

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОЙ И СРЕДНЕСРОЧНОЙ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ ЛИЦ, РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ

Н.И. Аралова

*Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины*

Предлагается математическая модель краткосрочной и среднесрочной адаптации системы дыхания лиц, находящихся под сочетанным воздействием гипобарической и гиперметаболической гипоксии. Приведены результаты прогнозирования состояния функционирования системы дыхания по напряжению кислорода в крови и тканях работающих органов у спасателей при их адаптации к условиям горных метеофакторов.

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

Запропоновано математичну модель короткотермінової та середньотермінової адаптації системи дихання осіб, які перебувають під сумісним впливом гіпобаричної та гіперметаболічної гіпоксії. Наведено результати прогнозування стану функціонування системи дихання за напруженням кисню у крові та тканинах працюючих органів у рятувальників при їх адаптації до умов гірських метеофакторів.

**Ключові слова:** короткотермінова адаптація, середньотермінова адаптація, система дихання, гіпобарична (гіпоксична) гіпоксія, надійність, математична модель системи дихання.

### ВВЕДЕНИЕ

Успешное выполнение человеком тяжелой работы в условиях гипобарической гипоксии во многом зависит от функционального состояния, подготовленности, особенностей физиологического и психофизиологического статусов. Объективную оценку степени подготовленности человека к выполнению высоких нагрузок в экстремальных условиях высокогорья дают данные медицинских и физиологических обследований. Наряду с экспериментальными исследованиями в последнее время широко используются методы математического моделирования отдельных функциональных систем и целостного организма в тех или иных жизненных ситуациях, результаты которого дополняют систему экспериментальных данных и позволяют сделать более полную оценку функционального состояния организма.

Известно, что в условиях гипобарической гипоксии при выполнении нагрузки большой мощности человек тратит значительное количество энергии (механической и нервной), что приводит к развитию гипоксических состояний — кислородной недостаточности в работающих мышцах и тканях (скелетных, сердечной и нервной, тканях мозга), которые могут существенно ограничить его работоспособность. Одним из подходов для оценки степени развития гипоксии в отдельных группах тканей и в целостном организме

является использование математической модели функционирования системы дыхания (ФСД) [1].

Эта модель описывает транспорт и массообмен респираторных газов в различных звеньях системы дыхания — дыхательных путях, альвеолярном пространстве легких, крови легочных и тканевых капилляров, артериальной и смешанной венозной крови, тканевых резервуарах и органах (мозг, сердце, дыхательные и скелетные мышцы, другие ткани и органы), и компенсирующие воздействия механизмов саморегуляции (величина вентиляции легких, минутный объем системного и органных (тканевых) кровотоков, стабилизирующих функциональные состояния организма при заданном уровне его функциональной активности).

По существу, модель ФСД представляет собой управляемую динамическую систему, состояние которой определяется в каждый момент времени напряжениями кислорода и углекислоты в каждом структурном звене системы дыхания (альвеолах, крови и тканях). Управление (саморегуляция) состоянием при постоянно или на заданном временном отрезке действующем возмущении (высокая функциональная активность отдельных групп тканей) осуществляется исполнительными органами саморегуляции — дыхательными мышцами, формирующими необходимый уровень вентиляции для компенсации возникающих гипоксических состояний, сердечной мышцей, обеспечивающей минутный объем крови (МОК), и гладкими мышцами тканевых сосудов, вазодилатация и вазоконстрикция которых способствует распределению системного кровотока по органам и тканям.

Кроме этих активных механизмов саморегуляции в модели учтены пассивные механизмы: концентрация гемоглобина в крови, миоглобина в скелетных и сердечной мышцах, их возможности к оксигенации, концентрация буферных оснований в крови и др. Предполагается, что решение о выборе величин компенсирующих воздействий принимается центром принятия решения на основании информации об уровне функциональной активности и степени кислородной недостаточности, избыточности накопления углекислоты во всех тканевых регионах организма, передается на исполнительные органы саморегуляции, повышает их функциональную активность, чем обеспечивается выполнение основной функции дыхания.

**Цель работы** – на математической модели функционирования системы дыхания исследовать механизмы адаптации этой системы к условиям горных метеофакторов у лиц, выполняющих тяжелую физическую нагрузку в условиях гипобарической гипоксии.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ**

Необходимой предпосылкой высокой надежности функционирования организма в различных условиях жизнедеятельности является адаптация к гипоксии и обеспечивающие ее механизмы [2]. Для математического анализа адаптационных возможностей организма при гипоксии различной этиологии используется модель ФСД [1], описывающая транспорт и массообмен

респираторных газов в дыхательных путях, альвеолярном пространстве, крови и тканях обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями, регуляция осуществляется на основе компромиссного разрешения конфликтной ситуации, возникающей между тканями и органами при борьбе за кислород в условиях его дефицита [3].

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

При среднесрочной адаптации к гипоксии формируются функциональные механизмы, меняющие чувствительность организма к гипоксии, повышающие эффективность тканевого массообмена, стимулирующие эритропоэз.

Долгосрочная адаптация организма к действию гипоксии заключается в структурных изменениях в организме, например, перераспределение массы тканей, гипертрофия исполнительных органов саморегуляции процесса дыхания, в первую очередь гипертрофия левого желудочка.

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОЙ АДАПТАЦИИ

Математическая модель ФСД дает исследователю возможность: проанализировать кислородные и углекислотные режимы организма в динамике при различных уровнях функциональной нагрузки и при различных условиях окружающей среды; сформировать такие режимы системы внешнего дыхания, которые способствуют увеличению запасов кислорода в организме и тем самым повышают ресурс сердечной мышцы при регуляции гипоксических состояний, возникающих при сочетанном воздействии гипобарической гипоксии и гиперметаболической гипоксии; прогнозировать состояние организма в различных физических усилиях и оценить эффективность процесса подготовки; планировать и распределить тяжелые нагрузки с учетом функциональных возможностей данного индивидуума и в зависимости от складывающихся ситуаций.

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

Действующие на систему дыхания возмущения подразделяются на внутренние и внешние. К внешним относятся изменение состава вдыхаемого воздуха, барометрического давления окружающей среды и т.д., к внутренним — изменение интенсивности обменных процессов в органах и тканях. Количественно вторые характеризуются скоростью потребления кислорода

$q_{t_j}O_2$ ,  $j = \overline{1, m}$  и выделения углекислого газа  $q_{t_j}CO_2$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Роль краткосрочной адаптации состоит в выведении возмущенной динамической системы транспорта и массообмена респираторных газов в некоторое устойчивое для сформированных условий жизнедеятельности организма стационарное состояние [4].

Зададим:

— начальное состояние системы:  $p_{RP}O_2$ ,  $p_{RP}CO_2$ ,  $p_AO_2$ ,  $p_ACO_2$ , характеризующие парциальные давления кислорода и углекислого газа в дыхательных путях и альвеолярном пространстве,  $p_{LC}O_2$ ,  $p_{LC}CO_2$ ,  $p_aO_2$ ,  $p_aCO_2$ ,  $p_{c_j}O_2$ ,  $p_{c_j}CO_2$ ,  $p_{t_j}O_2$ ,  $p_{t_j}CO_2$ ,  $p_{\bar{v}}O_2$ ,  $p_{\bar{v}}CO_2$ ,  $j = \overline{1, m}$ , характеризующие 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:

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

— терминальное множество состояний, обусловленное соотношениями:

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

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  $\dot{V}$ ,  $Q$ ,  $Q_{c_j}$

$j = \overline{1, m}$  из уравнения (1), т.к. именно эти параметры через некоторое время переведут возмущенную систему в состояние, характеризующееся условиями (2). При этом степень недостатка кислорода или накопления углекислого газа будут достоверными. Представим задачу краткосрочной адаптации как задачу оптимальной саморегуляции. Предположим, что оптимальным является набор параметров управления  $\dot{V}$ ,  $Q$ ,  $Q_{c_j}$ ,  $j = \overline{1, m}$  из уравнения (1), обеспечивающих на траекториях движения возмущенной динамической системы минимум функционала

$$I = \int_{\tau}^{\tau_0+T} \left[ \rho_1 \sum_{i=1}^m \lambda_{t_j} (G_{t_j}O_2 - q_{t_j}O_2)^2 + \rho_2 \sum_{i=1}^m \lambda_{t_j} (G_{t_j}CO_2 + q_{t_j}CO_2)^2 \right] d\tau,$$

где  $G_i O_2, G_i CO_2$  — соответственно потоки кислорода и углекислого газа через капиллярно–тканевый барьер;  $q_i O_2, q_i CO_2$  — скорость утилизации кислорода и образования углекислого газа в  $i$ -том тканевом регионе;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — коэффициенты чувствительности организма к недостатку кислорода и избытку углекислого газа соответственно;  $\lambda_{t_i}$  — коэффициенты, характеризующие жизненную значимость каждого органа или региона, их морфо-функциональные особенности. При расчетах было принято, что

$$\lambda_{t_j} = \varphi \left( \frac{V_{c_j}}{V_{t_j}} \right), j = \overline{1, m}.$$

Квадратичная функция  $\varphi$  характеризует степень кровенаполнения единичного объема тканевого резервуара.

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СРЕДНЕСРОЧНОЙ АДАПТАЦИИ

Саморегуляция системы дыхания осуществляется не только при краткосрочной адаптации, но и на этапах среднесрочной и долгосрочной адаптации, когда возмущения действуют на систему на протяжении длительного времени или периодически повторяются. Это приводит к развитию добавочных адаптационных механизмов, которые позволяют в ответ на возмущение осуществить более эффективную организацию обменных функций в тканях.

При утилизации кислорода в тканях высвобождается энергия, необходимая для работы мышц, опорно-двигательного аппарата, поддержку основных функций органов человека. Часть энергии выделяется в виде тепла. Скорость потребления кислорода тканями можно представить в виде [5]:

$$q_{t_j} O_2 = q_{t_j}^f O_2 + q_{t_j}^T O_2, j = \overline{1, m},$$

где  $q_{t_j}^f O_2$  — скорость утилизации кислорода, необходимого для выполнения на заданном уровне функций органов и тканей;  $q_{t_j}^T O_2$  — составляющая скорости потребления кислорода, обеспечивающая выделение тепловой и других видов энергии.

На среднесрочном этапе адаптации  $q_{t_j}^f O_2 = const, j = \overline{1, m}$  для заданного уровня нагрузки, а  $q_{t_j}^T O_2, j = \overline{1, m}$  может быть уменьшена в процессе адаптации за счет лучшей организации обменных процессов.

Предполагается, что

$$q_{t_j}^T O_{2\text{адапт.}} = \left( q_{t_j}^T O_{2\text{неадапт.}} - q_{t_j}^T O_{2\text{крит.}} \right) e^{-k\tau} + q_{t_j}^T O_{2\text{крит.}}, j = \overline{1, m},$$

где  $q_{t_j}^T O_{2\text{адапт.}}$ ,  $q_{t_j}^T O_{2\text{неадапт.}}$  — тепловые составляющие скорости потребления кислорода в адаптированном и неадаптированном организме соответственно;  $q_{t_j}^T O_{2\text{крит.}}$  — скорость потребления кислорода, необходимая для выделения минимального количества энергии для поддержания теплового баланса организма при адаптации;  $k$  — заданный коэффициент;  $\tau$  — скорость процесса адаптации.

Аналогично можно записать выражения для углекислого газа.

При среднесрочной адаптации изменяются коэффициенты чувствительности к гипоксии и гиперкапнии:

$$\rho_{1\text{адапт.}} = (\rho_{1\text{неадапт.}} - \rho_{1\text{крит.}})e^{-k\tau} + \rho_{1\text{крит.}},$$

$$\rho_{2\text{адапт.}} = (\rho_{2\text{неадапт.}} - \rho_{2\text{крит.}})e^{-k\tau} + \rho_{2\text{крит.}},$$

где  $\rho_{1\text{крит.}}$ ,  $\rho_{2\text{крит.}}$  — минимальные коэффициенты чувствительности, обеспечивающие гипоксическую и гиперкапническую стимуляцию при работе механизмов краткосрочной адаптации.

Состояние динамической системы, которая представлена в модели, определяется уровнем напряжений кислорода ( $pO_2$ ) и углекислоты ( $pCO_2$ ) в крови и тканевых регионах. Таким образом, в процессе моделирования формируются кислородные и углекислотные портреты организма при различной интенсивности функциональной деятельности мышц.

Предусмотрена индивидуализация модели. Учитывается вес, рост, структура мышц. В модель введены коэффициенты чувствительности организма к гипоксии и избытку углекислоты. Для каждого индивидуума они различны и зависят от степени адаптации организма к физическим нагрузкам и состояния его психофизиологического статуса. Опыт использования модели показывает, что уменьшение этих коэффициентов в тренировочном процессе свидетельствует об его эффективности. Однако эти коэффициенты должны быть больше некоторых пороговых значений, ведущих к разрегулируемости (неуправляемости) динамической системы и, как следствие, к развитию патологических процессов. В покое и при нагрузке определяются уровень вентиляции, МОК, напряжения кислорода в артериализированной крови, общее потребление кислорода и выделение углекислоты. Выбор коэффициентов чувствительности осуществляется таким образом, чтобы вентиляция и МОК при данном выборе, определенные в результате моделирования проведенного эксперимента, совпадали с данными, полученными в эксперименте.

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для расчетов использовались данные, полученные сотрудниками Эльбрусской медико-биологической станции при обследовании группы спасателей, работающих в Приэльбрусье. Обследование проводилось в покое

на велоэргометре на высоте 2100 м и в барокамере на «высоте» 5600 м над уровнем моря дважды на 2-е и 10-е сутки адаптации, т.е. исследовалась краткосрочная и среднесрочная адаптация тренированных лиц в условиях гипобарической гипоксии. При этом, между обследованиями, спасатели совершили восхождение на Эльбрус. Определялись минутный объем дыхания и кровообращения, содержание респираторных газов в выдыхаемом и альвеолярном воздухе, частота сердечных сокращений, частота дыхания, количество гемоглобина и насыщение крови кислородом. Полученные данные использовались для расчета параметров кислородных режимов организма и построения модельной характеристики системы дыхания [5]. Далее данные, полученные в результате физиологического обследования, и данные, полученные в результате моделирования в статике, вводились в качестве исходных в имитационную модель функционирования системы дыхания и осуществлялись расчеты показателей, характеризующих функциональное состояние системы дыхания в динамике дыхательного цикла. Расчеты выполнялись на модели функциональной системы дыхания с четырьмя тканями (Рис. 1). Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

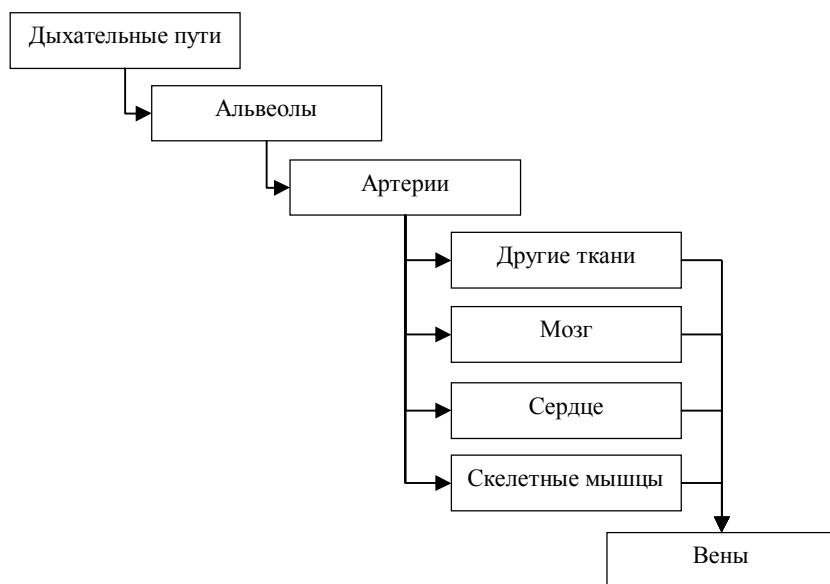


Рис.1. Структурно-функциональная схема подсистем, участвующих в процессе адаптации системы дыхания к условиям высокогорья

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 и регуляторного ресурса сердца желательно формировать соответствующие режимы системы

внешнего дыхания, 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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёты показали, что даже в начальный период адаптации напряжение кислорода в артериальной крови у спасателей составляло  $79,7 \pm 3$  мм рт.ст., а, следовательно, уровень тканевой гипоксии не был глубоким: в мозге  $30,91 \pm 2$  мм рт.ст., в тканях сердца —  $25,15 \pm 2$  мм рт.ст., в скелетных мышцах —  $25,65 \pm 2,3$  мм рт.ст., в тканях других органов в среднем —  $39,23 \pm 2,8$  мм рт.ст., что обусловило, в свою очередь, не очень высокий уровень венозной гипоксемии —  $34,5 \pm 2,31$  мм рт.ст.

Имитация покоя на высоте 5600 м в период краткосрочной адаптации (первое обследование) выявила, что, несмотря на развитие артериальной гипоксемии, не произошло углубления тканевой гипоксии:  $pO_2$  в тканях мозга составляло  $30,28 \pm 2,28$  мм рт.ст., в сердце —  $26,88 \pm 3,31$  мм рт.ст., в скелетных мышцах —  $27,8 \pm 1,94$  мм рт.ст., в тканях других органов в среднем  $38,06 \pm 4,27$  мм рт.ст., в венозной крови напряжение кислорода составило  $34,04 \pm 3,85$  мм рт.ст.

Второе обследование было проведено после тренировочного восхождения на Эльбрус, т.е. в процессе среднесрочной адаптации обследуемые испытали сочетанное воздействие гипобарической гипоксии и гиперметаболической гипоксии. Расчёты показали, что на высоте 2100 м снизился уровень артериальной гипоксемии с  $80,04 \pm 3$  мм рт.ст. до  $84,18 \pm 2,54$  мм рт.ст. Также повысилось напряжение кислорода в тканях головного мозга до  $33,3 \pm 0,8$  мм рт.ст., что практически составляет нормальный уровень  $pO_2$  для условий нормоксии. В тканях сердца  $pO_2$  возросло примерно на  $2,75 \pm 0,4$  мм рт.ст. и составило  $27,9 \pm 1,63$  мм рт.ст., в скелетных мышцах  $pO_2$  выросло на  $1,64 \pm 0,23$  мм рт.ст. и достигло уровня  $27,29 \pm 1,46$  мм рт.ст., в тканях других органов произошло увеличение  $pO_2$  с  $39,23 \pm 2,8$  мм рт.ст. до  $41,5 \pm 3,06$  мм рт.ст. Соответственно, несколько повысилось напряжение кислорода в смешанной венозной крови с  $34,5 \pm 2,31$  мм рт.ст. до  $36,46 \pm 1,97$  мм рт.ст.

Обследование на высоте 5600 м выявило, что, благодаря адаптационным процессам, немного снизился уровень артериальной гипоксемии по сравнению с первым обследованием:  $pO_2$  в артериальной крови выросло до  $57,88 \pm 3,42$  мм рт.ст., или на  $3,28 \pm 2,6$  мм рт.ст. Увеличение напряжения кислорода в тканях головного мозга было недостоверным (на  $0,63 \pm 0,04$  мм рт.ст.), в сердечной мышце произошло снижение  $pO_2$  на  $1,38 \pm 0,24$  мм рт.ст., в скелетных мышцах  $pO_2$  практически не изменилось (увеличилось на  $0,18 \pm 0,03$  мм рт.ст.), в тканях других органов напряжение кислорода увеличилось на  $1,66 \pm 0,32$  мм рт.ст., в смешанной венозной



крови — возросло на  $1,24 \pm 0,36$  мм рт.ст.

**Таблица 1.**

*Результаты расчетов парциального давления и напряжения кислорода в крови и тканях работающих органов у лиц, выполняющих тяжелую физическую работу в условиях среднегорья на 2-е сутки адаптации*

|     | Высота | Легкие | Аль-<br>веолы | Арте-<br>рия | Ткани |        |                         |        | Вена  |
|-----|--------|--------|---------------|--------------|-------|--------|-------------------------|--------|-------|
|     |        |        |               |              | мозг  | сердце | Скелет-<br>ные<br>мышцы | Другие |       |
| 1   | 2100   | 87,53  | 82,97         | 82,94        | 28,39 | 28,26  | 23,74                   | 36,93  | 32,45 |
|     | 5600   | 61,78  | 60,49         | 55,49        | 25,4  | 29,13  | 32,31                   | 43,2   | 38,87 |
| 2   | 2100   | 88,9   | 84,7          | 84,24        | 33,87 | 25,39  | 27,41                   | 41,59  | 36,61 |
|     | 5600   | 69,16  | 69,09         | 64,9         | 27,54 | 34,84  | 22,96                   | 34,67  | 30,43 |
| 3   | 2100   | 85,43  | 80,38         | 79,49        | 30,76 | 23,41  | 25,6                    | 39,15  | 34,37 |
|     | 5600   | 68,62  | 68,31         | 61,84        | 34,21 | 26,41  | 29,88                   | 42,15  | 37,39 |
| 4   | 2100   | 84,23  | 79,5          | 79,97        | 32,91 | 26,01  | 26,93                   | 40,81  | 36,03 |
|     | 5600   | 62,88  | 59,82         | 44,54        | 22,9  | 18,34  | 23,51                   | 32,31  | 28,94 |
| 5   | 2100   | 77,96  | 72,67         | 71,85        | 29,42 | 22,67  | 24,59                   | 37,67  | 33,1  |
|     | 5600   | 61,44  | 58,9          | 46,27        | 30,74 | 25,7   | 30,36                   | 37,99  | 34,52 |
| 6   | 2100   | 97,72  | 97,58         | 85,11        | 25,67 | 29,31  | 22,7                    | 35,19  | 30,85 |
|     | 5600   | 66,65  | 64,95         | 60,15        | 38,37 | 30,58  | 32,84                   | 45,56  | 40,6  |
| Ср. | 2100   | 86,96  | 82,97         | 80,6         | 30,91 | 27,15  | 28,64                   | 39,23  | 34,5  |
|     | 5600   | 65,09  | 63,59         | 55,53        | 31,63 | 27,5   | 28,64                   | 39,31  | 35,13 |

**Таблица 2.**

*Результаты расчетов парциального давления и напряжения кислорода в крови и тканях работающих органов у лиц, выполняющих тяжелую физическую работу в условиях среднегорья на 10-е сутки адаптации*

|     | Высота | Легкие | Аль-<br>веолы | Арте-<br>рия | Ткани |        |                         |        | Вена  |
|-----|--------|--------|---------------|--------------|-------|--------|-------------------------|--------|-------|
|     |        |        |               |              | мозг  | сердце | Скелет-<br>ные<br>мышцы | Другие |       |
| 1   | 2100   | 90,12  | 87,97         | 86,05        | 33,26 | 26,51  | 26,81                   | 40,96  | 36,11 |
|     | 5600   | 66,07  | 64,6          | 58,21        | 25,4  | 20,88  | 23,18                   | 34,5   | 30,52 |
| 2   | 2100   | 94,52  | 93,47         | 89,41        | 36,6  | 27,94  | 29,04                   | 44,05  | 38,88 |
|     | 5600   | 66,2   | 64,48         | 58,33        | 24,06 | 22,71  | 23,04                   | 34,51  | 30,33 |
| 3   | 2100   | 90,0   | 85,36         | 84,75        | 36,54 | 27,02  | 29,13                   | 43,98  | 38,73 |
|     | 5600   | 67,88  | 66,55         | 60,58        | 31,63 | 24,23  | 27,82                   | 41,77  | 36,64 |
| 4   | 2100   | 89,95  | 86,67         | 82,76        | 25,05 | 31,98  | 22,98                   | 36,86  | 30,95 |
|     | 5600   | 65,07  | 63,58         | 57,83        | 36,76 | 29,65  | 32,43                   | 44,24  | 39,63 |
| 5   | 2100   | 81,83  | 78,09         | 77,92        | 35,03 | 26,07  | 28,45                   | 42,68  | 37,63 |
|     | 5600   | 62,07  | 61,22         | 54,55        | 36,69 | 30,06  | 33,41                   | 43,52  | 39,31 |
| 6   | 2100   | 81,13  | 81,58         | 81,54        | 31,0  | 25,42  | 25,74                   | 39,44  | 34,71 |
|     | 5600   | 65,74  | 65,25         | 54,0         | 23,54 | 19,07  | 22,63                   | 33,32  | 29,45 |
| Ср. | 2100   | 87,93  | 85,44         | 83,74        | 32,92 | 27,49  | 27,03                   | 41,16  | 36,17 |
|     | 5600   | 65,5   | 64,28         | 57,23        | 29,68 | 24,43  | 27,09                   | 38,65  | 34,31 |

Результаты данного обследования свидетельствуют о том, что практически у всех обследуемых при гипобарической гипоксии имеются резервы физической мощности и они могут выполнить значительную физическую нагрузку, т.к. напряжение кислорода в скелетных мышцах и мышце сердца еще весьма далеко от критических уровней. Гораздо ниже запас прочности у тканей мозга, что может привести, в частности, к нарушению координации и затруднить принятие адекватных решений. Следовательно, лицам, подвергающимся совместному воздействию гипобарической гипоксии, гиперметаболической гипоксии и работающим в

условиях повышенной ситуационной напряженности, необходимо обратить особое внимание на способы обеспечения психофизиологической работоспособности и быстрого восстановления после физического утомления.

## **Выводы**

Представлен срез функционального состояния лиц, подвергающихся сочетанному воздействию гипобарической гипоксии и гиперметаболической гипоксии, характеризующий слабые звенья их организма.

Данная работа позволила наметить ряд задач, которые необходимо разрешить для оценки функционального состояния организма человека в процессе его краткосрочной и среднесрочной адаптации. Для того, чтобы оценить состояние функциональных систем организма, необходимо провести обследование системы дыхания при физической нагрузке и при нагрузке в условиях повышенного ситуационного напряжения при имитации в барокамере различных внешних возмущающих воздействий. При этом исследование психофизиологических функций целесообразно проводить дважды — до выполнения стандартной нагрузки и непосредственно после.

Формирование соответствующих режимов системы внешнего дыхания с учетом оптимального дыхательного объема, продолжительности фаз вдоха и выдоха для каждого возможного уровня функциональной активности содействует увеличению кислородного запаса тканей и регуляторного ресурса сердца, что особенно значимо при выполнении работы в экстремальных условиях высокогорья.

1. Онопчук Ю.Н. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия // *Биоэкология. Единое информационное пространство* — К. — 2001. — С. 59–81.
2. Онопчук Ю.Н., Белошицкий П.В., Аралова Н.И. К вопросу о надежности функциональных систем организма // *Кибернетика и вычислительная техника*. — 1999. — Вып. 122. — С. 72–89.
3. Полинкевич К.Б., Онопчук Ю.Н. Конфликтные ситуации при регулировании основной функции системы дыхания организма и математические модели их разрешения // *Кибернетика*. — 1986. — № 3. — С. 100–104.
4. Білошицький П.В., Ключко О.М., Онопчук Ю.М. Результати дослідження проблем адаптації українськими вченими в Приельбруссі // *Вісн. НАУ*. — 2008. — № 1. — С. 102–108.
5. Онопчук Ю.М., Білошицький П.В., Ключко О.М. Створення математичних моделей за результатами досліджень українських вчених на Ельбрусі // *Вісн. НАУ*. — 2008. — № 3. — С. 146–155.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE SHORT- AND MEDIUM-TERM ADAPTATION OF RESPIRATORY SYSTEM OF THE PERSONS WORKING IN EXTREME CONDITIONS OF HIGH MOUNTAINS

**N.I. Aralova**

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences  
of Ukraine (Kiev)*

**Introduction.** In addition to experimental studies in recent years the methods of mathematical modeling of individual functional systems and the whole organism in certain situations are widely used, the results of which complement the system of experimental data and allow to make a more complete assessment of the functional state of the organism.

**Purpose.** To explore on a mathematical model of the respiratory system the functional mechanisms of adaptation of the respiratory system to the conditions of mountain meteorological factors for persons performing heavy exercise in a hypobaric hypoxia.

**Results.** The model, that describes transport and mass exchange of respiratory gases in the respiratory tract, the alveolar space, blood and tissues with use of ordinary nonlinear differential equations, for the mathematical analysis of the adaptive capacity of the organism hypoxia of various etiologies is used. The regulation is based on a compromise resolution of conflicts arising between the tissues and organs in the struggle for oxygen in a deficit. On the basis of this model, the models of short time and medium adaptation persons performing heavy physical activity in a midlands are created. Results of simulation experiment are presented.

**Conclusion.** The article presents a mathematical model of short-term and medium term adaptation FRS for rescuers and the results of the numerical analysis of this model. On this basis, the practical recommendations for the selection of the persons, that are exposed to the combined effects of hypobaric hypoxia and the hypermetabolic hypoxia, are given.

**Keywords:** short-term adaptation, medium term adaptation, respiration system, hypobaric hypoxia, hypermetabolic hypoxia, reliability, mathematical model of respiratory system.

1. Onopchuk Yu.N. Homeostasis function of the respiratory system as a result of in-system and system-environment interaction // *Bioekomedicine. Unified Information Space* — Kiev — 2001. — P.59–81(in Russian)
2. Onopchuk Y.N., Beloshitsky P.V. Aralova N.I. On the question of reliability of functional systems // *Cybernetics and computing tehnics*. 1999. — Vol. 122. — P. 72–89 (in Russian)
3. Polinkevich K.B., Onopchuk Y.N. Conflicts in the regulation of the main function of the respiratory system of the body, and mathematical models of their solution // *Cybernetics*. — 1986. — № 3. — P. 100–104.
4. Biloshitsky P.V. Klyuchko O.M., Onopchuk Y.N. Research results of the problems of adaptation by Ukrainian scientists on Elbrus // *Visn. NAU*. — 2008. — № 1. — P. 102–108.
5. Onopchuk Y.M., Biloshitsky P.V. Klyuchko O.M. Creation of mathematical models for the research by Ukrainian scientists on Elbrus. // *Visn. NAU*. — 2008. — № 3. — P. 146–155.

Получено 07.09.2015