



**Українська Федерація Інформатики**  
**Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України**  
**Вищий навчальний заклад Укоопспілки**  
**«ПОЛТАВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ»**  
**(ПУЕТ)**

# **ІНФОРМАТИКА ТА СИСТЕМНІ НАУКИ (ІСН-2015)**

**МАТЕРІАЛИ**  
**VI ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ**  
**КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ**

**(м. Полтава, 19–21 березня 2015 року)**

За редакцією професора О. О. Ємця

**Полтава**  
**ПУЕТ**  
**2015**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ УТОМЛЕНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ С ОПТИМАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*Н. И. Аралова, В. И. Машкин, И. В. Машкина\**

*ИК НАН Украины, \*Университет им. Б. Гринченко*

*г. Киев, Украина, aralova@ ukr.net, mashkinai@ ukr.net*

На математической модели функциональной системы дыхания с оптимальным управлением прогнозируются процессы развития утомления у спортсменов высокой квалификации при выполнении ими физической работы. С этой целью с помощью математических моделей формализуются факторы, которые ограничивают работоспособность каждого индивидуума и обуславливают развитие утомления при выполнении спортсменом физической работы.

Математическая модель функциональной системы дыхания базируется на концепции о кислородных режимах организма и их регулировании. Оптимальное управление в системе дыхания предполагает автоматическое разрешение конфликтной ситуации, возникающей в определенных условиях между метаболическими потребностями сердечной и дыхательной мышц, участвующих в процессе массопереноса газов и возрастающее потребностью в кислороде скелетных мышц. При решении задачи прогнозирования реакции системы дыхания на воздействующее возмущение (гипоксия нагрузки) осуществляется индивидуализация модели управления. Для этого в функционале качества

$$J = \int_{t_0}^T \left[ \rho_1 \sum_i \lambda_i G_{ii} O_2 - q_{ii} O_2^2 + \rho_2 \sum_i \lambda_i G_{ii} CO_2 + q_{ii} CO_2^2 \right] d\tau,$$

где  $G_{ii} O_2, G_{ii} CO_2$  - потоки кислорода и углекислого газа через альвеолярно – тканевой барьер;

$q_{ii} O_2, q_{ii} CO_2$  - скорость утилизации кислорода и образования углекислого газа в  $i$ -том тканевом регионе;

$\lambda_i$  - коэффициенты, характеризующие степень кровенаполнения тканей;

$\rho_1, \rho_2$  - коэффициенты, отражающие чувствительность организма к недостатку кислорода и избытку углекислого газа в организме для каждого обследуемого выбираются соответствующие его индивидуальным особенностям коэффициенты  $\rho_1, \rho_2$ .

Созданные модели позволили прогнозировать изменения  $pO_2$  в альвеолярном воздухе, артериальной и смешанной венозной крови, тканях мозга, сердечной и скелетной мышцах, почках, органах ЖКТ и печени, кожи, а модель системы дыхания с оптимальным управлением создала предпосылки для прогнозирования количественных значений локальных и системного кровотоков, легочной вентиляции при напряженной мышечной деятельности, что, в свою очередь, обусловило возможность прогнозирования функционального состояния организма и развитие утомления.

Прогнозирование осуществлялось в два этапа. На первом этапе прогнозировали значение

$pO_2$  и  $pCO_2$  в альвеолярном воздухе, артериальной и смешанной венозной крови, сердечной и скелетных мышцах, тканях мозга и других тканях, значения локальных и системного кровотоков при напряженной мышечной деятельности. На втором этапе прогнозировались:

- порог развития утомления по интенсивности нагрузки (по отношению потребления кислорода во время нагрузки к МПК) на так называемом пороге анаэробного обмена, с которого начинается утомление;
- мощность, при которой должен наступить вынужденный отказ от работы, определяемая по прогнозируемым величинам МПК, минутного объема крови и  $pO_2$  в смешанной венозной крови, сердечной и скелетной мышцах.

Первым ограничением для увеличения потребления кислорода скелетными мышцами при недостаточном кровоснабжении служат критические уровни  $pO_2$  в ткани. При

значении  $pO_2$  ниже критического уменьшается скорость утилизации кислорода в миоцитах скелетных мышц.

В качестве важнейшего ограничения на втором этапе исследований в модель были введены максимально возможные значения минутного объема крови, ударного объема, критические значения напряжений кислорода в смешанной венозной крови для нетренированных лиц и спортсменов.

Задача оптимального управления газовым состоянием организма решалась по гипоксическому и гиперкапническому критериям с учетом их совместных влияний. Наличие регуляции по двум стимулам сокращает переходный процесс до нескольких секунд, обеспечивает возможность поддержания достаточных уровней  $pO_2$  и  $pCO_2$  в тканевых резервуарах.

Исследования на модели свидетельствуют о существенной роли гиперкапнического стимула как фактора, определяющего объемную скорость системного кровотока при артериальной гипоксемии. Однако еще большее значение имеет конкуренция между тканями рабочих органов (сердца, дыхательных мышц) и периферической тканью (мышцами), осуществляющей физическую работу в условиях дефицита кислорода. Компромиссное решение конфликта с учетом морфологических и функциональных особенностей каждого тканевого региона усредняет кислородную недостаточность в них и тем самым снижает физическую нагрузку в сердечной мышце и увеличивает запас регуляторных возможностей организма.

На основании проведенных исследований можно полагать, что математическая модель системы дыхания с оптимальным управлением может быть использована для прогнозирования начала развития утомления, при котором выполнение работы становится невозможным, т.е. с помощью математического моделирования можно прогнозировать максимальные рабочие возможности организма спортсмена.