

Информатика и системные науки (ИСН-2016)

УДК 519.8.812.007

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОЙ  
АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ ЛИЦ,  
РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ  
ВЫСОКОГОРЬЯ.**

**Н.И. Аралова, к.т.н., ст.н.с., В.И. Машкин, к.т.н, ст.н.с., И.В.  
Машкина, к.т. н, доцент\***

*Институт кибернетики НАН Украины, \* Университет  
им. Б. Гринченко*

[aralova@ukr.net](mailto:aralova@ukr.net),  
[mashkina.iv@gmail.com](mailto:mashkina.iv@gmail.com)

**MATHEMATICAL MODEL OF SHORT-TERM  
ADAPTATION OF BREATH OF PERSONS WORKING  
UNDER EXTREME CONDITIONS OF HIGHLANDS**

A mathematical model of short-term respiratory system adaptation of persons under the combined effects of hyperbaric and hypermetabolic hypoxia is presented.

Предлагается математическая модель краткосрочной адаптации системы дыхания лиц находящихся под сочетанным воздействием гипобарической и гиперметабоической гипоксии. **Keywords:** short-term adaptation, hypobaric (hypoxic) hypoxia, a mathematical model of the respiratory system.

**Ключевые слова:** краткосрочная адаптация, гипобарическая (гипоксическая) гипоксия, математическая модель системы дыхания.

Необходимой предпосылкой высокой надежности функционирования организма в различных условиях жизнедеятельности является адаптация к гипоксии и механизмы ее обеспечивающие. Для математического анализа адаптационных возможностей организма гипоксии различной этиологии используется модель ФСД, описывающая транспорт и массообмен респираторных газов в дыхательных путях, альвеолярном пространстве, крови и тканях обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями, регуляция

Computer Sciences and System Sciences (CS&SS-2016)

## Информатика и системные науки (ИСН-2016)

осуществляется на основе компромиссного разрешения конфликтной ситуации, возникающей между тканями и органами при борьбе за кислород в условиях его дефицита.

Анализ математической модели ФСД показал, что кратковременные возмущения системы, приводящие к возникновению гипоксии могут быть компенсированы реакцией механизмов саморегуляции, сложившимися в процессе эволюции – интенсификацией работы системы внешнего дыхания, сердечной мышцы и гладких мышц сосудов.

Процесс дыхания, при котором происходит транспорт и массообмен респираторных газов рассматривается как управляемая динамическая система, которая описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений и алгебраических соотношений. Управляемыми параметрами являются вентиляция  $V$ , системный кровоток  $Q$  и локальные кровотоки  $Q_{C_j}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , т.е. исполнительными органами регуляции являются сердечная и дыхательные мышцы, гладкие мышцы сосудов.

Зададим: - начальное состояние системы:  $p_{RP}O_2$ ,  $p_{RP}CO_2$ ,  $p_AO_2$ ,  $p_ACO_2$  характеризующими парциальные давления кислорода и углекислого газа в дыхательных путях и альвеолярном пространстве,  $p_{LC}O_2$ ,  $p_{LC}CO_2$ ,  $p_aO_2$ ,  $p_aCO_2$ ,  $p_{C_j}O_2$ ,  $p_{C_j}CO_2$ ,  $p_{t_j}O_2$ ,  $p_{t_j}CO_2$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $p_{\bar{v}}O_2$ ,  $p_{\bar{v}}CO_2$ , характеризующими напряжения кислорода и углекислого газа в крови легочных капилляров, артериальной крови, тканях, смешанной венозной крови в момент времени  $\tau_0$  начала действия возмущения; - области изменения параметров управления:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{\min} \leq V \leq \dot{V}_{\max}, Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}, \sum_{j=1}^m Q_{C_j} \leq Q \\ Q_{C_j, \min} \leq Q_{C_j} \leq Q_{C_j, \max}, j = \overline{1, m} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

терминальное множество состояний, обусловленное соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} |G_{t_j} O_2 - q_{t_j} O_2| \leq \varepsilon_{t_j} O_2, j = \overline{1, m} \\ |G_{t_j} CO_2 - q_{t_j} CO_2| \leq \varepsilon_{t_j} CO_2, j = \overline{1, m} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{t_j} O_2$ ,  $\varepsilon_{t_j} CO_2$ ,  $j = \overline{1, m}$  достаточно малые положительные величины. Решением задачи краткосрочной адаптации, сформулированной таким образом будет любой набор значений управляющих параметров  $\bar{V}$ ,  $Q$ ,  $Q_{C_j}$ ,  $j = \overline{1, m}$  из уравнения (1), т.к. именно эти параметры через некоторое время переведут возмущенную систему, характеризующуюся условиями (2). При этом степень недостатка кислорода или накопления углекислого газа будут достоверными. При этом задача краткосрочной адаптации рассматриваем, как задачу оптимальной саморегуляции.

Выше отмечалось, что исполнительными органами саморегуляции основной функции дыхания являются дыхательные мышцы, сердечная и гладкие мышцы тканевых сосудов. Человек сознательно способен управлять только работой дыхательных мышц, формировать необходимый уровень вентиляции. Центр принятия решений при регуляции системы дыхания как бы раскладывает ресурс регуляции на все три исполнительных органа. Поэтому, задавая более интенсивный режим внешнего дыхания, снимается нагрузка в сердечной мышце и тем самым увеличивается ее регуляторный ресурс. Для увеличения кислородного запаса тканей, увеличения регуляторного ресурса сердца желательно формировать соответствующие режимы системы внешнего дыхания,

## Информатика и системные науки (ИСН-2016)

определяя оптимальный дыхательный объем, продолжительность фаз вдоха и выдоха для каждого возможного уровня функциональной активности. Особенно это важно делать при выполнении работы в экстремальных условиях высокогорья, т.е. при сочетанном воздействии гипобарической и гиперметаболической гипоксии.