

УДК 533.6.011.6: 611.23

А. А.Хрущенко (асп., каф. КТиЭТ), К.М.Арефьев, д.т.н., проф.

ТЕПЛООБМЕН И МАССООБМЕН КИСЛОРОДОМ В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА

Теплообмен и массообмен в лёгких человека нестационарен ввиду смены вдохов и выдохов, переменности расходов воздуха в процессе дыхания. На основе решений нестационарных уравнений обмена [1, 2] проведены численные расчёты температуры стенки трахеи с учетом конденсации или испарения влаги, а также расчеты изменения температуры и влажности протекающего воздуха. Показан колебательный характер температуры стенок и малое проникновение тепловой волны вглубь стенки трахеи. Это проникновение во всех случаях порядка 1 мм. В дальнейших отделах легких изменения температуры и влажности воздуха более слабые, чем в трахее.

Ниже представлено усредненное по объему нестационарное дифференциальное уравнение, определяющее изменение концентрации кислорода в альвеолах при вдохе и выдохе.

$$Y_B dV/dt = Y dV/dt + V dY/dt + \gamma Y - \gamma Y_{кр},$$

где $Y_B = P_B/P$ – относительное парциальное давление кислорода во вдыхаемом воздухе, P – атмосферное давление; Y – текущее относительное парциальное давление кислорода в альвеолах; $V = V(t)$ – изменение объема вдыхаемого воздуха, см³; t – время, с; $\gamma = SD\alpha/d_b$; S – общая капиллярная поверхность легкого, см²; $D = K \cdot D_L$, см²/с; K – пересчетный коэффициент, $D_L = D_M \theta V_C / (D_M + \theta V_C)$ – диффузионная способность межтканевого барьера альвеолы, см³/мин·мм.рт.ст, θ – скорость реакции кислорода с гемоглобином крови, см³/см³/мин·мм.рт.ст; V_C – объем капиллярной крови, см³; D_M – диффузионная способность мембраны, включая мембрану эритроцита, см³/мин·мм.рт.ст.; α – растворимость газа в ткани; d_b – эффективная толщина межтканевого барьера, см; $Y_{кр} = P_{кр}/P$ – относительное парциальное давление (напряженность) кислорода в крови.

Учитывается изменение концентрации кислорода при диффузии через межтканевые барьеры в альвеолярные капилляры, а также интенсивность его поглощения эритроцитами крови [3]. Уравнение диффузии кислорода через альвеолярную мембрану выглядит следующим образом:

$$D_L \int_0^{\tau} \Delta Y(t) dt = V_C Y_{кр}^{\max} \alpha / 760,$$

где $\Delta Y(t) = Y(t) - Y_{кр}(t)$, $Y_{кр}^{\max}$ – максимальное парциальное давление (напряжение) кислорода в крови которое достигается в конце капилляра через 0.25 с.

В результате его решения, можно найти параметры, определяющие проходимость и перенос кислорода в кровь. Изменение концентрации кислорода по длине капилляра, находится из решения приведенного ниже дифференциального уравнения:

$$dY_{кр}/dx = 4 \cdot K \cdot D_L (Y - Y_{кр}) / (v \cdot d_k \cdot d_b),$$

где v – скорость крови в капилляре, см/с; d_k – диаметр капилляра, см.

Из решения уравнений находим относительное парциальное давление кислорода в альвеоле задавая различные значения θ и D_M для спокойного дыхания, когда расход крови $V_C = 100$ см³, и при интенсивном дыхании (в случае физической нагрузки), когда происходит увеличение кровотока $V_C = 200, 300$ см³.

Таблица 1

$V_C, \text{ см}^3$	100			200			300		
$D_M, \text{ см}^3/(\text{мин} \cdot \text{мм.рт.ст.})$	2.5	25	73	2.5	25	73	2.5	25	73
$\theta, 1/(\text{мин} \cdot \text{мм.рт.ст.})$	Y								
0.3	0.175	0.139	0.136	0.215	0.143	0.138	0.255	0.147	0.139
0.5	0.173	0.138	0.135	0.213	0.142	0.136	0.253	0.146	0.138
1	0.172	0.137	0.134	0.212	0.141	0.135	0.252	0.145	0.137
1.5	0.172	0.136	0.134	0.212	0.14	0.135	0.252	0.144	0.136

Некоторые результаты подобных расчетов относительного среднего парциального давления кислорода в альвеоле Y с использованием решения второго уравнения, приведены в табл. 1 для различных величин θ и D_M [4]. Для здорового человека обычно D_M составляет в среднем около $25 \text{ см}^3/\text{мин} \cdot \text{мм.рт.ст.}$. По данным результатам можно судить о изменении величины относительного парциального давления кислорода в альвеоле для различных условий дыхания и значений параметров определяющих усвоение кровью кислорода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 2. Л., 1948.
2. Хрущенко А.А., Арефьев К.М. Особенности теплообмена в легких человека. XXVIII неделя науки СПбГТУ. СПб. 2000. С. 91-92.
3. Гриппи Майкл А. Патофизиология легких. М.: Мир.- 2001.
4. Roughton F.J. and Forster R.E. Relative importance of diffusion and chemical reaction rates in determining rate of exchange of gases in the human lung. // J. Appl. Physiol. 11(2) 1957. Pp. 290-302.