

(а) Стандартные обозначения, принятые для дыхательной системы

Первичные символы

F — фракционная концентрация газа	P — давление или парциальное давление
C — содержание газа в крови	S — насыщение гемоглобина кислородом
V — объём газа	Q — объём крови

Точка над буквенным символом означает производную по времени, например

\dot{V} — вентиляция (л/мин), \dot{Q} — кровоток (л/мин)

Вторичные символы

Газы: I — вдыхаемый

E — выдыхаемый

A — альвеолярный

D — мёртвого пространства

T — дыхательный

B — барометрический

ET — в конце вдоха

Кровь: a — артериальная

v — венозная

c — капиллярная

Черта над буквенным символом означает «смешанный» или «средний», например:

\bar{v} — смешанная венозная кровь

Апостроф «'» после буквенного символа,

например: c', означает «окончание», «конечный»

Третичные символы

O₂ — кислород

CO₂ — углекислый газ

CO — угарный газ

Примеры

$\dot{V}O_2$ — потребление кислорода

P_ACO₂ — парциальное давление

углекислого газа в альвеолах

(б) Факторы коррекции для объёмов газов

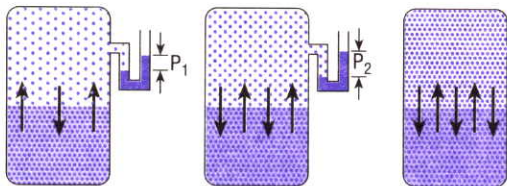
$$\text{Объём (BTPS)} = \text{объём (ATPS)} \left(\frac{273 + 37}{273 + t^{\circ}\text{C}} \right) \left(\frac{P_B - P_{H_2O}}{P_B - 6,3^*} \right) * 47, \text{ если } P_B \text{ и } P_{H_2O} \text{ выразить в мм рт.ст.}$$

$$\text{Объём (STPD)} = \text{объём (ATPS)} \left(\frac{273}{273 + t^{\circ}\text{C}} \right) \left(\frac{P_B - P_{H_2O}}{101^*} \right) * 760, \text{ если } P_B \text{ и } P_{H_2O} \text{ выразить в мм рт.ст.}$$

(в) Парциальное давление газа в жидкости

Газообразная фаза, P_g

Жидкая фаза жидкость X, P_{Xg}

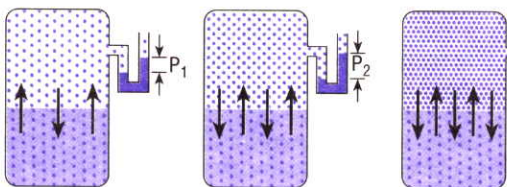


Жидкость X, содержащая растворённый газ g, контактирует с газообразной фазой, содержащей g при трёх разных парциальных давлениях P₁, P₂, P₃. Лишь в том случае, когда P_g = P₂, количество молекул газа, покидающих жидкость за 1 мин (↑), равно количеству молекул, проникающих в жидкость (↓), т.е. жидкая и газообразная фазы находятся в равновесии.

∴ Парциальное давление газа g в жидкости X (P_{Xg}) = P₂

Газообразная фаза, P_g

Жидкая фаза жидкость Y, P_{Yg}



Жидкость Y также содержит газ g и также находится в равновесии с газообразной фазой, когда P_g = P₂

∴ Парциальное давление газа g в жидкости Y (P_{Yg}) = P₂

Однако растворимость газа g в жидкости Y меньше, чем в жидкости X, так что при одном и том же парциальном давлении концентрация газа в жидкости Y меньше.

Примечание. В сосуде внизу слева газ движется против концентрационного градиента.

Чтобы понять, как происходит дыхание и как измерить его параметры, важно знать «поведение» газов в газовой смеси и в жидкости.

Фракционная концентрация и парциальное давление газов в газовой смеси

Закон Дальтона гласит: если два или более газа, которые не вступают между собой в химическую реакцию, содержатся в одном резервуаре, общее давление, оказываемое ими, равно суммарному давлению каждого из них, т.е. давлению каждого газа, если другие газы из резервуара удалить.

Атмосферное давление традиционно измеряли, погружая в резервуар с ртутью длинную стеклянную трубку, содержащую ртуть, предварительно перевернув её. При нормальных условиях на уровне моря высота столбика обычно составляет 760 мм, т.е. барометрическое давление равно 760 мм рт.ст. (тор), а в единицах СИ — 101 кПа (1 кПа = 7,50 мм рт.ст.). В сухом воздухе содержание кислорода составляет 21%. Остальные газы представлены азотом (78,1%) и инертными газами аргоном и гелием (0,9%), однако для удобства эти физиологически инертные газы часто рассматривают вместе с азотом (79%). Считают, что воздух не содержит CO_2 , так как содержание этого газа незначительное (0,04%). На рис. 4 приведены наиболее употребительные в физиологии дыхания условные обозначения.

В соответствии с законом Дальтона, $P_{\text{I O}_2}$ сухого воздуха = $F_{\text{O}_2} \times$ общее барометрическое давление (БД) = $0,21 \times 101$ (760) = 21,2 кПа (159 мм рт.ст.).

На больших высотах содержание кислорода в воздухе остаётся неизменным, но происходит снижение БД; на вершине Эверест оно равно 33,6 кПа (252 мм рт.ст.).

Давление водяного пара

Воздух содержит определённое количество водяных паров, что зависит от источника воды и температуры. Максимальное давление водяных паров, или давление насыщенного водяного пара, в тёплом воздухе выше, чем в холодном: при температуре 20 °С оно равно 2,33 кПа (17,5 мм рт.ст.), в то время как при температуре тела (37 °С) оно составляет 6,3 кПа (47 мм рт.ст.). Относительная влажность (фактическое давление водяных паров / давление насыщенного водяного пара $\times 100\%$) вдыхаемого воздуха зависит от климата; если она равна 40% при температуре 20 °С, то давление водяного пара составит 0,9 кПа (7 мм рт.ст.). Наличие водяных паров в воздухе означает, что F_{O_2} и доля азота (F_{N_2}) обычно несколько меньше, чем в сухом воздухе. Воздух, поступающий в лёгкие при вдохе, быстро достигает температуры тела (37 °С) и 100% насыщения. Общее давление равно барометрическому, потому что водяные пары вызывают значительное разбавление других газов. Следовательно, давление других газов равно: БД – 6,3 кПа (БД – 47 мм рт.ст.).

$P_{\text{I O}_2}$ влажного воздуха = $0,21 \times$ (БД – давление насыщенного пара при 37 °С). На уровне моря оно равно 19,9 кПа [$0,21 \times (101 - 6,3)$], или 149,7 мм рт.ст. На больших высотах, когда БД падает, разбавление вдыхаемого газа водяным паром приобретает большее значение. На вершине Эверест, где БД равно примерно 33,6 кПа (252 мм рт.ст.), парциальное давление влажного кислорода составляет 5,7 кПа (43 мм рт.ст.).

Зависимость объёма газа от его давления и температуры

Закон Бойля и Шарля. При измерении объёма газов важно знать законы Бойля (давление идеального газа обратно про-

порционально его объёму, $P \propto 1/V$) и Шарля [объём идеального газа прямо пропорционален его абсолютной температуре ($273^\circ + ^\circ\text{C}$), $V \propto T$].

Сжатие газа, выдыхаемого в дыхательный мешок или в спирометр, происходит как вследствие снижения его температуры (закон Шарля), так и из-за конденсации водяного пара при снижении температуры. Чтобы можно было проводить сравнения, объёмы газов при температуре и давлении окружающего воздуха, насыщенного водяным паром (ATPS), пересчитывают на стандартные условия. При измерении лёгочных объёмов пересчитывают на альвеолярные условия BTPS (температура $37,0^\circ\text{C}$, окружающее атмосферное давление в момент измерения, полное насыщение водяными парами). При определении потребления кислорода или образования углекислого газа используют систему STPD (нормальные, или стандартные, условия: сухой воздух при 0°C и 760 мм рт.ст.), чтобы в каждом литре содержалось одинаковое число молекул (1 моль $\approx 22,4$ л). Законы Бойля и Шарля, а также закон о снижении давления насыщенного пара с увеличением температуры газа объединены в уравнениях для коррекции объёмов, приведённых на рис. 4б.

Газы, растворённые в жидкости

Если газ находится над жидкостью, с которой он не вступает в химическую реакцию, молекулы газа проникают в жидкость.

Закон Генри. Согласно закону Генри, количество молекул, растворяющихся в жидкости, прямо пропорционально парциальному давлению газа на поверхности жидкости. Коэффициент пропорциональности характеризует растворимость газа в жидкости и зависит от природы газа, жидкости и от температуры (при повышении температуры он уменьшается).

Содержание газа X в жидкости Y = (растворимость X в Y) \times \times (парциальное давление X на поверхности Y).

Парциальное давление газа в жидкости, или напряжение газа, определить сложнее, чем парциальное давление газа в газообразной фазе, когда мы можем визуальнo определить давление молекул, удерживающих ртутный столбик. Молекулы газа в жидкой фазе совершают беспорядочное движение и имеют тенденцию выходить за её поверхность, где они сталкиваются с молекулами этого же газа в газообразной фазе, которая соприкасается с жидкостью (рис. 4в). Если парциальное давление газа в газообразной фазе изменяется настолько, что суммарное движение газа между газообразной и жидкой фазами исчезает, то говорят о достижении равновесия между газом и жидкостью. По определению, парциальное давление в жидкости равно парциальному давлению этого газа в газообразной фазе, с которой она находится в равновесии. Градиент парциального давления (но не градиент концентрации) всегда определяет направление движения между фазами (например, газообразной и жидкой).

Обозначение величин, производных по времени

Величины, производные по времени, обозначают точкой над буквенным символом (например, V_A — альвеолярная вентиляция в л/мин, рис. 4а). Однако в некоторых обозначениях (например, вентиляционно-перфузионном отношении $[V_A/Q]$), точки над символами часто опускают. В дальнейшем мы следовали этому принципу.