целью расчета показателей дыхательного газообмена одним из главных условий является наличие высокочувствительных прецизионных анализаторов.

Список литературы

1. Гуляр С.А. Респираторные и гемодинамические механизмы регуляции кислородных режимов организма человека при гипербарии: Автореф. дис. докт. мед. наук. – Киев, 1983. – 47 с.
2. Куренков Г.И., Яхонтов Б.О. Потребление кислорода при напряженной мышечной работе в условиях повышенного атмосферного давления // Физиологический журнал СССР им. И.М. Сеченова. – 1971. – Т. 57, № 12. – С. 1813–1816.
3. Действие гипербарической среды на организм человека и животных / Г.И. Куренков, Б.О. Яхонтов, А.В. Сыровегин и др. – Вып.: Проблемы космической биологии [под ред. акад. В.Н. Черниговского]. – М.: Наука, 1980. – Т. 39. – 259 с.
4. Функциональное состояние некоторых физиологических систем организма человека при дыхании неона-кислородной смесью на глубинах до 400 метров / И.П. Полещук, А.М. Генин, Р.Д. Унку и др. // Физиологический журнал АН Украинской ССР. – 1991. – Т. 37, № 4. – С. 3–11.
5. Суворов А.В. Дыхание и газообмен человека в условиях высокой плотности газовой среды: Автореф. дис. докт. мед. наук. – Москва, 1998. – 44 с.
6. Яхонтов Б.О. Методы газового анализа при повышенном давлении в барокамере // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. XI Международ. науч.-техн. конф. – Ч. 2. – М., 2009. – С. 31–35.
7. Real time analysis systems of the physical parameters of the environment and the state of a human organism for a long term exposure at different gas mixtures and pressure up to 100 bar / G.I. Kurenkov, A. Le Levier, B.O. Jachontov, A.V. Rozhkov // Proceedings of the Space Sea Colloquium. (Paris, 24-26 september 1990. ESA SP-312). – Paris, 1990. – P. 31–35.
8. Respiratory gas exchange in normal men breathing 0,9% oxygen in helium at 31,3 ata / E.M. Overfield, H.A. Saltzman, J.A. Kylstra, J.V. Salzano // J. Appl. Physiol. – 1969. – Vol. 27, № 4. – P. 471–475.