

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.048

DOI 10.34131/MSF.21.2.35-59

ПОДДЕРЖАНИЕ ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ ОБИТАЕМЫХ ГЕРМОМОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

А.С. Гузенберг, А.В. Юргин, С.Ю. Романов,
А.Г. Железняков, А.А. Бурлакова

Канд. техн. наук А.С. Гузенберг; А.В. Юргин; докт. техн. наук С.Ю. Романов;
канд. техн. наук А.Г. Железняков; канд. биолог. наук А.А. Бурлакова
(ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва)

В статье рассмотрено влияние содержания углекислого газа (CO_2) в атмосфере на здоровье человека и вопросы очистки атмосферы от него в условиях гермокабин космических станций. Показано, что в соответствии с физиологией дыхания CO_2 – газ, необходимый для дыхания человека, который становится токсической примесью, когда его содержание превысит барьер в альвеолах легких человека 40 *мм рт. ст.* (5,3 %) и, соответственно, в артериальной крови 46–49 *мм рт. ст.* (6,0–6,5 %), что вероятно происходит при превышении содержания CO_2 в атмосфере ~7,6 *мм рт. ст.* (1,0 %). Эти номинальные величины в альвеолах легких и крови, возникшие при зарождении жизни, когда содержание CO_2 в атмосфере Земли было на порядки выше, чем в наш период, существуют у всех живых существ с легочным дыханием. При понижении в альвеолах легких и в артериальной крови человека содержания CO_2 меньше указанного происходит кислородное голодание человека даже при высокой концентрации кислорода в крови. Применение CO_2 для дыхания в медицине, авиации, физкультуре также не поддерживает мнение о влиянии на здоровье человека CO_2 при содержании в атмосфере менее 7,6 *мм рт. ст.* Данные исследований НАСА связи между уровнями CO_2 в атмосфере МКС менее 6,0 *мм рт. ст.* (0,8 %) и головными болями астронавтов этой связи не доказывают. Необоснованное снижение НАСА нормативов содержания CO_2 до 2,0–3,0 *мм рт. ст.* требует значительного увеличения количества систем очистки от CO_2 на космической станции. В настоящее время в соответствии с протоколом токсикологической подгруппы AQS международной группы ММОР не существуют научно обоснованные нормативы по содержанию CO_2 в атмосфере космических объектов, для их обоснования требуются дальнейшие научные исследования испытателей и космонавтов.
Ключевые слова: содержание CO_2 , атмосфера гермокабин, влияние CO_2 на человека, очистка атмосферы от CO_2 , нормативы CO_2 .

Maintaining Allowable Concentration of Carbon Dioxide in the Atmosphere of Habitable Pressurized Modules of Space Stations.

A.S. Guzenberg, A.V. Yurgin, S.Yu. Romanov, A.G. Zheleznyakov, A.A. Burlakova

The paper discusses the effect of carbon dioxide (CO₂) concentration in the atmosphere on human health and issues of removing it from the atmosphere under conditions of pressurized modules of space stations. It is shown that, according to respiratory physiology, CO₂ is a gas essential for human respiration, which turns into a toxic contaminant, when its concentration exceeds the threshold of 40 mm Hg (5.3 %) in human lung alveoli, and, accordingly, of 46–49 mm Hg (6.0–6.5 %) in arterial blood, what occurs probably when CO₂ content in the atmosphere is ≈7.6 mm Hg (1.0 %). These nominal values, which arose at the origin of life, when CO₂ content in the Earth's atmosphere was orders of magnitude greater than now, can be observed in all living things that breathe with lungs. Whenever CO₂ concentrations in human air vesicles and arterial blood go below these values, the human experiences oxygen deprivation, even when there is a high oxygen concentration in the blood. The use of CO₂ for breathing in medicine, aviation, and athletics also does not support the opinion that CO₂ content in atmosphere below 7.6 mm Hg affects human health. Data from NASA studies of the link between CO₂ levels in the ISS's atmosphere below 6.0 mm Hg (0.8 %) and astronauts' headaches does not prove this link. NASA's unfounded lowering of standards for CO₂ content down to 2.0–3.0 mm Hg requires an increase in the number of systems for CO₂ scrubbing onboard the space station. At present, according to the minutes of AQS toxicological subpanel of the international MMOP panel, no scientifically proven standards currently exist for CO₂ content in the atmosphere of space vehicles; their substantiation requires further scientific studies conducted by testers and cosmonauts.

Keywords: CO₂ content, atmosphere inside pressurized cabins, impact of CO₂ on humans, scrubbing CO₂ from atmosphere, CO₂ standards.

Роль углекислого газа в земных условиях

В земной атмосфере содержится 0,23–0,30 мм рт. ст. (0,03–0,04 %) углекислого газа (CO₂), что обусловлено его участием в кругообороте веществ. Источником CO₂ в газовой среде герметической кабины является человек, так как CO₂ – один из основных конечных продуктов обмена, образующихся в процессе метаболизма в его организме. В среднем человек в сутки выделяет около 480 л (960 г) CO₂, при физической работе выделение его из организма возрастает в несколько раз [1]. Процесс удаления CO₂ из организма через легкие регулируется дыхательным центром – отделом головного мозга, управляющим внешним дыханием. Главным физиологическим стимулом дыхательного центра является углекислый газ. Регуляция дыхания обуславливает поддержание нормального содержания CO₂ в альвеолярном воздухе и артериальной крови.

У здоровых людей в соответствии с физиологией дыхания в каждый момент времени уровень вентиляции легких (частота и глубина дыхания)

таков, что CO_2 удаляется из организма ровно в таком количестве, чтобы его всегда оставалось в альвеолах легких ~ 40 мм рт. ст. (5,3 %), что обеспечивает в артериальной крови содержание CO_2 40–46 мм рт. ст. (5,3–6,0 %) (рис. 1). Здоровый организм не допускает снижения CO_2 ниже этого диапазона, однако по последним данным нормой может считаться повышение до 49 мм рт. ст. (6,5 %) (рис. 2) [2, 3, 4].

Эти номинальные величины в альвеолах легких и крови, возникшие при зарождении жизни, когда содержание CO_2 в атмосфере Земли было на порядки выше, чем в наш период, существуют у всех живых существ с легочным дыханием.

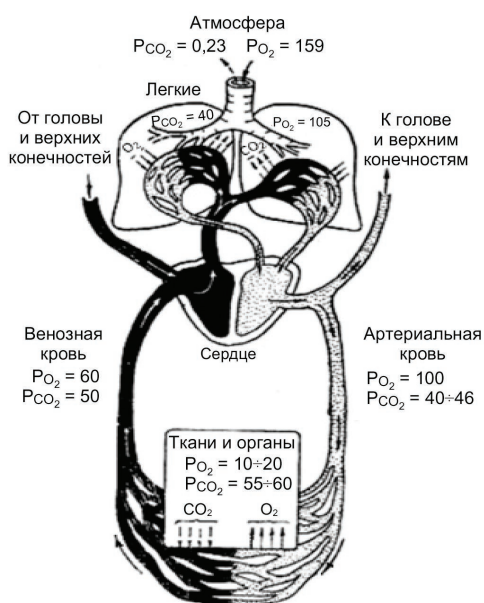


Рис. 1. Дыхание и кровообращение человека (в мм рт. ст.)

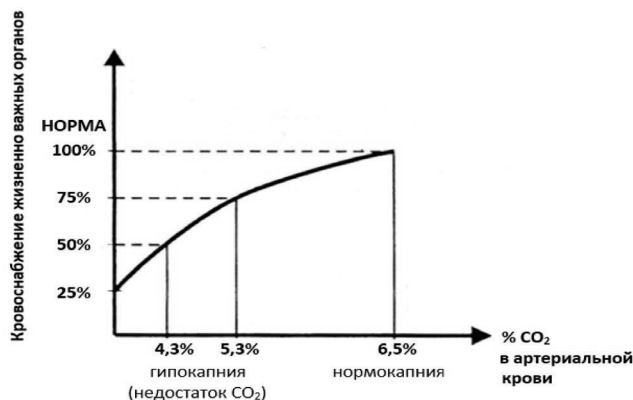


Рис. 2. Кровоснабжение жизненно важных органов человека

В соответствии с физиологией дыхания CO_2 – газ, необходимый для дыхания человека, который становится вредной примесью, начиная с концентраций, превышающих земную атмосферную приблизительно в 40–50 раз.

Учеными было установлено (эффект Вериги-Бора), что без присутствия диоксида углерода кислород не может высвободиться из связанного состояния с гемоглобином, что затрудняет переход кислорода из капилляров в ткани и приводит к кислородному голоданию организма даже при высокой концентрации кислорода в крови. Дыхательный центр гораздо более чувствителен к повышению уровня углекислого газа, чем к нехватке кислорода [2, 3, 4, 5].

В норме дыхание стимулируется повышением уровня углекислого газа в крови, при его увеличении дыхание становится более глубоким и частым. При мышечной работе усиливаются процессы окисления, и выделяется больше углекислого газа. Кровь с избытком углекислого газа раздражает дыхательный центр, возбудимость повышается, человек начинает дышать чаще и глубже, избыток углекислого газа удаляется, недостаток кислорода восполняется. При уменьшении темпа дыхания все происходит наоборот.

Таким образом, углекислый газ при содержании повышенном, но не достигающем токсических значений:

- затрудняет переход кислорода из капилляров в ткани при снижении своего парциального давления в крови и альвеолярном воздухе (в соответствии с эффектом Вериги-Бора);
- является расширителем кровеносных сосудов;
- стимулирует дыхание за счет повышения своего уровня в крови;
- усиливает мышечные сокращения (сердце и мышцы);
- поддерживает кислотно-щелочное равновесие – рН крови.

При месячном нахождении молодых здоровых мужчин в гермокамере с содержанием CO_2 7,6 мм рт. ст. (1,0 %), согласно данным С.Г. Жарова и других [5, 6], у испытуемых не было обнаружено изменений рН крови, несмотря на увеличение на 8–12 % легочной вентиляции, свидетельствующее о незначительном компенсируемом газовом ацидозе (ацидоз – нарушение кислотно-щелочного баланса организма с увеличением кислотности и уменьшением рН его сред).

В исследованиях с участием испытуемых было также установлено, что в случаях длительного пребывания в гермокамере с содержанием CO_2 , превышающим 7,5–10,0 мм рт. ст. (0,99–1,30 %), несмотря на видимое сохранение нормального физиологического состояния и работоспособности, у испытуемых отмечались изменения метаболизма, обусловленные развитием умеренного газового ацидоза [5, 6].

Длительное пребывание (30 дней) испытуемых в гермокамерах с повышенным содержанием CO_2 до 15,2 мм рт. ст. (2,0 %) приводило к снижению рН крови (развитие ацидоза), увеличению легочной вентиляции на 20–25 %, а также росту CO_2 в артериальной крови (с целью поддержания в допустимых пределах). В условиях покоя испытуемые чувствовали себя хорошо,

однако при выполнении интенсивной физической нагрузки некоторые из них предъявляли жалобы на головную боль и быстрое утомление [5, 6].

При нахождении в гермокамере с содержанием CO_2 22,8 мм рт. ст. (3,0 %) большинство испытуемых отмечало ухудшение самочувствия, вентиляция легких возрастала почти в 2 раза. При этом изменения рН крови свидетельствовало о быстром развитии некомпенсированного газового ацидоза. Пребывание в такой среде связано с развитием дискомфорта и прогрессирующим снижением работоспособности [5, 6]. При повышении в гермокамере содержания CO_2 до 38–60 мм рт. ст. (5,0–8,0 %) у испытуемых наблюдалось увеличение легочной вентиляции в 7–8 раз [7].

Изучение длительного влияния на организм человека и животных повышенных величин содержания CO_2 в гермокамере позволило установить, что появлению клинических симптомов хронического токсического действия CO_2 предшествует развитие дыхательного ацидоза, приводящего к нарушению метаболизма. При этом возникают сдвиги в минеральном обмене, которые направлены на сохранение кислотно-щелочного равновесия рН крови.

В результате этих исследований было сделано заключение о том, что длительное (многомесячное) пребывание человека в гермокамере с содержанием CO_2 , превышающим 7,5 мм рт. ст. (0,99 %), является нежелательным, так как может привести к проявлению гиперкапнии – повышенному содержанию углекислого газа в артериальной крови, вызывающему токсическое воздействие на организм.

Рост легочной вентиляции при гиперкапнии является основной приспособительной реакцией организма, направленной на поддержание содержания CO_2 в альвеолах легких и артериальной крови на нормальном уровне. Эффективность этой реакции по мере увеличения содержания CO_2 в атмосфере снижается, так как несмотря на возрастающее усиление легочной вентиляции начинает возрастать и содержание CO_2 в артериальной крови. Характер функциональных сдвигов при гиперкапнии определяется содержанием CO_2 во вдыхаемой газовой смеси и временем воздействия этого фактора на организм.

Таким образом, при оценке в целом эффекта хронического влияния гиперкапнии были выделены три основных уровня повышения содержания CO_2 в гермокамере, которые определяют различную переносимость человеком гиперкапнии [3, 4, 5, 6, 7].

Первый уровень соответствует повышению содержания CO_2 в гермокамере до 4,0–6,0 мм рт. ст. (0,53–0,79 %), он характеризуется отсутствием сколько-нибудь значимого влияния на организм.

Второй уровень соответствует повышению содержания CO_2 в гермокамере до 11,0 мм рт. ст. (1,45 %). При этом основные физиологические функции и работоспособность не претерпевают значительных изменений, однако имеет место медленное развитие сдвигов со стороны дыхания, регуляции кислотно-щелочного равновесия крови и обмена электролитов, в результате чего могут возникать патологические изменения.

Третий уровень – повышение содержания CO_2 до 22,0 *мм рт. ст.* (2,90 %) и выше – приводит к снижению работоспособности, выраженным сдвигам физиологических функций и развитию через различные сроки времени патологических состояний.

Нормирование углекислого газа

Гигиеническими нормативами РФ в 2006 году введена максимально разовая (предельно допустимая концентрация) ПДК 10,5 *мм рт. ст.* (1,38 %) и среднесменная 3,5 *мм рт. ст.* (0,46 %) по содержанию CO_2 для воздуха рабочей зоны производственных помещений. Для сравнения: в США эти цифры составляют 22,8 *мм рт. ст.* (3 %) и 3,8 *мм рт. ст.* (0,5 %) [8].

Одним из широко применяемых способов для определения требуемой интенсивности воздухообмена в общественных зданиях является использование углекислого газа в качестве индикатора качества воздуха. По его концентрации судят о содержании других веществ, выделяемых человеком, которых в относительных концентрациях образуется меньше. Чтобы воздух оставался чистым, достаточен обмен с внешней атмосферой из расчета 30 $\text{м}^3/\text{ч}$ на одного человека. Такие исходные данные закладываются при проектировании вентиляционных систем служебных, а также жилых помещений. Как можно понять, такой расход устанавливается прежде всего для очистки воздуха от микропримесей, а в этом случае он обеспечивает не более 0,76 *мм рт. ст.* (0,10 %) CO_2 .

Первым отечественным документом, в котором предпринята попытка регламентировать содержание CO_2 в наружном и внутреннем воздухе, является стандарт АВОК [9]. Верхний допустимый предел содержания CO_2 в помещениях жилых и общественных зданий не должен превышать содержание в наружном воздухе на 0,49 *мм рт. ст.* (0,064 %), то есть будет составлять 0,72–0,79 *мм рт. ст.* (0,95–1,04 %). В этом случае требуемый воздухообмен на 1 человека составит те же $\sim 30 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, наиболее вероятно, что норматив содержания углекислого газа в помещениях жилых и общественных зданий был принят на основе расхода для удаления микропримесей. Этому предшествовали многочисленные отечественные и зарубежные работы, которые противоречили физиологии дыхания, поскольку в них утверждалось об опасности содержания углекислого газа менее 0,76 *мм рт. ст.* (0,10 %).

Одной из первых в этой области работ была в 60-х годах прошлого века диссертация О.В. Елисеевой по исследованию влияния углекислого газа при содержаниях от 0,76 *мм рт. ст.* (0,10 %) до 3,80 *мм рт. ст.* (0,50 %) на организм человека, в которой автор пришла к выводу, что кратковременное дыхание углекислым газом здоровыми людьми в этих концентрациях вызывает отчетливые сдвиги в функции внешнего дыхания, кровообращения и значительные ухудшения электрической активности головного мозга. Согласно

ее рекомендациям, содержание углекислого газа в воздухе жилых и общественных зданий не должно превышать $0,76 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,10 \%$), а среднее содержание CO_2 должно быть около $0,38 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,05 \%$) [10]. В работе О.В. Елисеевой предложены следующие уровни влияния содержания CO_2 :

– до $0,30 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,04 \%$) – идеальный для здоровья и хорошего самочувствия человека;

– $0,30\text{--}0,46 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,04\text{--}0,06 \%$) – нормальное качество воздуха, рекомендовано для детских комнат, спален, школ и детских садов;

– $0,46\text{--}0,76 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,06\text{--}0,10 \%$) – появляются жалобы на качество воздуха, у людей, страдающих астмой, могут учащаться приступы;

– выше $0,76 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,10 \%$) – общий дискомфорт, слабость, головная боль, концентрация внимания падает на треть, может вызывать проблемы с дыхательной и кровеносной системами;

– выше $1,52 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,20 \%$) – количество ошибок в работе сильно возрастает, до 70% сотрудников не могут сосредоточиться на работе.

Эта работа появилась почти за 30 лет до работ Н.А. Агаджаняна и сотрудников [7], подтвердивших необходимость и пользу углекислого газа в содержаниях до $7,6 \text{ мм рт. ст.}$ ($1,0 \%$) при поддержании его содержания в альвеолах легких $\sim 40 \text{ мм рт. ст.}$ Однако публикации отечественных и зарубежных работ о вредном воздействии углекислого газа при содержании $0,46\text{--}1,52 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,06\text{--}0,20 \%$) продолжают без учета эффекта Вериге-Бора и после публикации работ Н.А. Агаджаняна и сотрудников. Появились статьи о многочисленных измерениях углекислого газа в школьных и студенческих аудиториях с выводами о токсическом влиянии углекислого газа при малых содержаниях до $1,0\text{--}1,5 \text{ мм рт. ст.}$ При этом вредные микропримеси в атмосфере этих помещений не измерялись, их влияние не оценивалось, также не оценивалось состояние здоровья каждого из этих испытуемых [11, 12, 13].

Углекислый газ в физиологии дыхания, практическое использование углекислого газа

В соответствии с физиологией дыхания для того, чтобы углекислый газ стал токсической примесью и оказывал вредное влияние на здоровье человека, должно, прежде всего, повыситься его содержание в альвеолах легких более 40 мм рт. ст. ($5,3 \%$), только тогда повысится его содержание в артериальной крови более $46\text{--}49 \text{ мм рт. ст.}$ ($6,0\text{--}6,5 \%$). Однако при повышении содержания углекислого газа повышаются частота и глубина дыхания, восстанавливающие барьер 40 мм рт. ст. , при этом, как указывалось выше, только при $7,6 \text{ мм рт. ст.}$ ($1,0 \%$) частота дыхания увеличивается на $10\text{--}12 \%$, и только после этого отмечалось развитие умеренного газового ацидоза. Таким образом, при содержании углекислого газа в атмосфере менее $7,6 \text{ мм рт. ст.}$ содержание его в крови не увеличивается, и вредного влияния на здоровье человека углекислый газ оказать не может.

Практическое регулирование и использование CO_2 для дыхания также не поддерживает мнение о влиянии на здоровье человека указанных выше его малом содержании. Так после открытия роли углекислого газа его начали добавлять в газовые смеси аквалангистов, чтобы стимулировать работу дыхательного центра.

Этот же принцип используют в медицине при наркозе и при искусственной вентиляции легких. Капнометрия (измерение CO_2 во вдыхаемом и выдыхаемом воздухе), наряду с пульсоксиметрией (спектрофотометрический способ оценки количества гемоглобина в крови), является обязательной для любой общей анестезии. Альвеолярная вентиляция обычно устанавливается так, чтобы обеспечить нормокапнию (нормовентиляция) – то есть CO_2 в альвеолах легких должен находиться в диапазоне 36,0–43,0 мм рт. ст. (4,8–5,7 %), при уровне CO_2 ниже 34,0 мм рт. ст. (4,5 %) возникает гипокапния при наркозе со слишком высокой альвеолярной вентиляцией (гипервентиляцией). Гипервентиляция является распространенной практикой при ИВЛ пациента для обеспечения адекватной оксигенации и даже для углубления наркоза, что приводит к избыточному дыхательному алкалозу (повышению рН крови, увеличение щелочности) и к более трудному и продолжительному восстановлению в посленаркозный период [14].

Вопросы о серьезных патологических сдвигах в связи с гипервентиляцией появились после катастроф и гибели пилотов при высотных полетах. Было показано, что гипервентиляция чистым кислородом сопровождается снижением мозгового кровотока и нарастанием концентрации молочной кислоты в тканях мозга, что связано в первую очередь с гипокапнией – понижением содержания CO_2 в крови [15].

В условиях земной атмосферы с возрастом человека (из-за изменения образа жизни в том числе) содержание CO_2 в альвеолах легких и в крови человека уменьшается, и при падении до 3,5 % (~27,0 мм рт. ст.) из-за сужения капилляров человеку угрожает инсульт и инфаркт. Для расширения капилляров производится увеличение содержания CO_2 в альвеолах легких и в крови за счет дыхательных методик или устройств. Проведенные исследования газового состава крови больших групп населения разных возрастов позволили сделать однозначный вывод о причине постоянного спазма микрососудов – гипертонии артериол. У большинства обследованных пожилых людей в состоянии покоя в артериальной крови содержится 3,6–4,5 % (27–34 мм рт. ст.) углекислого газа (при норме 6,0–6,5 % или 46–49 мм рт. ст.). Таким образом, были получены фактические доказательства того, что одной из причин многих хронических недугов, характерных для пожилых людей, является потеря их организмом способности постоянно поддерживать в артериальной крови нормальное содержание углекислого газа и наступление гипокапнии [16].

В то же время, когда в организме углекислого газа вырабатывается больше, чем организм может выделить легкими, создается режим гиперкапнии. Применение в спортивных занятиях кратковременного дыхания умеренной

гиперкапнической газовой смесью способствует активизации функции внешнего дыхания и кровообращения. Отмечалось ускорение восстановления кардиореспираторных функций и повышение работоспособности спортсменов-легкоатлетов в состоянии утомления. Вдыхание гиперкапнической смеси повышало уровень вентиляторной реакции, что сопровождалось более быстрыми темпами ликвидации кислородного долга и задержкой CO_2 в организме [17, 18]. На этом основании кратковременное дыхание заданной гиперкапнической газовой смесью применяется в качестве физиологического средства активизации функций внешнего дыхания и кровообращения, ускорения протекания восстановительных процессов, повышения мышечной работоспособности. Даже однократное применение гиперкапнических смесей может приводить к превышению индивидуального максимума аэробной работоспособности. Для указанных целей рекомендован воздух, содержащий CO_2 от 2,5 до 3,5 % [19, 20].

Углекислый газ в атмосфере обитаемой космической станции

На борту космической станции при повышенном содержании CO_2 по отношению к земному для сохранения содержания CO_2 в альвеолах легких 40 мм рт. ст. (5,3 %) возрастает количество вдохов-выдохов (а также глубина дыхания) для вымывания лишнего CO_2 . При содержании CO_2 7,6 мм рт. ст. (1,0 %), как указывалось выше, увеличение частоты дыхания человека достигает 10–12 %. Чем выше содержание CO_2 в атмосфере станции, тем чаще дыхание для поддержания 40 мм рт. ст. в альвеолах, а при достижении CO_2 в атмосфере ~8–10 мм рт. ст. и более частоты дыхания человека вероятно не хватает, содержание CO_2 в альвеолах легких возрастает более 40 мм рт. ст., соответственно, возрастает его содержание в артериальной крови выше 49 мм рт. ст. (6,5 %), и диоксид углерода начинает действовать как вредная примесь. До тех пор, пока содержание CO_2 в альвеолах легких не возрастет более 40 мм рт. ст., а в артериальной крови, соответственно, более 49 мм рт. ст., CO_2 не может оказывать на человека токсического воздействия.

К сожалению, мы вынуждены писать «вероятно», так как величины содержания CO_2 при переходе его из необходимого для дыхания газа в токсическую для человека примесь не определены. Поэтому в настоящее время в космической технике нет научно обоснованных нормативов, определяющих предельное содержание CO_2 в атмосфере обитаемых гермомодулей для длительных полетов [21].

В течение более тридцати лет российские и иностранные космонавты летали на станциях «Салют», «Мир» и МКС (на последней – до 2008 года) при среднем содержании CO_2 ~6,0 мм рт. ст. (0,8 %) в атмосфере и не жаловались на головную боль (6,0 мм рт. ст. среднесуточно – российский стандарт годовой, 5,3 мм рт. ст. – 0,7 % – в течение пяти суток – американский

стандарт полугодовой [22]). Содержание CO_2 6,0–6,5 *мм рт. ст.* (0,80–0,85 %) было обычным при экспедициях на станцию «Мир» в течение 15 лет (только два космонавта имели зависимость от таких уровней CO_2). Эти результаты позволили установить в 1995 году российский годовой норматив равным 6,0 *мм рт. ст.* (0,8 %) [1, 23, 24].

Нормативы по содержанию CO_2 определяются документами 1 и 2, а оперативное управление полетом станции в части поддержания CO_2 определяется документами 3 и 4 (табл. 1).

Таблица 1

Нормативы и параметры управления CO_2

№	Документ	Норматив	Дата	Согласование с РКК «Энергия»
1	SSP 41163 Спецификация		с 2000 г.	согласовано
2	SSP 50623 Стратегия совместного использования системы регулирования окружающей среды и обеспечения жизнедеятельности (JEFS)	5,3 <i>мм рт. ст.</i> (среднее за 5 суток) с пиками до 7,6 <i>мм рт. ст.</i>	с 2008 г.	согласовано
			с 2000 г.	согласовано
3	B13-53 Медицинское правило полета	4,5 <i>мм рт. ст.</i> (среднесуточное)	с 2008 г.	не согласовано
		4,0 <i>мм рт. ст.</i> (среднесуточное)	с 2014 г.	не согласовано
4	B17-5 Техническое правило полета	определяет только работу систем для поддержания уровней по B13-53	с 2000 г.	согласовано

Требования по снижению уровня CO_2 были выдвинуты НАСА в 2008 г. в связи с субъективными жалобами некоторых астронавтов на наличие головной боли при согласованных уровнях содержания CO_2 5,0–6,0 *мм рт. ст.* При этом медицинского обследования экипажа для определения возможных причин головной боли не проводилось.

В дальнейшем на каждую экспедицию НАСА извещением подтверждало необходимость поддержания в атмосфере МКС содержания CO_2 не более 4,5 *мм рт. ст.* Эти требования выполнялись с использованием российских регенерационной системы «Воздух» и поглотительных нерегенерируемых фильтров.

В 2013 г. НАСА был разработан новый вариант полетного правила B13-53, в котором был принят предельный среднесуточный уровень содержания CO_2 в атмосфере МКС 4,0 *мм рт. ст.* В апреле 2014 года новое правило было утверждено без согласия РКК «Энергия». При этом американская сторона обратилась в РКК «Энергия» с требованием поддерживать макси-

мальное содержание CO_2 в пределах от 3,2 до 3,3 *мм рт. ст.* Однако жалобы отдельных астронавтов на головную боль продолжались [25, 26].

В настоящее время содержание CO_2 в атмосфере МКС поддерживается менее 3,0 *мм рт. ст.*, при этом жалобы ряда астронавтов на головную боль продолжают. В связи с этим можно было ожидать дальнейшей корректировки летного правила американской стороной с дальнейшим уменьшением содержания диоксида углерода. Так в американском стандарте (SMAC) для продолжительности полета 1000 суток содержание CO_2 установлено 2 *мм рт. ст.* [22].

Величины содержания CO_2 ниже 6,0 *мм рт. ст.* специалистами НАСА экспериментально обоснованы не были.

В связи с отдельными сообщениями о связанных с содержанием CO_2 симптомах на борту МКС НАСА была проанализирована связь между CO_2 и головными болями в полете.

В первом отчете, на который ссылаются специалисты НАСА, была сделана попытка обработки летных данных американских астронавтов на МКС. Однако рекомендацией этого отчета явилась ссылка на некоторую корреляцию между головной болью и содержанием CO_2 и на необходимость продолжения бортовых исследований [27].

В 2014 году появилась статья по подробному исследованию связи между уровнями углекислого газа в атмосфере МКС и головными болями астронавтов, которой руководствуются специалисты НАСА [28].

В исследование были включены данные по астронавтам, которые выполняли полет на МКС между 14 марта 2001 года и 31 мая 2012 года. Были получены сообщения о головной боли и данные измерений CO_2 , были определены средние арифметические и максимальные значения для 24-часового и 7-дневного периодов. Логистическая регрессия смоделировала связь между CO_2 и вероятностью головной боли с учетом возраста на момент запуска, истекшего времени полета и с учетом уровня CO_2 . Головные боли, случающиеся после первой недели космического полета, не учитывались.

Основным средством контроля CO_2 , использовавшимся в этом исследовании, был масс-спектрометр MCA (Major Constituent Analyzer) с точностью измерения $\pm 0,45$ *мм рт. ст.*, российский газоанализатор ИК0501 не использовался.

Всего было 46 жалоб астронавтов на головную боль, в 1670 случаях жалоб не было. Жалобы на головную боль были в двух случаях на ранней стадии: один раз, когда члены экипажа работали в ограниченном пространстве с недостаточным количеством воздуха, а другой – когда все члены экипажа собрались в одном месте. Кроме того, экипаж сообщал о повышении работоспособности, когда уровни CO_2 были низкими. Несмотря на то, что число случаев головной боли составило 2,7 %, в статье сделан вывод о повышенной чувствительности к CO_2 в полете. В качестве подтверждения этого вывода в статье приводятся данные, что частота головных болей была 3,3 %

до экспедиции 23 и затем снизилась до 1,6 % после выполнения требования о поддержании содержания CO_2 не более 4 мм рт. ст.

В случае, когда CDRA был отключен во время оценки российской системы «Воздух», содержание CO_2 повысилось до 6,2 мм рт. ст. Экипаж не знал о повышенных уровнях содержания CO_2 , но наземные операторы заявили, что экипаж в это время выглядел раздраженным. Один из членов экипажа сообщил об усталости, назвав ее нетипичной по сравнению с утомлением в течение обычного рабочего дня. Он также сказал, что чувствовал себя лучше утром, когда был включен CDRA, а также в течение следующих дней. Авторы статьи считают, что эти примеры предполагают возможную связь между концентрацией CO_2 и ухудшением сна, раздражительностью и утомляемостью. Исследование предполагает, что более высокие уровни CO_2 связаны с головной болью, раздражением слизистой оболочки, снижением работоспособности.

В статье указывается также, что влияние возраста члена экипажа на момент запуска и время в полете обратно пропорционально числу жалоб на головную боль.

На основе анализа сообщений экипажей в статье указываются другие возможные причины головной боли: заложенность носа из-за повышенного содержания пыли в некоторых полетах, различия в индивидуальной чувствительности, адаптация к космическим условиям и другие факторы, которые могут увеличивать сосудистый застой.

В статье специалистов НАСА также указывается в качестве причины возникновения головной боли воздействие CO_2 во время транспортировки к МКС на корабле «Союз», содержание которого по сообщениям экипажа превышало 20 мм рт. ст., хотя ни в одном полете корабля «Союз» содержание CO_2 не превышало 6 мм рт. ст.

В этой статье указано, что члены экипажа МКС проходят подготовку воздействием CO_2 перед каждым полетом, чтобы определять свои собственные симптомы реакции на содержание CO_2 (они дышат в дыхательный мешок, содержащий 100 % кислорода, заменяют кислород на CO_2 , который они выдыхают до достижения 8 % CO_2). Считается, что наличие или отсутствие развития головной боли во время такой наземной подготовки может быть показателем индивидуальной чувствительности к головной боли, вызываемой CO_2 , что вызывает сомнение.

В данной статье специалистами НАСА предложено для удержания риска возникновения головной боли ниже 1 % средний семисуточный уровень CO_2 поддерживать ниже 2,5 мм рт. ст.

В статье приводится кривая зависимости головной боли астронавтов от содержания CO_2 в гермообъеме. В соответствии с этой кривой при полетах на станции «Мир» и МКС до 2009 г. при содержании CO_2 до 6,0 мм рт. ст. должны были быть жалобы на головную боль и снижение работоспособности от отечественных экипажей, но их практически не было.

В конце статьи, однако, делается заключение, что одних приведенных в ней результатов недостаточно для определения нового стандарта SMAC по CO_2 и что токсикологическая группа должна будет оценить приведенные исследования, а также влияние CO_2 на здоровье экипажей (помимо головных болей) для установления новых значений SMAC. Было указано также, что нужна более масштабная работа для выяснения влияния CO_2 в космическом полете (рис. 3).

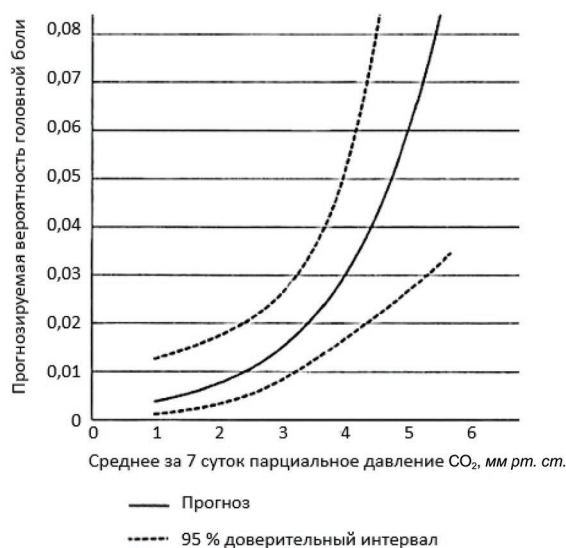


Рис. 3. Прогнозируемая головная боль в зависимости от содержания CO_2 [28]

Полученные телеметрические данные не могут быть обработаны корректно, так как неизвестно, в каком модуле и в какое время находились члены экипажа. Кроме того, показания анализатора зависят еще и от того, в каком модуле работает система очистки от CO_2 . В модуле, где система не работает, содержание CO_2 выше на величину до 0,5–1,0 мм рт. ст., так как величина вентиляционного потока между модулями ограничена. Пользоваться средней величиной содержания CO_2 в атмосфере гермомодулей, а тем более средней 7-суточной величиной, да еще при значительной разнице в содержании CO_2 между «днем» и «ночью» экипажа некорректно с медицинской точки зрения – на человека воздействует конкретная концентрация углекислого газа, а не его средняя величина.

Для оценки параметра по выборке – она должна быть случайной, а определение реализации параметра на выборке – точным («по посетителям женской парикмахерской нельзя определять соотношение полов в городе»). Необходимо помнить вариант теоремы Байеса (одна из основных теорем теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимосвязанное

с ним событие): «если ложность теста сравнима с долей позитивно тестируемых элементов выборки, о точности определения этой доли можно забыть раз и навсегда».

Головная боль – как фактор воздействия

В медицине известно около 200 причин возникновения головной боли (цефалгии). Это может быть повышение или понижение артериального давления, патология церебральных сосудов, заболевания позвоночника, сосудов мозга, опухоли мозга, интоксикация [29].

«Международная классификация головных болей» (МКГБ-2, 2004 г.), опубликованная Международной ассоциацией по изучению головных болей, содержит перечень диагностических критериев, позволяющих определить патологию, вызывающую головную боль. Классификация МКГБ-2 представляет собой многоуровневый список, к первому уровню которого относятся 13 основных групп головных болей [30, 31].

В классификации головных болей, разработанной Национальными институтами здравоохранения США, представлено описание 5 категорий головных болей. К первичным головным болям отнесены боли, не связанные с органическими или структурными заболеваниями (боль может быть самостоятельным заболеванием или одним из симптомов – тогда она считается вторичной). Согласно этой классификации, головные боли разделены на сосудистые, миогенные, цервикогенные (при патологии анатомических структур в области шеи), боли, связанные с механическим воздействием на рецепторы, и боли, связанные с инфекционными заболеваниями.

Всемирная организация здравоохранения утверждает: от головной боли страдает от 50 до 75 % взрослого населения Земного шара. Боль бывает разной: более и менее интенсивной, пульсирующей, давящей, острой или тупой, а ее очаг может локализоваться в разных частях головы. По статистике в течение года 90 % людей хотя бы раз испытывают головную боль, а приблизительно у 1 % пациентов, попадающих в отделение интенсивной терапии, головная боль является причиной какого-либо заболевания. В более чем 90 % случаев у больных диагностируют первичные головные боли, наиболее распространенной формой является эпизодическая – головные боли напряжения, прежде всего мигрень. Приступам мигрени подвержены от 12 до 18 % населения Земли [32].

Количество людей, страдающих периодически на Земле от головной боли при содержании в атмосфере $0,23 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,03 \%$) CO_2 , превышает предлагаемые НАСА данные в графике зависимости головной боли космонавтов от содержания CO_2 [28]. При этом в этих статьях НАСА при анализе указанные классификации болей никак не используются.

Возможная причина головной боли астронавтов – прежде всего влияние невесомости, связанное с приливом крови к голове, кроме этого:

- дыхание астронавта в значительной степени выдыхаемым воздухом с повышенным содержанием CO_2 (при неподвижной деятельности, во сне и т.д.);
- вхождение астронавта в гермомодуль, атмосфера которого содержит повышенное содержание CO_2 ;
- заболевание астронавта на Земле из-за нарушения регулирования обмена O_2 - CO_2 .

Нет оснований считать, что физиология дыхания в космических условиях в отношении углекислого газа значительно отличается от земных. Косвенные признаки самочувствия человека, в частности, головная боль, причин которой до 200, не могут дать однозначных сведений о влиянии содержания CO_2 на здоровье экипажей.

Подгруппа по качеству атмосферы (AQS) международной Многосторонней группы медицинских операций (ММОП) МКС в своем протоколе в 2017 г. констатировала, что в настоящее время нет согласованных научно обоснованных нормативов по содержанию CO_2 в атмосфере космических объектов и что для их обоснования нужны дальнейшие научные исследования [21].

Необходимы прямые исследования артериальной крови астронавтов, а также выдыхаемого воздуха на содержание CO_2 до полета, во время полета и после полета, только после этого можно обсуждать и устанавливать обоснованные нормативы по уровню содержания CO_2 в атмосфере станций для длительного космического полета.

Влияние содержания углекислого газа в атмосфере обитаемой космической станции на характеристики систем очистки от углекислого газа

Поддержание содержания CO_2 штатно обеспечивается двумя американскими сорбционными регенерационными системами CDRA (штатно работает одна система) и одной российской сорбционной регенерационной системой «Воздух» [26]. Одна американская система при 6 членах экипажа поддерживает на МКС не более 4 *мм рт. ст.* Совместно с российской системой американская система поддерживает на МКС содержание CO_2 не более 3 *мм рт. ст.* Одна же российская система при тех же условиях (выделение диоксида углерода шестью членами экипажа 150 л/ч) на форсированном режиме поддерживала содержание CO_2 ~7,6 *мм рт. ст.* (1 %) [33].

Американская система проектировалась для поддержания CO_2 в пределах 5,3 *мм рт. ст.* в среднем за 5 суток при 7 членах экипажа, российская система – для поддержания CO_2 – 6 *мм рт. ст.* среднесуточно для 3 членов экипажа (рис. 4).

Система «Воздух» обеспечивает очистку атмосферы МКС от диоксида углерода на всех этапах пилотируемого полета с ноября 2000 года. В апреле 2019 года она была заменена на модифицированную систему с увеличенным более чем в 1,3 раза коэффициентом эффективности.

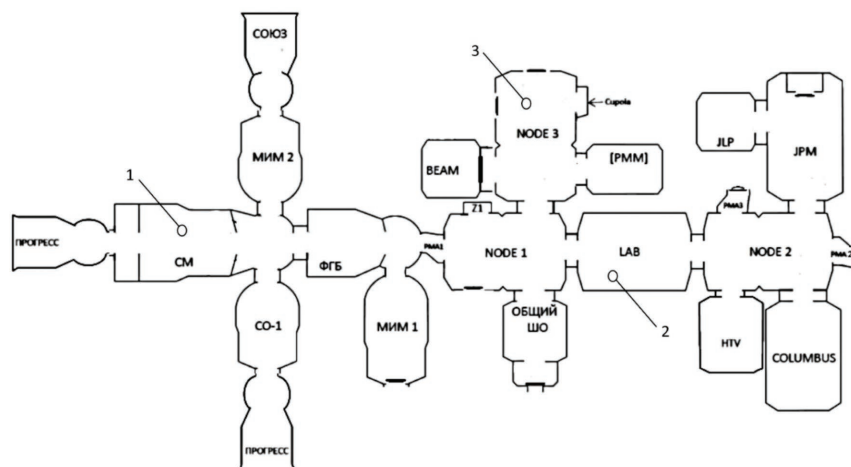


Рис. 4. Средства поддержания CO_2 на МКС: 1 – российская система очистки от CO_2 ; 2, 3 – американские системы очистки от CO_2

При этом, до 2009 г. американская система CDRA работала только при экспедициях посещения. Поскольку обе системы являются сорбционными, уменьшение содержания CO_2 в атмосфере гермообъема ведет к уменьшению их эффективности по поглощению CO_2 и требует увеличения количества сорбента и увеличения расхода очищаемого воздуха [26].

Наиболее простым способом увеличения количества сорбента в этом случае является подключение параллельно дополнительного поглотительного фильтра, в противном случае производительность системы падает. Чем меньшее значение содержания газовой примеси в атмосфере требуется поддерживать при ее постоянном выделении в гермомодуле, тем больше должен быть расход воздуха. Увеличенный расход воздуха, в свою очередь, требует увеличения массы сорбента и энергопотребления, а также увеличивает акустическую характеристику системы очистки.

Похожая ситуация существует с CDRA или с другими сорбционными системами, а для систем другого типа всегда остается вопрос увеличения расхода воздуха через систему, то есть в любом случае ведет к увеличению массы и энергопотреблению системы очистки, что практически приводит к увеличению их количества на космической станции.

Таким образом, снижение содержания CO_2 на миллиметры, представляющееся медицинским специалистам простым вопросом, для инженеров оказывается проблемой.

Рассмотрим этот вопрос на примере российской системы «Воздух», проанализировав ее эффективность при уменьшении содержания CO_2 в атмосфере гермообъема.

На рис. 5 показаны характеристики системы «Воздух» модификаций до 2019 г. и с 2019 г. по скорости удаления CO_2 для основного и форсированного

режимов. Основной режим – работа на 3 поглотительных патронах, с циклом 30 мин и расходом воздуха 27 м³/ч, форсированный режим – с циклом 10 мин. При модификации удалось увеличить динамическую активность поглотителя CO₂ на ~15 %. Одновременно новые режимы виброуплотнения позволили добавить на 10–15 % большее количество сорбента в поглотительный патрон без изменения его конструкции. Таким образом производительность модифицированной системы с 2019 г. повысилась на 25–30 % по сравнению с системой с 2000 г. по 2019 г. Дальнейшее повышение производительности одной системы без существенных изменений ее конструкции в модуле СМ крайне ограничено отведенным лимитом электропотребления и занимаемого объема. Как видно на рис. 5, двигаясь, например, вдоль линии поз. 12, соответствующей обеспечению 3 человек, линии режимов поз. 1, 2, 3, 4 пересекают ее в точках поз. 13 (рабочие точки). Абсциссы точек поз. 13 соответствуют среднесуточному парциальному давлению CO₂, поддерживаемому в соответствующем режиме.

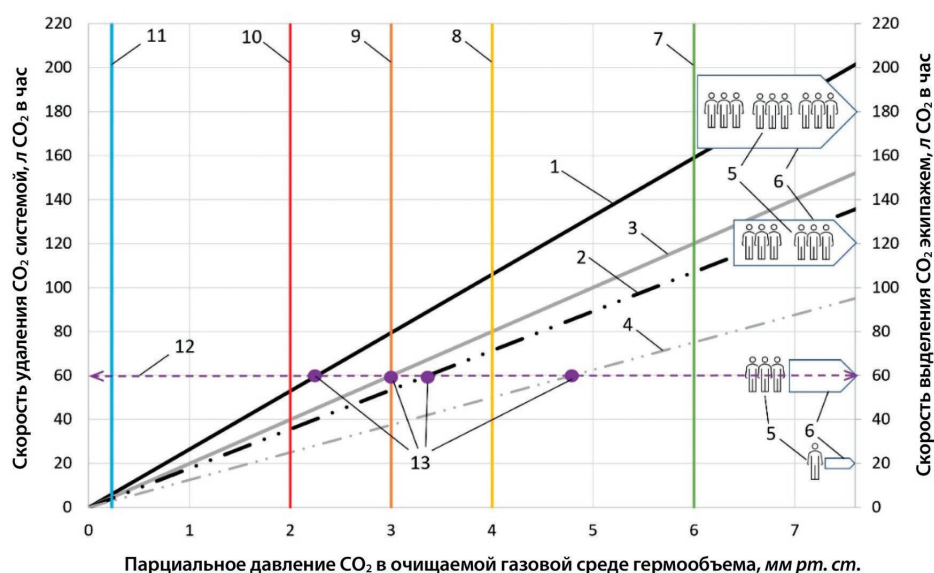


Рис. 5. Производительность системы «Воздух»

1, 2, 3, 4 – производительность системы «Воздух»: 1 – (с 2019 г.) в форсированном режиме; 2 – (с 2019 г.) в основном режиме; 3 – (до 2019 г.) в форсированном режиме; 4 – (до 2019 г.) в основном режиме; 5 – количество членов экипажа; 6 – среднесуточная скорость выделения CO₂ экипажем, с допуском ±10 %; 7 – норматив по стратегическим документам МКС SSP41163, SSP50653, годовой норматив по ГОСТ Р 50804-95 и ISO16726:2018; 8 – норматив по медицинскому полетному правилу МКС В13-53; 9 – норматив по СНИТ (отступление от полетного правила); 10 – перспективный норматив НАСА по CO₂ (на 1000 сут.); 11 – содержание CO₂ в атмосфере Земли; 12 – линия соответствия (равенства) скорости выделения CO₂ экипажем и скорости удаления системой; 13 – рабочие точки системы «Воздух» на пересечении линий производительности режима и линии соответствия скорости выделения экипажем и скорости удаления системой

Чем ниже содержание CO_2 требуется поддерживать, тем более производительный режим системы или переход на несколько систем необходим. Снижение текущего норматива 6 мм рт. ст. (российский и международный нормативы) до уровня земной атмосферы – 0,23 мм рт. ст. потребует использования нескольких систем очистки с соответствующей массой, электропотреблением и занимаемым объемом. В таблице 2 и на рис. 6 представлены данные расчета потребного количества систем в зависимости от уровня поддержания CO_2 .

Таблица 2

Количество систем для удаления диоксида углерода, выделяемого экипажем из 3 человек

CO_2 мм рт. ст.	CO_2 %	Экспериментальные данные по удалению CO_2 российской системой, (цикл 30/10 мин, 3 фильтра), л/ч		Требуемое количество российских систем, шт.	
		До апреля 2019 г.	С апреля 2019 г.	До апреля 2019 г.	С апреля 2019 г.
6,0 (норматив)	0,800	75/120	107/159	1	1
5,0	0,650	62/100	89/133	1-2	1
4,0	0,500	50/80	71/106	2	1
3,0	0,400	37/60	53/80	2-3	1-2
2,0	0,250	25/40	36/53	3-4	2
1,0	0,130	12/20	18/27	5-6	3-4
0,5	0,065	6/10	9/13	12	6-7
0,23 (содержание в воздухе земной атмосферы)	0,030	3/5	4/6	21	14

Примечание. Количество систем рассчитывается из среднесуточного выделения CO_2 25 л/ч [33], при этом количество систем определялось с возможностью временного включения форсированного режима.

Как видно из таблицы 2 и рис. 6, при понижении требуемого уровня содержания CO_2 в атмосфере гермообъема количество систем увеличивается по кривой, близкой к экспоненте. Для поддержания земного содержания CO_2 в пределах 0,23 мм рт. ст. на МКС при 3 членах экипажа требуется ~14 систем «Воздух» модификации с 2019 г. (или 21 система «Воздух» модификации до 2019 г., или ~8 систем CDRA) их массой, объемом, энергетикой и стоимостью. Из этих же данных следует, что для поддержания на МКС 6 мм рт. ст. для шести человек требуется только одна система «Воздух» или одна система CDRA.

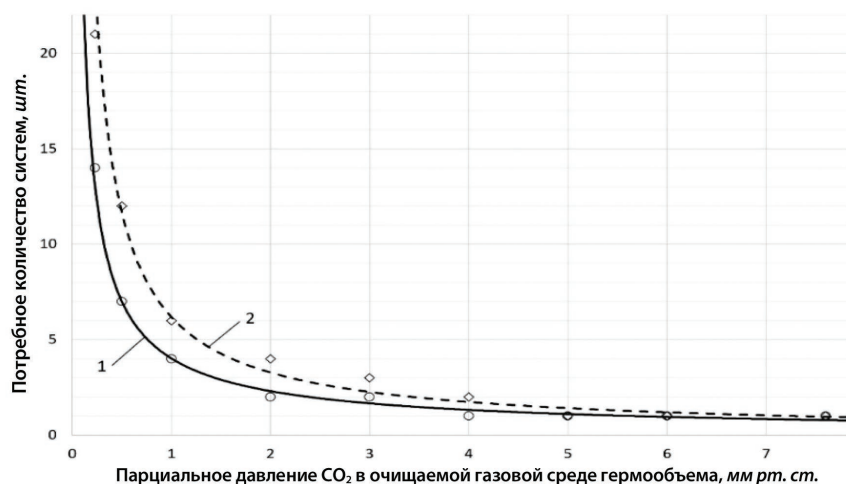


Рис. 6. Зависимость необходимого количества российских систем «Воздух» от поддерживаемого парциального давления диоксида углерода. Сплошная кривая – для системы после 2019 г., пунктирная кривая – для системы до 2019 г. (точки рассчитаны по экспериментальным данным системы в соответствии с ее производительностью)

Выводы

1. В соответствии с физиологией дыхания CO₂ – газ, необходимый для дыхания человека, который становится вредной примесью приблизительно с содержанием, превышающих 7,6 мм рт. ст. (1,0 %); при содержаниях, не достигающих токсических значений, CO₂ расширяет кровеносные сосуды и поддерживает кислотно-щелочное равновесие pH крови.

В соответствии с эффектом Вериге-Бора при уменьшении содержания CO₂ ниже номинальной в альвеолах легких (40 мм рт. ст., 5,3 %) и в артериальной крови (46–49 мм рт. ст., 6,0–6,5 %) у человека происходит кислородное голодание организма даже при высокой концентрации кислорода в крови (эти номинальные величины существуют у всех живых существ с легочным дыханием – у млекопитающих, птиц и др., возникшие при зарождении жизни, когда содержание CO₂ в атмосфере Земли было на порядки больше чем в наш период).

Для того чтобы углекислый газ стал токсической примесью, должно повыситься его содержание в альвеолах легких более номинального 40 мм рт. ст., с соответствующим повышением его содержания в артериальной крови более номинального 49 мм рт. ст. Но при повышении содержания углекислого газа в атмосфере гермообъема по сигналу в дыхательный центр в мозгу человека от поступающего на дыхание с воздухом углекислого газа повышается частота и глубина дыхания, восстанавливающие барьер 40 мм рт. ст. И только после повышения содержания углекислого газа

в атмосфере вероятно более $7,6 \text{ мм рт. ст.}$ ($1,0 \%$) в земных условиях отмечалось начало его вредного влияния на здоровье человека – развитие газового ацидоза.

Практическое применение CO_2 для дыхания также не поддерживает мнение о влиянии на здоровье человека его содержания в атмосфере менее $7,6 \text{ мм рт. ст.}$ ($1,0 \%$):

- после открытия роли углекислого газа его начали добавлять в газовые смеси аквалангистов, чтобы стимулировать работу дыхательного центра;
- в медицине при наркозе и при искусственной вентиляции легких альвеолярная вентиляция устанавливается так, чтобы обеспечить содержание CO_2 в альвеолах легких в диапазоне $36,0\text{--}43,0 \text{ мм рт. ст.}$ ($4,8\text{--}5,7 \%$).

2. Статья по исследованию связи между уровнями углекислого газа в атмосфере МКС и головными болями астронавтов, которой руководствуются специалисты НАСА [28], этой связи не доказывает. Существующие телеметрические данные не могут быть обработаны корректно, так как неизвестно, в каком модуле МКС и в какое время находились члены экипажа. Пользоваться средней величиной содержания углекислого газа в атмосфере гермомодулей, а тем более средней 7-суточной величиной при значительной разнице в содержании углекислого газа между модулями станции и между «днем» и «ночью» экипажа некорректно с медицинской точки зрения – на человека воздействует конкретная концентрация углекислого газа, а не ее средняя величина. В исследование были включены данные по астронавтам, которые выполняли полет на МКС между 14.03.2001 г. и 31.05.2012 г. Всего было 46 жалоб астронавтов на головную боль, в 1670 случаях жалоб не было. В статье также приведено утверждение, что нужна более масштабная работа для выяснения влияния CO_2 в космическом полете.

В течение более тридцати лет российские и иностранные космонавты летали на станциях «Салют», «Мир» и МКС (на последней – до 2008 года) при среднем содержании $\text{CO}_2 \sim 6,0 \text{ мм рт. ст.}$ ($0,8 \%$) в атмосфере и не жаловались на головную боль.

Возможная причина головной боли астронавтов – прежде всего влияние невесомости, связанное с приливом крови к голове, кроме того, дыхание астронавта выдыхаемым воздухом с повышенным содержанием CO_2 (при неподвижной деятельности, во сне и т. д.).

Косвенные признаки самочувствия человека, в частности, головная боль, причин которой до 200, не могут дать однозначных сведений о влиянии содержания CO_2 на здоровье экипажей.

3. Снижение нормативов содержания CO_2 на миллиметры, представляющееся медицинским специалистам простым вопросом, для инженеров оказывается проблемой из-за необходимости увеличения количества систем очистки от углекислого газа на борту космической станции, так как:

- понижается поглотительная характеристика сорбента, что ведет к увеличению массы сорбента в сорбентной системе очистки;

– требуется увеличение расхода воздуха в любой системе очистки, что ведет к увеличению энергопотребления и массы системы очистки.

Так для поддержания земного содержания CO_2 в пределах $0,23 \text{ мм рт. ст.}$ на МКС при 3 членах экипажа требуется ~14 систем «Воздух» модификации с 2019 г. или ~8 систем CDRA с их массой, объемом, энергетикой и стоимостью, а для поддержания на МКС $6,0 \text{ мм рт. ст.}$ для шести человек требуется только одна система «Воздух» или одна система CDRA.

В настоящее время содержание CO_2 в атмосфере МКС поддерживается менее $3,0 \text{ мм рт. ст.}$, при этом жалобы ряда астронавтов на головную боль продолжают. В американском стандарте (SMAC) для продолжительности полета 1000 суток содержание CO_2 установлено 2 мм рт. ст. . Величины содержания CO_2 ниже $6,0 \text{ мм рт. ст.}$ специалистами НАСА экспериментально обоснованы не были.

4. Подгруппа по качеству атмосферы (AQS) международной Многосторонней группы медицинских операций (ММОП) МКС в результате в своем протоколе в 2017 г. констатировала, что в настоящее время нет согласованных научно обоснованных нормативов по содержанию CO_2 в атмосфере космических объектов и что для их обоснования нужны дальнейшие научные исследования.

5. Необходимы прямые исследования артериальной крови и выдыхаемого воздуха на содержание CO_2 испытателей в гермообъемах и членов экипажей до космического полета, во время полета и после полета.

Только результаты этих исследований дадут возможность установить нормативы по уровню содержания CO_2 в атмосфере станций для длительного космического полета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. – М.: Госстандарт России, 1995. – 118 с.
- [2] Агаджанян Н.А., Смирнов В.М. Физиология дыхания // Нормальная физиология. – М.: Медицинское информационное агентство, 2009. – С. 52–59.
- [3] Камкин А.Г., Киселева И.С. Атлас по физиологии. В двух томах. – Т. 2: учеб. пособие, 2012. – 448 с.
- [4] Высотное оборудование самолетов / Л.Т. Быков, М.С. Егоров, П.В. Тарасов. – М.: Оборонгиз, 1958. – С. 392.
- [5] Мишустин Ю.Н. Выход из тупика. Ошибки медицины исправляет физиология. – Самара: ООО «Самарский дом печати», 2010. – 80 с.
- [6] Изучение длительного воздействия на человека атмосферы с повышенным содержанием CO_2 / Жаров С.Г., Ильин Е.А., Коваленко Е.А. и др. // Авиационная и космическая медицина / Под ред. В.В. Парина. – М., 1963. – С. 182–185.
- [7] Агаджанян Н.А., Елфимов А.И. Функции организма в условиях гипоксии и гиперкапнии. – М.: Медицина, 1986. – 272 с.

- [8] Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.2100-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (дополнение N 2 к ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны).
- [9] АВОК СТАНДАРТ – 1 2002. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. – М. АВОК-ПРЕСС, 2002.
- [10] Елисеева О.В. Биологическое действие двуокиси углерода на организм человека и гигиеническая оценка ее содержания в воздухе общественных зданий [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Центр. ин-т усовершенствования врачей. – Москва, 1964. – 18 с.
- [11] Гурина И.В. // Химия и жизнь. – 2010. – № 2. – С. 22–25.
- [12] Seppanen O.A., Fisk W.J. and Mendell M.J. Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. *Indoor Air*, 1999.
- [13] D.S. Robertson. Health Effects of Increase in Concentration of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Current science*, vol. 90, No 12, June 25, 2006.
- [14] Основы CO₂ мониторинга. Практическое руководство (по материалам фирмы Datex). – Новосибирск, 1995. – 14 с.
- [15] Медицинская электронная библиотека. Анестезиология. Капнометрия (medstudy.narod.ru/resource/anest/pco2.htm).
- [16] Агаджанян Н.А., Красников Н.П., Полуниин И.Н. Физиологическая роль углекислоты и работоспособность человека. – Изд-во Астраханской государственной медицинской академии, 1995. – 188 с.
- [17] Солопов И.Н. Физиологические эффекты методов направленного воздействия на дыхательную функцию человека. – Волгоград: ВГАФК, 2004. – 220 с.
- [18] Кучкин С.Н. Гиперкапнические смеси и повышение работоспособности спортсменов // Фармакологическая регуляция физической и психической работоспособности. Тез. докл. Всес. научн. конф. – М., 1980. – С. 14–15.
- [19] Обибок В.Н., Буков Ю.А. Исследование функций внешнего дыхания и кровообращения у спортсменов в условиях измененной газовой среды // Физиол. механизмы адаптации к мышечной деятельности. Тез. докл. XVII Всес. научн. конф. – М., 1984. – С. 181.
- [20] Загрядский В.П. Изменения дыхания при нарастающей гиперкапнии // Физиологический журнал СССР, 1971. – Т. 5. – № 12. – С. 1820–1822.
- [21] Multilateral Protocol. Medical Operations Panel – Air Quality Subgroup. Technical Interchange Meeting. IBMP, Moscow, Russia, September 25–29, 2017. AQS-2017 – 01. p. 12.
- [22] Spacecraft Maximum Allowable Concentrations for Airborne Contaminants. JSC-20584. NASA. Houston, Texas. November 2008. p. 19.
- [23] Савина В.Л. Мановцев Г.А. Адаптация человека к условиям длительной гиперкапнии // Космическая биология и авиакосмическая медицина. Тезисы доклада 9 Всесоюзной конференции. – М., 1990. – С. 480–481.
- [24] Искусственная атмосфера кабин космических кораблей / Жаров С.Г, Серяпин А.Д., Фомин А.Г. и др. // Космическая биология и медицина. – М.: Наука, 1966. – С. 285–297.
- [25] Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей долговременных космических станций / Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В. // Космическая техника и технология. – 2015. – № 1. – С. 67–80.

- [26] Эксплуатация системы удаления диоксида углерода из атмосферы международной космической станции / Юргин А.В., Романов С.Ю., Гузенберг А.С., Рябкин А.М., Телегин А.А. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – Т. 42. – 2008. – № 6–1. – С. 92–93.
- [27] Carr, Christopher E., *Impact of Moderate Elevations in CO₂ On Astronauts During Long-Duration Spaceflight On The International Space Station*. Harvard-MIT Division of Health Sciences and Technology & MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [28] Jennifer Law, Mary Van Baalen, Millennia Foy, Sara S. Mason, Claudia Mendez, Mary L. Wear, Valerie E. Meyers and David Alexander. Relationship Between Carbon Dioxide Levels and Reported Headaches on the International Space Station, *JOEM* Volume 56, Number 5, May 2014, pp. 477–483.
- [29] Scottish Intercollegiate Guideline Network. *Diagnosis and Management of Headache in Adults*. – Edinburgh, 2008.
- [30] Jes Olesen, Peter J. Goadsby, Nabih M. Ramadan, Peer Tfelt-Hansen, K. Michael A. Welch. *The Headaches*. – 3. – Lippincott Williams & Wilkins. 2005.
- [31] Morris Levin, Steven M. Baskin, Marcelo E. Bigal. *Comprehensive Review of Headache Medicine* (англ.). Oxford University Press, 2008. – p. 60.
- [32] Amal Mattu; Deepi Goyal; Barrett, Jeffrey W.; Joshua Broder; DeAngelis, Michael; Peter Deblieux; Gus M. Garmel; Richard Harrigan; David Karras; Anita L'Italien; David Manthey. *Emergency Medicine: Avoiding the Pitfalls and Improving the Outcomes*. – Malden, Mass: Blackwell Pub./BMJ Books, 2007. – p. 39.
- [33] Расходные характеристики систем очистки атмосферы от диоксида углерода в условиях гермообъема космической станции / Гузенберг А.С., Телегин А.А., Юргин А.В. // *Космическая техника и технология*. – 2020. – № 1. – С. 24–33.

REFERENCES

- [1] GOST R 50804-95 [ГОСТ Р 50804-95] *Cosmonaut's Habitable Environments on Board of Manned Spacecraft. General Medicotechnical Requirements*. – Moscow: Gosstandart Rossii Publ., Russia, 1995. – p. 118.
- [2] Agadzhanian N.A., Smirnov V.M. *Respiratory Physiology // Hominal Physiology*. – Moscow: “Medical Information Agency” Publishing House, 2009. – pp. 52–59.
- [3] Kamkin A.G., Kiseleva I.S. *Physiology Atlas*. In 2 volumes. – V. 2: textbook, 2012. – p. 448.
- [4] *High-altitude Aircraft Equipment* / L.T. Bykov, M.S. Egorov, P.V. Tarasov. – Moscow: Oborongiz Publ., 1958. – p. 392.
- [5] Mishustin Yu.N. *Resolving the Deadlock. Physiology Corrects the Mistakes of Medicine*. – Samara: OOO “Samarsky Dom Pechati” Publ., 2010. – p. 80.
- [6] *Study of Long-term Effect of Atmosphere With an Increased Carbon Dioxide Content on the Human Body* / Zharov S.G., Ilyin E.A., Kovalenko E.A. et al. // *Journal of Aviation and Space Medicine* / Edited by V.V. Parin. – Moscow, 1963. – pp. 182–185.
- [7] Agadzhanian N.A., Elfimov A.I. *Body Functions Under Conditions of Hypoxia and Hypercapnia*. – Moscow: Medicina Publ., 1986. – p. 272.
- [8] Hygiene Standards GN 2.2.5.2100-06. *Critical Concentration (PDK) of Harmful Substances in the Working Area Air (addition N 2 to GN 2.2.5.1313-03. Critical Concentration (PDK) of Harmful Substances in the Working Area Air)*.

- [9] AVOK STANDART – 1 2002. Residential and Public Buildings. Air Exchange Standards. – Moscow. AVOK-Press Publ., 2002.
- [10] Eliseeva O.V. The Biological Effect of Carbon Dioxide on the Human Body and the Hygienic Assessment of Its Content in the Air of Public Buildings [text]: Abstract of dissertation for the degree of candidate of medical sciences / Central Institute for Advanced Training of Doctors. – Moscow, 1964. – p. 18.
- [11] Gurina I.V // Chemistry and Life. – 2010. – No 2. – pp. 22–25.
- [12] Seppanen O.A., Fisk W.J. and Mendell M.J. Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. *Indoor Air*, 1999.
- [13] D.S. Robertson. Health Effects of Increase in Concentration of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Current science*, vol. 90, No 12, June 25, 2006.
- [14] Carbon Dioxide Monitoring Basics. Practical guide (based on Datex's materials). – Novosibirsk, 1995. – p. 14.
- [15] Medical e-library. Anesthesiology. Capnometry (medstudy.narod.ru/resource/anest/pco2.htm).
- [16] Agadzhanian N.A., Krasnikov N.P., Polunin I.N. The Physiological Role of Carbon Dioxide and Human Performance. – Publishing House of Astrakhan State Medical University, 1995. – p. 188.
- [17] Solopov I.N. Physiological Effects of Targeted Exposure to Human Respiratory Function. – Volgograd: ВГАФК, 2004. – p. 220.
- [18] Kuchkin S.N. Hypercapnic Mixtures and Improving the Performance of Athletes // Pharmacological Regulation of Physical and Mental Performance. Abs of rep. for All-Un. Scien Conf. – Moscow, 1980. – pp. 14–15.
- [19] Obibok V.N., Bukov Yu.A. Study of Athletes' Respiratory Function and Blood Circulation in a Modified Gas Environment // Physiological Mechanisms of Adaptation to Muscle Activity. Abs of rep. for XVII All-Un. Scien Conf. – Moscow, 1984. – p. 181.
- [20] Zagryadskiy V.P. Respiratory Change While Increasing Hypercapnia // *Physiological Journal of the USSR*, 1971. – V. 5. – No 12. – pp. 1820–1822.
- [21] Multilateral Protocol. Medical Operations Panel – Air Quality Subgroup. Technical Interchange Meeting. IBMP, Moscow, Russia, September 25-29, 2017. AQS-2017 – 01. p. 12
- [22] Spacecraft Maximum Allowable Concentrations for Airborne Contaminants. JSC-20584. NASA. Houston, Texas. November 2008. p. 19
- [23] Savina V.L. Manovtsev G.A. Human Adaptation to Conditions of Prolonged Hypercapnia // *Space Biology and Aerospace Medicine*. Abstracts of the 9th All-Union Conference – Moscow, 1990. – pp. 480–481.
- [24] Artificial Atmosphere Inside Spacecraft Cabin / Zharov S.G., Seryapin A.D., Fomin A.G. et al. // *Space Biology and Medicine*. – Moscow: Nauka Publ., 1966. – pp. 285–297.
- [25] Selecting Life Support System for the Crews of Long-duration Space Stations / Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Romanov S.Yu., Telegin A.A., Yurgin A.V. // *Space Engineering and Technology*. – 2015. – No 1. – pp. 67–80.
- [26] Operation of the ISS Carbon Dioxide Removal System / Yurgin A.V., Romanov S.Yu. Guzenberg A.S., Ryabkin A.M., Telegin A.A. // *Journal of Aerospace and Environmental Medicine*. – V. 42. – 2008. – No 6–1. – pp. 92–93.
- [27] Carr, Christopher E., Impact of Moderate Elevations in CO₂ On Astronauts During Long-Duration Spaceflight On The International Space Station. Harvard-MIT Di-

- vision of Health Sciences and Technology & MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [28] Jennifer Law, Mary Van Baalen, Millennia Foy, Sara S. Mason, Claudia Mendez, Mary L. Wear, Valerie E. Meyers and David Alexander. Relationship Between Carbon Dioxide Levels and Reported Headaches on the International Space Station, JOEM Volume 56, Number 5, May 2014, pp. 477–483.
- [29] Scottish Intercollegiate Guideline Network. Diagnosis and Management of Headache in Adults. – Edinburgh, 2008.
- [30] Jes Olesen, Peter J. Goadsby, Nabih M. Ramadan, Peer Tfelt-Hansen, K. Michael A. Welch. The Headaches. – 3. – Lippincott Williams & Wilkins. 2005.
- [31] Morris Levin, Steven M. Baskin, Marcelo E. Bigal. Comprehensive Review of Headache Medicine (англ.). Oxford University Press, 2008. – p. 60.
- [32] Amal Mattu; Deepi Goyal; Barrett, Jeffrey W.; Joshua Broder; DeAngelis, Michael; Peter Deblieux; Gus M. Garmel; Richard Harrigan; David Karras; Anita L'Italien; David Manthey. Emergency Medicine: Avoiding the Pitfalls and Improving the Outcomes. – Malden, Mass: Blackwell Pub./BMJ Books, 2007. – p. 39.
- [33] Flow Characteristics of Systems for Carbon Dioxide Scrubbing from the Atmosphere in the Pressurized Volume of a Space Station / Guzenberg A.S., Telegin A.A., Yurgin A.V. // Space Engineering and Technology. – 2020. – No 1. – pp. 24–33.