

УДК [612.113+612.114]:612.127.2

ФИЗИОЛОГИЯ

М. А. ХАНИН, И. Б. БУХАРОВ

О ЗАВИСИМОСТИ К.П.Д. МЫШЦ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ВЕНОЗНОЙ КРОВИ

(Представлено академиком В. В. Париным 1 VI 1971)

Энергетически оптимальная концентрация кислорода в венозной крови C_v при физической нагрузке, определяющей потреблением кислорода $\dot{V}_{O_2}$, должна удовлетворять условию:

$$\begin{aligned} \partial W / \partial C_v &= 0, \\ W &= W_H + W_L + W_M(1 - \eta_M), \end{aligned} \quad (1)$$

где W_H , W_L , W_M — мощности, потребляемые соответственно сердцем, легкими и мышцами; $\eta_M(C_v, \dot{V}_{O_2})$ — к.п.д. мышц.

Мощность эритропоза не учитывается, так как при кратковременных нагрузках концентрация эритроцитов практически не изменяется. Член $W_M(1 - \eta_M)$ учитывает энергетические потери в мышце.

Зависимость величин W_H , W_L и W_M от C_v и $\dot{V}_{O_2}$ определяется выражениями:

$$\begin{aligned} W_H &= \frac{\alpha \dot{V}_{O_2}}{(C_a - C_v) \left(1 - \beta \frac{\dot{V}_{O_2}}{C_a - C_v} \right)}, \\ W_L &= a_2 \dot{V}_A^2 + a_3 \dot{V}_A^3, \\ \dot{V}_A &= \frac{\dot{V}_{O_2}}{0,21 - 1/3 \frac{P_a + 2b_0}{P_B} - 2/3 \frac{b_1 C_v}{P_B} - \frac{1}{D_L (\dot{V}_{O_2})} \frac{\dot{V}_{O_2}}{P_B}}, \\ W_M &= H (\dot{V}_{O_2} - \dot{V}_{O_2}^0), \end{aligned} \quad (2)$$

где C_a — концентрация кислорода в артериальной крови, P_a — парциальное давление кислорода в артериальной крови, $\dot{V}_{O_2}^0$ — потребление кислорода в состоянии покоя, $\dot{V}_A$ — альвеолярная вентиляция легких; $D_L(\dot{V}_{O_2})$ — диффузионная проводимость легких, P_B — барометрическое давление, $H = 5$ кал на 1 мл O_2 , $\alpha = 14,5$ кал/л, $\beta = 3 \cdot 10^{-2}$ мин/л, $a_2 = 3,9 \cdot 10^{-2}$ кал · мин / л², $a_3 = 4,3 \cdot 10^{-4}$ кал · мин² / л³, $b_0 = 5$ мм рт. ст., $b_1 = 215 \frac{\text{мм рт. ст.}}{\text{мл } O_2/\text{мл}}$.

В первом уравнении системы (2) множитель $1 - \beta \frac{\dot{V}_{O_2}}{C_a - C_v}$ учитывает зависимость к.п.д. сердца от расхода крови Q , полученную путем обработки данных (1). Величины C_a и P_a в соответствии с известными экспериментальными данными принимались постоянными (2).

Зависимость мощности, потребляемой легкими, от альвеолярной вентиляции получена путем пересчета данных (3), в которых определена зависимость W_L от полной легочной вентиляции $\dot{V}_L$:

$$\dot{V}_L = \dot{V}_A + fV_d,$$

где f — частота дыхания, V_d — мертвый объем легких.

Связь альвеолярной вентиляции легких с другими параметрами установлена путем решения следующей системы уравнений:

$$P_A - P_c = \frac{1}{D_L(\dot{V}_{O_2})} \dot{V}_{O_2} - \text{уравнение диффузии};$$

$$\frac{1}{P_B}(P_I - P_A)\dot{V}_A - \dot{V}_{O_2} - \text{уравнение баланса кислорода};$$

$$P_c = P_v + 1/3(P_a - P_v) - \text{формула Баркрофта};$$

$P_v = b_0 + b_1 C_v$ — линейная аппроксимация кривой равновесного насыщения гемоглобина кислородом, где P_I — парциальное давление кислорода во вдыхаемом воздухе; P_A — парциальное давление кислорода в альвеолярном воздухе; P_c — среднее парциальное давление кислорода в капиллярных легких; P_v — парциальное давление кислорода в венозной крови.

Уравнение (1) с использованием выражений (2) позволяет установить зависимость энергетически оптимальной величины C_v от $\dot{V}_{O_2}$, если известна функция $\eta_M(C_v, \dot{V}_{O_2})$. Ввиду отсутствия достаточно надежных экспериментальных данных об этой зависимости, нами была решена обратная задача. С помощью данных о зависимости $C_v = \varphi(\dot{V}_{O_2})$ (4) устанавливается зависимость к.п.д. мышц от C_v и $\dot{V}_{O_2}$. При этом используются следующие дополнительные условия и допущения:

1. К.п.д. мышц η_M представлен в виде произведения двух функций:

$$\eta_M(C_v, \dot{V}_{O_2}) = \eta_1(\dot{V}_{O_2})\eta_2(C_v).$$

2. Используется эмпирическая зависимость к.п.д. мышц от $\dot{V}_{O_2}$ в условиях оптимального регулирования C_v :

$$\eta_M = \omega(\dot{V}_{O_2}) = \frac{\gamma_1 \dot{V}_{O_2}}{1 + \gamma_2 \dot{V}_{O_2}},$$

где $\gamma_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ мин. на 1 мл O_2 , $\gamma_2 = 6,4 \cdot 10^{-3}$ мин. на 1 мл O_2 (5).

3. Используется эмпирическая зависимость эффективной диффузионной проводимости легких от $\dot{V}_{O_2}$:

$$D_L(\dot{V}_{O_2}) = \frac{\delta_1 \dot{V}_{O_2}}{1 + \delta_2 \dot{V}_{O_2}},$$

где $\delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ л / мм рт. ст., $\delta_2 = 8,6 \cdot 10^{-5}$ мин. на 1 мл O_2 (4, 5).

4. Эмпирическая зависимость $C_{v \text{ opt}}$ от $\dot{V}_{O_2}$ аппроксимируется формулой

$$C_{v \text{ opt}} = \varphi(\dot{V}_{O_2}) = \frac{1 + \varepsilon_1 \dot{V}_{O_2}}{\varepsilon_2 \dot{V}_{O_2}},$$

где $\varepsilon_1 = 8,5 \cdot 10^{-4}$ мин. на 1 мл O_2 , $\varepsilon_2 = 2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл} \cdot \text{мин}}{(\text{мл } O_2)^2}$ (4).

Таким образом, уравнение (1) принимает вид

$$\left. \frac{\partial \ln \eta_2}{\partial C_v} \right|_{C_v = \varphi(\dot{V}_{O_2})} = \frac{1}{H(\dot{V}_{O_2} - \dot{V}_{O_2}^0)\eta_M} \cdot \left. \frac{\partial (W_H + W_L)}{\partial C_v} \right|_{C_v = \varphi(\dot{V}_{O_2})}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) дает

$$\frac{\eta_2(C_{v_1})}{\eta_2(C_{v_2})} = \exp \left\{ \int_{C_{v_2}}^{C_{v_1}} \frac{\Psi(C_v) dC_v}{H(\dot{V}_{O_2} - \dot{V}_{O_2}^0)\eta_M} \right\}_{\dot{V}_{O_2} = \chi(C_v)}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi(C_v) = \left. \frac{\partial (W_H + W_L)}{\partial C_v} \right|_{\dot{V}_{O_2} = \chi(C_v)} &= \frac{\alpha \dot{V}_{O_2}}{(C_a - C_v)^2 \left(1 - \beta \frac{\dot{V}_{O_2}}{C_a - C_v} \right)^2} \Big|_{\dot{V}_{O_2} = \chi(C_v)} + \\ &+ (2a_2 \dot{V}_A + 3a_3 \dot{V}_A^2) \frac{\partial \dot{V}_A}{\partial C_v} \Big|_{\dot{V}_{O_2} = \chi(C_v)}; \end{aligned}$$

$\dot{V}_{O_2} = \chi(C_v)$ — функция, обратная $\varphi(\dot{V}_{O_2})$.

Решение (4) определяет функцию $\eta_2(C_v)$ с точностью до постоянного множителя. На рис. 1 представлена теоретическая зависимость к.п.д. мышц от C_v . С помощью полученной функции может быть найдена зависимость к.п.д. мышц от средней концентрации кислорода в мышечной ткани.

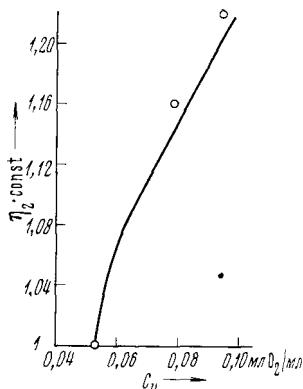


Рис. 1. Зависимость к.п.д. мышц η_2 от концентрации кислорода в венозной крови C_v

Для сравнения полученной теоретической зависимости с экспериментальными данными мы воспользовались результатами работы Асмуссена и Чиоди (⁶). Полученные ими данные позволили нам вычислить относительное изменение к.п.д. мышц при двух значениях концентрации кислорода в венозной крови: $C_v = 0,079$, $C_v = 0,095$ мл O_2 на 1 мл. Соответствующие точки приведены на рис. 1.

Нам представляется весьма желательным экспериментальное исследование зависимости к.п.д. мышц от C_v в достаточно широком диапазоне изменения C_v .

Следует заметить, что функция $\eta_1(\dot{V}_{O_2})$ определяет истинную зависимость к.п.д. мышц от $\dot{V}_{O_2}$, тогда как обычно используемая зависимость $\eta_M(\dot{V}_{O_2})$ косвенно учитывает также зависимость к.п.д. от C_v в условиях оптимального регулирования артерио-венозной разности.

Авторы с глубокой благодарностью отмечают большой интерес, проявленный акад. В. В. Париным к этой работе, и плодотворное обсуждение им ее результатов.

Поступило
1 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. J. Levine, N. A. Britman, J. Clin. Invest., 43, 1383 (1964). ² G. Mættell, Acta physiol. scand., 58, Suppl. 206, 5 (1963). ³ G. Milic-Emili, J. M. Pettit, J. Appl. Physiol., 15, 359 (1960). ⁴ L. G. C. E. Pugh, J. Appl. Physiol., 19, 441 (1964). ⁵ L. G. C. E. Pugh, M. B. Gill et al., J. Appl. Physiol., 19, 431 (1964). ⁶ E. Asmussen, H. Chiodi, Am. J. Physiol., 132, 426 (1944).