

# Медицинская и биологическая кибернетика

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt192.03.064>

УДК 519.8.812.007

**Л.Я.-Г. ШАХЛИНА**<sup>1</sup>, д-р. мед. наук, проф.  
профессор кафедры спортивной медицины  
e-mail: [sportmedkafedra@gmail.com](mailto:sportmedkafedra@gmail.com)

**Н.И. АРАЛОВА**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.  
старший научный сотрудник отд. оптимизации управляемых процессов  
email: [aralova@ukr.net](mailto:aralova@ukr.net)

<sup>1</sup> Национальный университет физического воспитания и спорта Украины  
ул. Физкультуры 1, г. Киев, 03150, Украина

<sup>2</sup> Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины  
пр. Акад. Глушкова, 40, г. Киев, 03187, Украина

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА СПОРТСМЕНОК НА ВДЫХАНИЕ ГИПОКСИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЫХАНИЯ

---

На математической модели функциональной системы дыхания имитировалось вдыхание спортсменками газовой смеси с низким содержанием кислорода и исследовалась зависимость функциональной самоорганизации их организма от гормонального статуса на протяжении менструального цикла. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при планировании тренировочного процесса и формировании команд в соревновательной деятельности спортсменок необходимо учитывать особенности адаптации к гипоксической среде при циклических изменениях концентрации половых гормонов в их организме.

**Ключевые слова:** математическая модель функциональной системы дыхания, тренировочный процесс спортсменок, адаптация организма спортсменок, интервальная гипоксическая тренировка, функциональная самоорганизация организма.

### ВВЕДЕНИЕ

Адаптация к высоким нагрузкам остается одной из актуальных проблем в физиологии спорта, труда и в практике спортивной медицины. В современном спорте высших достижений при существующих тренировочных и соревновательных нагрузках организм находится на грани предельных возможностей индивидуальной адаптации [1]. Исследование механизмов регуляции системы дыхания —

© Л. Я.-Г. ШАХЛИНА, Н.И. АРАЛОВА, 2018

одной из важнейших функциональных систем организма — при различных внутренних и внешних возмущениях относится к центральным задачам физиологии дыхания и кровообращения.

Успешное развитие науки об управлении, достижения в разработке теории систем, проникновение теории систем в самые разные области науки, техники и социальной сферы сделали возможным осуществление системного подхода к изучению биологических систем и к управлению тренировочным процессом спортсменок.

Применяющийся в спортивной педагогике системный подход к управлению процессом подготовки спортсменок, системообразующим фактором в котором является спортивный результат, позволяет осуществлять детальный анализ процесса подготовки спортсменок и роли в этом процессе биологических особенностей женского организма [2, 3], его реакций в разные фазы менструального цикла (МЦ) на возмущения внутренней и внешней среды организма, из которых одним из наиболее распространенных является гипоксическая гипоксия [4, 5].

Анализ спортивных результатов лучших спортсменок мира свидетельствует о том, что двигательная одаренность, высокий духовный потенциал, огромная трудоспособность и упорство в достижении цели позволяет им достичь спортивных результатов, которые ранее были доступны только мужчинам [5].

Вместе с тем, несмотря на большое количество исследований [5, 6], остаются актуальными и малоизученными закономерности формирования адаптационных реакций женского организма к изменениям внешней или внутренней среды. Также представляет интерес характер влияния биологических особенностей женского организма (цикличность функций его систем в связи с изменением концентрации половых гормонов в крови организма женщины в разные фазы менструального цикла) на психические состояния и физическую работоспособность спортсменок [2, 7].

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Обеспечение работоспособности спортсменок, развитие их выносливости обусловлено, прежде всего, аэробной производительностью, определяющейся развитием и состоянием функциональной системы дыхания (ФСД), которая включает систему внешнего дыхания, кровообращения, дыхательную функцию крови, механизмы биологической регуляции, обеспечивающие тканевое дыхание [8]. Также можно предположить, что, наряду с общими закономерностями реакций организма на внутренние и внешние возмущающие воздействия, нужно учитывать реакцию организма женщины на гипоксию на протяжении МЦ.

Представляют также интерес недостаточно изученные реакции ФСД на изменения гормонального состояния организма женщины в разные фазы МЦ и, в частности, характер кислородных режимов организма (КРО). Эти данные имеют не только теоретическое, но и практическое значение, т.к. они во многом определяют работоспособность женщин [4, 8, 9].

В современной подготовке спортсменок нашло применение такое нетрадиционное средство, как тренировочный процесс в горных условиях и интервальная гипоксическая тренировка, направленные на повышение выносливос-

ти и развитие функциональной системы дыхания [8, 9]. Однако, несмотря на многолетнее использование горного климата, особенности реакции организма женщин на низкое парциальное давление кислорода во вдыхаемом воздухе в различные фазы менструального цикла (МЦ) требует дальнейшего исследования, т.к. женские половые гормоны — эстрогены — являются важным звеном в адаптационно-трофических реакциях организма. Эта группа гормонов обеспечивает возможности адекватного приспособления организма женщины к различным возмущающим воздействиям, в том числе и к физическим нагрузкам, и к недостатку кислорода во вдыхаемом воздухе. Влияние изменяющегося гормонального статуса организма на функциональное состояние и работоспособность спортсменок позволяет предположить, что реакция организма спортсменок на вдыхание газовых смесей с низким содержанием кислорода в разные фазы МЦ будет неодинаковой [4, 8].

Обеспечение работоспособности спортсменок, развитие выносливости обусловлено, прежде всего, аэробной производительностью, определяющейся развитием и состоянием функциональной системы дыхания [8]. Отметим также, что если рассматривать организм человека с точки зрения теории надежности и представить его в виде модели цепи со слабым звеном, то таким слабым звеном является система дыхания [10]. Она включает органы внешнего дыхания, систему кровообращения, систему дыхательной функции крови, механизмы биологической регуляции, обеспечивающие тканевое дыхание с ее сложными звеньями — нервной и гуморальной регуляцией.

На протяжении менструального цикла происходят изменения гормонального статуса, вызывая сложную перестройку нейрогуморальной регуляции функций всех систем организма — дыхания, кровообращения, дыхательной функции крови, потребления кислорода, существенно влияя на физическую работоспособность женщины [9].

В первую фазу цикла функция системы дыхания организма женщины даже в состоянии покоя достаточно напряжена: высокая легочная вентиляция и скорость потребления кислорода сопровождаются низкой экономичностью из-за увеличения частоты дыхания (высокий вентиляционный эквивалент и низкий кислородный эффект дыхательного цикла). В системе кровообращения высокая частота сердечных сокращений (ЧСС) при самом низком ударном объеме обуславливает достаточно высокий минутный объем крови (МОК). Низкими являются содержание гемоглобина в крови и, следовательно, кислородная емкость крови [11]. Снижается общая и специальная работоспособность спортсменок, увеличивается функциональная стоимость работы.

Постменструальная (вторая) и постовуляторная (четвертая) фазы цикла относятся к оптимальным фазам: функции системы дыхания и кровообращения наиболее экономичны и в состоянии покоя, и при физических нагрузках, наибольшая кислородная емкость крови повышает аэробные возможности организма спортсменок.

Третья фаза характеризуется наиболее высокой скоростью потребления кислорода, при этом увеличение минутного объема дыхания (МОД) происходит в основном за счет увеличения дыхательного объема. Средний уровень МОК обуславливается небольшими величинами ударного объема и частоты сердечных сокращений. Фаза характеризуется высокой функциональной стоимостью работы.

Для пятой, предменструальной фазы цикла, характерны высокая и наименее экономичная легочная вентиляция, осуществляющаяся в основном за счет увеличения частоты дыхания при наименьшем дыхательном объеме, следовательно, высоким вентиляционным эквивалентом и низким кислородным эффектом дыхательного цикла. Также неэкономично работает система кровообращения — высокое значение МОК обусловлено компенсаторно высокой частотой сердечных сокращений при низком сердечном выбросе. Снижается концентрация гемоглобина в крови. Следствием этого является низкая специальная и общая работоспособность и высокая функциональная стоимость выполненной работы [4, 9].

Настоящая работа является продолжением изучения реакций функциональной системы дыхания на изменения гормонального состояния организма женщины-спортсменки на протяжении МЦ. В [4] представлены результаты исследования реакции организма на вдыхание газовой гипоксической смеси с 11 % кислорода (гипоксический тест 10 минут) в разные фазы МЦ. Однако современные методики не позволяют определить степень тканевой гипоксии [9] и выявить на основе этого функциональный ресурс организма женщины.

Исследования на математической модели ФСД позволили детально проанализировать кислородные режимы отдельных органов и организма в целом и роль отдельных компенсаторных механизмов саморегуляции на вдыхание гипоксических смесей с 11 % кислорода [12, 13]. Имитация на математической модели массопереноса и массообмена респираторных газов показали, что вдыхание газовой смеси с 11 % кислорода приводит к снижению напряжения кислорода в артериальной крови ниже 50 мм рт.ст. во все фазы МЦ [14].

**Цель** исследования — определение реакции функциональной системы дыхания и выявление степени тканевой гипоксии у спортсменок при вдыхании гипоксической газовой смеси в разные фазы менструального цикла.

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ**

Системный подход требует, прежде всего, получения данных о легочной вентиляции, системном кровотоке, дыхательной функции крови, гипоксическом состоянии организма в состоянии покоя и при внутренних и внешних возмущениях.

Модель построена на гипотезе, что основной функцией системы дыхания является наиболее оптимальное удовлетворение потребности организма в биологической энергии [15]. Для этого уровень потребления кислорода должен обеспечить энергией скорость синтеза необходимого количества аденозинтрифосфата (АТФ), а скорость массопереноса  $O_2$  — уровень потребления кислорода, который должен соответствовать потребности в нем организма (кислородному запросу). Регулирование кислородных режимов организма осуществляется единой системой, которая координирует и интегрирует сложнейшую работу самых различных механизмов и подчиняет ее единой задаче — поддерживать на оптимальном уровне кислородные параметры на всем пути  $O_2$  в организме, т.е. наиболее экономно, эффективно

и надежно обеспечивать соответствие доставки кислорода кислородному запросу тканей.

**Математическая модель функциональной системы дыхания.** Применяя системный подход для описания процесса массопереноса респираторных газов в организме, представим систему дыхания в виде управляемой системы, в которой осуществляется массоперенос кислорода, углекислого газа и азота и управляющей, которая вырабатывает определенные воздействия, обеспечивающие нормальное течение процесса массопереноса газов [16–18]. Математическая модель управляемой части системы дыхания в [12, 13] представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику напряжений кислорода на всех этапах его пути в организме, в кратком виде имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dp_i O_2}{d\tau} &= \varphi(p_i O_2, p_i CO_2, \eta_i, \dot{V}, Q, Q_{t_i}, G_{t_i} O_2, q_{t_i} O_2) \\ \frac{dp_i CO_2}{d\tau} &= \phi(p_i O_2, p_i CO_2, \eta_i, \dot{V}, Q, Q_{t_i}, G_{t_i} CO_2, q_{t_i} CO_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где функции  $\varphi$  и  $\phi$  детально описаны в [12, 13];  $\dot{V}$  — вентиляция,  $\eta$  — степень насыщения гемоглобина кислородом,  $Q$  — объемная скорость системного и  $Q_{t_i}$  — локальных кровотоков,  $q_{t_i} O_2$  — скорость потребления кислорода  $i$ -ым тканевым резервуаром,  $q_{t_i} CO_2$  — скорость выделения углекислого газа в  $i$ -ом тканевом резервуаре. Скорости  $G_{t_i} O_2$  потока кислорода из крови в ткань и  $G_{t_i} CO_2$  углекислого газа из ткани в кровь определяется соотношением

$$G_{t_i} = D_{t_i} S_{t_i} (p_{ct_i} - p_{t_i}), \quad (2)$$

где  $D_{t_i}$  — коэффициенты проницаемости газов через аэрогематический барьер,  $S_{t_i}$  — площадь поверхности газообмена.

Целью управления [16] является вывод возмущенной системы в стационарный режим, при котором выполняются соотношения

$$|G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2| \leq \varepsilon_1, \quad |G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2| \leq \varepsilon_2, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  заранее заданные достаточно малые положительные числа. При этом на управляющие параметры накладываются ограничения

$$0 \leq \dot{V} \leq \dot{V}_{max}, \quad 0 \leq Q \leq Q_{max}, \quad 0 \leq Q_{t_i} \leq Q, \quad \sum_{i=1}^m Q_{t_i} = Q, \quad (4)$$

где  $m$  — количество тканевых резервуаров в организме.

Кроме того, для разрешения конфликтной ситуации между исполнительными органами регуляции (дыхательными мышцами, сердечными мышцами и гладкими мышцами сосудов), являющимися в тоже время потребителями кислорода, и остальными тканями и органами [16, 19], введены соотношения

$$q_{resp.m.} O_2 = f(V), q_{heart.m.} O_2 = \varphi(Q), q_{smooth.m.} O_2 = \phi(Q). \quad (5)$$

В качестве критерия регуляции рассматриваем функционал

$$I = \min_{\substack{0 \leq \dot{V} \leq \dot{V}_{max} \\ 0 \leq Q_i \leq Q_{max}}} \int_{\tau_0}^T [\rho_1 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} O_2 - q_{t_i} O_2)^2 + \rho_2 \sum_{t_i} \lambda_{t_i} (G_{t_i} CO_2 + q_{t_i} CO_2)^2] dt \quad (6)$$

$$i = \overline{1, m},$$

где  $\tau_0$  — момент начала воздействия возмущения на систему,  $T$  — длительность этого воздействия,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — коэффициенты, характеризующие чувствительность конкретного организма к гипоксии и гиперкапнии,  $\lambda_{t_i}$  — коэффициенты, отражающие морфологические особенности отдельного тканевого резервуара  $i$ .

При таком управлении минимизируются общие затраты кислорода в организме и в каждом тканевом регионе, а также накопление углекислого газа.

При физической нагрузке, изменении качественного состава вдыхаемого воздуха и других возмущениях внешней и внутренней среды организма, математическая модель (1)–(6) имитирует разрешение конфликтной ситуации между тканями исполнительных и управляющих органов регуляции в борьбе за кислород [16] в виде перераспределения кровотока.

Пусть в момент времени  $\tau_0$  резко увеличилась интенсивность работы группы скелетных мышц. В модели это отражается увеличением скорости потребления кислорода  $q_{scel.m.} O_2$  (и продуцированием углекислого газа  $q_{scel.m.} CO_2$ ):  $q_{scel.m.} O_2(\tau_0) \gg q_{scel.m.} O_2(\tau > \tau_0)$ . Если система до момента времени  $\tau_0$  находилась в равновесии, то  $G_{scel.m.} O_2(\tau_0) \ll q_{scel.m.} O_2(\tau_0)$  и потребуются значительное увеличение кровотока в скелетной мышце для компенсации разности  $G_{scel.m.} O_2(\tau_0) - q_{scel.m.} O_2(\tau_0)$ . Это осуществляется двумя путями [20]:

1. Не изменяя величины системного кровотока  $Q$  перераспределить кровотоки по тканям. В этой ситуации возникает конфликт между скелетными мышцами, работа которых потребовала усиления кровотока различными тканевыми регионами, у которых вследствие этого нарушается равновесие. Разрешение этой конфликтной ситуации состоит в том, что все ткани недополучают соответствующего количества кислорода.

2. Рост кровотока в тканях возможен за счет увеличения объемной скорости системного кровотока  $Q$ . В этом случае увеличивается интенсивность работы мышцы сердца, увеличивается ее кислородный запрос и тогда в ней развивается кислородная недостаточность. Таким же образом кислородная недостаточность возникнет в мышце сердца при компенсации гипоксии за счет работы дыхательных мышц, интенсификация работы которых увеличивает вентиляцию легких.

Критерий качества регуляции (6) учитывает оба стимула регуляции дыхания — гипоксический, направленный на компенсацию недостатка кислорода, и гиперкапнический, направленный на вывод из организма избытка углекислого газа. Задача сводится к поиску оптимальных управляющих воздействий  $\dot{V}$ ,  $Q$  и  $Q_{ti}$ .

При возмущениях внешней и внутренней среды организма возникает борьба за кислород между работающими мышцами и мышцей сердца. В соответствии с моделью оптимального выбора скорости кровотока в органах при возмущении [16] для компромиссного разрешения этой конфликтной ситуации будет выбрано некоторое компромиссное решение, при котором обе группы мышц будут ощущать нехватку кислорода и напряжение  $O_2$  в них снизится. При этом необходимо минимизировать функционалы

$$\begin{aligned}
 J_{brain} &= \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{brain} O_2 - q_{brain} O_2)^2 V_{ct_{brain}}}{W_{brain}} d\tau \\
 &+ \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{brain} CO_2 + q_{brain} CO_2)^2 V_{ct_{brain}}}{W_{brain}} d\tau \\
 J_{heart} &= \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{heart} O_2 - q_{heart} O_2)^2 V_{ct_{heart}}}{W_{heart}} d\tau \\
 &+ \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{heart} CO_2 + q_{heart} CO_2)^2 V_{ct_{heart}}}{W_{heart}} d\tau \\
 J_{scel.m.} &= \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{scel.m.} O_2 - q_{scel.m.} O_2)^2 V_{ct_{scel.m.}}}{W_{scel.m.}} d\tau \\
 &+ \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{scel.m.} CO_2 + q_{scel.m.} CO_2)^2 V_{ct_{scel.m.}}}{W_{scel.m.}} d\tau \\
 J_{other.tis.} &= \int_{\tau_0}^T \frac{(G_{other.tis.} O_2 - q_{other.tis.} O_2)^2 V_{ct_{other.tis.}}}{W_{other.tis.}} d\tau + \\
 &\int_{\tau_0}^T \frac{(G_{other.tis.} CO_2 - q_{other.tis.} CO_2)^2 V_{ct_{other.tis.}}}{W_{other.tis.}} d\tau,
 \end{aligned}$$

где  $\tau_0$  — момент начала возмущающей нагрузки,  $T$  — длительность этого воздействия,  $W_{brain}$ ,  $W_{heart}$ ,  $W_{scel.m.}$ ,  $W_{other.tis.}$  — масса мозга, сердца, скелетных мышц и других тканей соответственно,  $V_{ct_{brain}}$ ,  $V_{ct_{heart}}$ ,  $V_{ct_{scel.m.}}$ ,  $V_{ct_{other.tis.}}$  — объем крови, омывающий соответствующую группу тканей.

**Исходные данные для расчетов.** Для получения исходных данных для имитации процесса дыхания обследовали здоровых девушек с нормальной менструальной функцией. Исследования проведены однократно в каждую фазу цикла. Фазы цикла определяли с помощью специального анкетного опроса, по данным ежедневного измерения базальной температуры, феномену „папоротника“ (цитологический тест эстрогенной насыщенности организма).

Также определяли МОД, газовый состав выдыхаемого и альвеолярного воздуха, параметры системы гемодинамики и крови. С их помощью рассчитывали показатели, характеризующие состояние системы дыхания и кровообращения (скорость потребления кислорода, дыхательный объем, дыхательный коэффициент, МОД, систолический объем) и показатели, характеризующие экономичность, интенсивность и эффективность системы дыхания и гемодинамики (вентиляционный и гемодинамический эквиваленты, скорость потребления кислорода на отдельных участках его массопереноса, кислородные эффекты дыхательного и сердечного циклов и т.п.) [21].

Далее, используя рассчитанные параметры и данные, полученные в результате обследования, имитировали условия гипобарии и рассчитывали парциальные давления и напряжения респираторных газов в альвеолярном воздухе, артериальной и смешанной венозной крови, крови тканевых капилляров [14, 22, 23].

На математической модели функциональной системы дыхания проведена имитация вдыхания спортсменками нормобарической и гипобарической смеси с 11% кислорода в разные фазы МЦ. Для индивидуализации модели системы дыхания использовали следующие исходные данные, полученные в результате функционального обследования: скорость потребления кислорода, минутный объем крови, масса тела, содержание гемоглобина, дыхательный коэффициент. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

**Табл. 1. Исходные данные для имитации вдыхания газовой смеси соответствующей условиям нормоксии и гипоксической гипоксии с 11 % кислорода при различной концентрации половых гормонов в организме спортсменок**

Показатели	% O <sub>2</sub>	Фазы МЦ				
		I	II	III	IV	V
Q, ml / s	21	57,93	61,74	62,48	66,72	67,28
	11	79,0	77,14	80,66	79,14	83,15
q <sub>t</sub> O <sub>2</sub> , ml / s	21	3,26	2,91	3,33	2,93	2,75
	11	2,46	4,73	4,12	4,077	3,46
RQ	21	0,86	0,81	0,92	0,80	0,90
	11	0,85	0,94	0,85	0,84	0,85
V <sub>t</sub> , ml	21	388,4	352,6	400,6	345,3	310,0
	11	444,6	469,6	544,2	439,8	422,6
Hb	21	124,5	125,5	120,9	122,0	126,6
	11	124,9	124,1	123,0	124,7	130,8
t, c	21	3,57	3,7	3,4	3,57	2,9
	11	3,4	3,8	3,5	3,5	3,57
W, kg	21	56	56	56,5	57	57,5
	11	56	56	56,5	57	57,5



Исследования проводили на модели с четырьмя тканями. При этом скорости потребления кислорода по тканевым регионам распределялись следующим образом: в мозге 14,65 %, в тканях сердца 7,87 %, в скелетных мышцах 30,2 % и на все остальные ткани 43 %. Что касается системного кровотока, то его доля в тканях мозга составляла 15,5 %, в сердечной мышце 4,46 %, в скелетных мышцах 20 % и 60 % в тканях других органов.

Известно [15], что уровень напряжения кислорода в тканях зависит от кровоснабжения и интенсивности окислительных процессов в них. Так, скорость потребления кислорода тканями мозга снижается, если парциальное давление кислорода во вдыхаемой газовой смеси падает ниже 100 мм рт.ст. [24]. В условиях гипоксической гипоксии при содержании во вдыхаемом воздухе 11 % кислорода, его напряжение в мозге, сердце, скелетных мышцах и других органах существенно снижается [14]. Так, в условиях нормоксии снижение минутного объема крови (во вторую фазу цикла МОК меньше на 489 мл/мин по сравнению с четвертой) приводит к снижению напряжения кислорода в мозге на 2,1 мм рт.ст., в тканях сердца — на 1,6 мм рт.ст., в смешанной венозной крови на 1,6 мм рт.ст. по сравнению с четвертой фазой. Незначительное увеличение в пятую фазу по отношению ко второй фазе цикла МОК на 537 мл/мин вызывает более выраженные различия напряжения кислорода в изучаемых тканях в эти фазы, так  $pO_2$  в мозге ниже на 3,28 мм рт.ст., в сердечной мышце на 2,66 мм рт.ст., в скелетных мышцах — на 2,3 мм рт.ст. Отметим более выраженную, по сравнению с сердечной мышцей, реакцию на гипоксическую гипоксию тканями мозга.

При увеличении МОК в пятую фазу на 633 мл/мин по отношению ко второй, вдыхание гипоксической смеси с 11 % кислорода привело бы к еще более выраженному снижению  $pO_2$ , так, в тканях мозга напряжение кислорода снизилось бы на 5,33 мм рт.ст., в сердечной мышце на 2,43 мм рт.ст., в скелетных мышцах — на 4,5 мм рт.ст., в тканях других органов на 4,4 мм рт.ст. Напряжение кислорода в тканях стало бы ниже критических уровней, это привело бы к снижению скорости потребления кислорода в них и, как следствие, к нарушению их функций. В смешанной венозной крови  $pO_2$  снизилось бы на 4,1 мм рт.ст., т.е. наблюдалась бы выраженная венозная гипоксемия.

Далее на модели исследовали компенсаторную роль локальных механизмов саморегуляции в предупреждении развития тканевой гипоксии при имитации дыхания газовой смесью с 11 % кислорода на протяжении МЦ. Были проведены следующие серии экспериментов.

**Эксперимент 1.** *МОД – постоянный, компенсация осуществляется только за счет МОК.* На рис. 1. представлены результаты имитации дыхания спортсменками смеси с 11 % кислорода. Парциальное давление кислорода в альвеолярном пространстве во все фазы цикла оказалось бы ниже 50 мм рт.ст., исключение составляет лишь четвертая фаза со значением этого параметра 50,9 мм рт.ст. В артериальной крови напряжение кислорода снизилось бы намного ниже критического уровня.

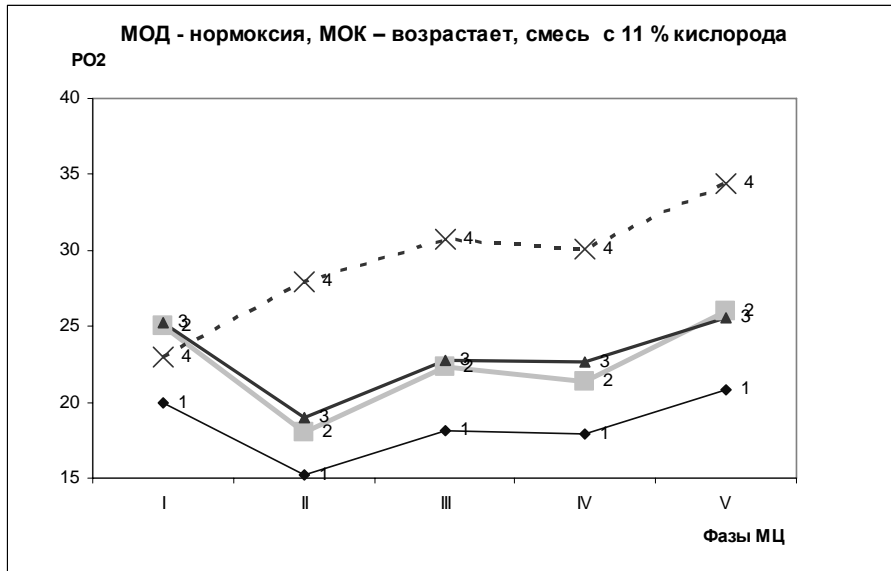
Естественным следствием артериальной гипоксемии является снижение напряжения кислорода в исследуемых тканях ниже критического уровня.

Заметим также, что в первую фазу МЦ в условиях нормоксии напряжение кислорода в исследуемых тканях выше, чем во вторую, третью и

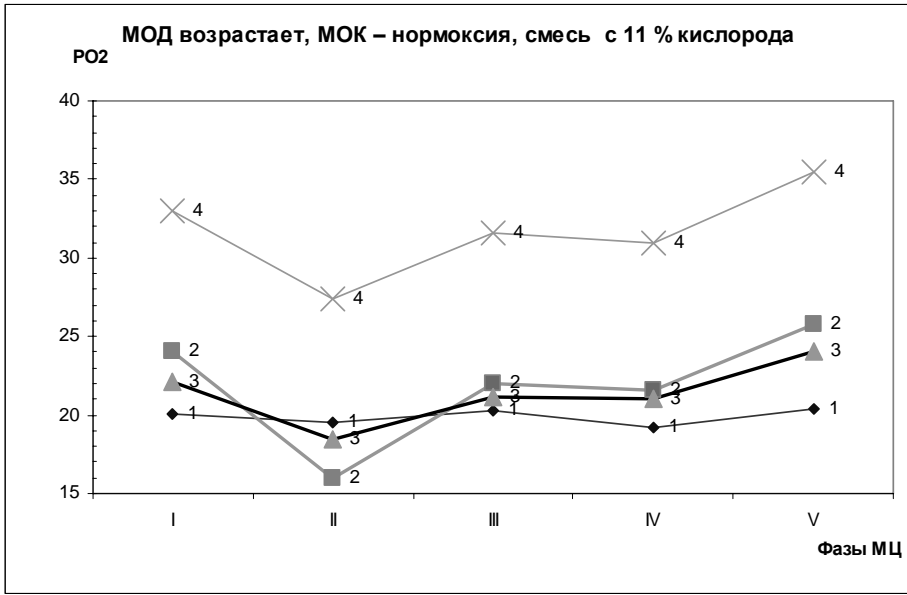
четвертую, в то время, как в первую фазу при гипоксической гипоксии ткани других органов находятся в еще более сложных условиях в плане снабжения их кислородом.

**Эксперимент 2.** МОК равен условиям нормоксии, компенсация осуществляется только за счет системы дыхания. Несколько повышается парциальное давление кислорода в альвеолярном воздухе, особенно в первую, третью и пятую фазы цикла (Рис. 2). Напряжение кислорода в смешанной венозной крови ниже 30 мм рт.ст. Особенно это выражено во вторую фазу, и только в пятую фазу  $pO_2$  в смешанной венозной крови несколько выше по сравнению с другими.

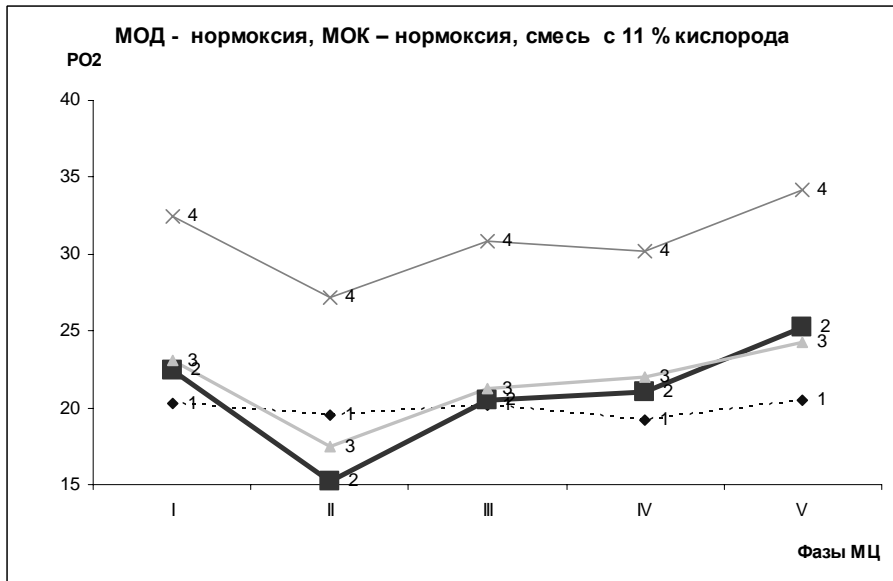
Снижение в артериальной крови напряжения кислорода ниже критического уровня может привести к снижению скорости потребления кислорода с проявлением некомпенсированной гипоксии в тканях. Так, исследование на модели показало, что при вдыхании газовой смеси с 11 % кислорода напряжение кислорода в тканях мозга снизилось бы до 16,4 мм рт.ст., в третью и пятую фазы оно было бы несколько выше 20 мм рт.ст., лишь в четвертую фазу оно было бы 25,91 мм рт.ст., что все равно значительно ниже физиологической нормы. Также снизилось бы  $pO_2$  и в скелетных мышцах, и в тканях остальных органов, кроме мышцы сердца, в которой в первую, третью и пятую фазы  $pO_2$  увеличилось бы, не достигая, однако, значений нормоксии, во вторую и четвертую было бы ниже 20 мм рт.ст. Таким образом, если при гипоксической гипоксии не происходит увеличение МОК, то это бы привело к выраженной артериальной и венозной гипоксемии, особенно во вторую и четвертую фазы, а это, в свою очередь, привело бы к снижению  $pO_2$  в тканях работающих органов.



**Рис. 1.** Динамика напряжения кислорода в тканях 1 — сердце, 2 — мозг, 3 — скелетные мышцы, 4 — другие ткани по фазам цикла при компенсации только за счет системы кровообращения



**Рис. 2.** Динамика напряжения кислорода в тканях 1 — сердце, 2 — мозг, 3 — скелетные мышцы, 4 — другие ткани по фазам цикла при компенсации только за счет системы дыхания



**Рис. 3.** Динамика напряжения кислорода в тканях. 1 — сердце, 2 — мозг, 3 — скелетные мышцы, 4 — другие ткани по фазам цикла при отсутствии компенсации за счет системы дыхания и кровообращения

**Эксперимент 3.** *Величины МОД и МОК не изменяются по сравнению с нормоксией.* Расчеты показали, что во вторую и четвертую фазы происходит снижение напряжения кислорода ниже 50 мм рт.ст., в третью фазу этот показатель составил бы 50,23 мм рт.ст., в пятую фазу — несколько выше. На рис. 3 видно, что напряжение кислорода в артериальной крови находится между значениями таковых при отсутствии компенсации со стороны МОД и МОК. Что касается степени венозной гипоксемии, то наименьшие значения этого показателя были во вторую фазу, несколько большими были бы величины в третью и четвертую фазы, в пятую фазу  $pO_2$  в смешанной венозной крови составило бы 30 мм рт.ст.

При полном отсутствии компенсации со стороны системы дыхания и кровообращения в тканях мозга во вторую фазу происходит резкое снижение  $pO_2$ , в третью и четвертую фазы этот показатель несколько увеличивается до 20,77 и 20,86 мм рт.ст, в пятую фазу до 25,27 мм рт.ст., т.е. эти показатели даже несколько выше, чем при отсутствии компенсации или со стороны МОД, или со стороны МОК. При полном отсутствии компенсаторной реакции со стороны системы дыхания и кровообращения значения показателя  $pO_2$  в сердечной мышце примерно такие же, как и при отсутствии компенсации со стороны МОК. Когда же отсутствует увеличение легочной вентиляции, это приводит к самым низким величинам напряжения кислорода в тканях сердца.

Анализ имитации отсутствия компенсации со стороны системы внешнего дыхания выявил, что достоверно снижаются  $pO_2$  и  $pCO_2$  во все фазы цикла, при этом парциальное давление кислорода в альвеолах и напряжение  $O_2$  в артериальной крови выше в третью и пятую фазы цикла по сравнению со второй и четвертой. При отсутствии компенсации только со стороны системного кровотока при гипоксической гипоксии снижение этих параметров менее выражено, но снижается при этом  $pO_2$  в смешанной венозной крови.

Следующая серия экспериментов позволила выявить значение неодинаковых величин МОД и МОК для обеспечения организма кислородом в разные фазы МЦ. Результаты имитационного моделирования представлены в табл. 2.

**Эксперимент 4.** *Во все фазы цикла при нормоксии величины МОД и МОК выбираются соответствующие второй фазе цикла, когда значения этого показателя наименьшие попеременно или одновременно.* При сниженном МОК парциальное давление кислорода в альвеолярном пространстве и напряжение кислорода в артериальной крови изменяются больше, чем при отсутствии компенсации со стороны МОК. Снижение одновременно МОК и МОД в фазе овуляции приводит к еще большему снижению  $pO_2$  в артериальной крови. При этом, также, еще больше проявляется венозная гипоксемия.

**Эксперимент 5.** *Во все фазы цикла при гипоксической гипоксии величины МОД и МОК выбираются попеременно или одновременно соответствующими второй фазе цикла, когда значения этого показателя наименьшие.*

Табл. 2. Расчетные значения  $pO_2$  при имитации вдыхания смеси с 11 % кислорода в третью фазу МЦ при различном выборе МОК и МОД (в мм рт.ст.)

МОК	МОД	Воздухоносн. пути	Альвеолярн. воздух	Артерия	Ткани				Вена
					Мозг	Серд.	Ск.м.	Друг.	
III фаза	II фаза	74,51	51,17	42,32	23,27	18,9	23,38	32,25	28,94
II фаза	II фаза	74,59	51,43	42,93	23,01	18,9	23,02	32,18	28,81
II фаза	III фаза	57,79	53,95	45,48	23,78	19,05	23,1	32,6	29,12
III фаза	III фаза	63,31	60,8	56,53	41,72	29,08	23,81		

Наблюдается та же зависимость, что и при нормоксии: разность изменений  $pO_2$  и  $pCO_2$  больший при отсутствии компенсации со стороны МОК чем со стороны МОД. При одновременном отсутствии этих компенсаторных компонентов венозная гипоксемия становится еще более выраженной, чем при отсутствии одного из этих компенсаторных компонентов, особенно МОД.

Эти результаты свидетельствуют о том, что при возмущении внешней среды в виде гипоксической смеси с 11 % кислорода без увеличения легочной вентиляции и системного кровотока напряжения кислорода в тканях могут оказаться ниже критического уровня (Табл. 2).

Серии экспериментов 4 и 5 показали, что в условиях нормоксии ткани мозга больше реагируют на изменение кровотока, а в условиях гипоксической гипоксии и на отсутствие компенсации и со стороны МОД и со стороны МОК, особенно при совместном отсутствии компенсаторных реакций.

Ткани сердца при нормоксии больше реагируют на отсутствие компенсаторной реакции со стороны системы внешнего дыхания. При гипоксической гипоксии в третьей фазе  $pO_2$  в сердечной мышце снижается по сравнению с нормоксией на 4, 42 мм рт.ст. при неизменяющемся МОД.

В четвертую и пятую фазы цикла за счет повышения тонуса симпатического отдела ЦНС [11] в условиях и нормоксии и гипоксии МОК увеличивается. Поэтому, следующая серия экспериментов состояла в имитации дефицита со стороны системного кровотока в четвертую и пятую фазы цикла при нормоксии и гипоксической гипоксии.

**Эксперимент 6.** При величине МОД, соответствующей исследуемой фазе цикла, берем МОК по величине равный второй фазе цикла. Полученные результаты показывают, что отсутствие компенсации со стороны системного кровотока в условиях нормоксии привело бы к выраженной венозной гипоксемии при некотором увеличении напряжения парциального давления кислорода в артериальной крови и альвеолярном пространстве. Так, если бы МОК в четвертой фазе был бы равным МОК второй фазы, т.е. снизился бы на 489 мл/мин, то в смешанной венозной крови  $pO_2$  снизилось

бы на 3, 25 мм рт.ст., а в артериальной крови возросло на 2,22 мм рт.ст. При имитации вдыхания газовой смеси с 11 % кислорода в артериальной крови, в которой  $pO_2$  достоверно ниже критического уровня, снижение системного кровотока (до уровня второй фазы цикла) повысило бы  $pO_2$  на 0,34 мм рт.ст. в смешанной венозной крови. В пятую фазу при замене значения МОК на таковое из второй фазы (МОК снизился на 537 мл/мин в условиях нормоксии и на 633 мл/мин при гипоксической гипоксии) привела бы к менее выраженной венозной гипоксемии, причем как в условиях нормоксии, так и в условиях гипоксической гипоксии.

Уменьшение компенсаторного эффекта системного кровотока свидетельствуют о большем проявлении венозной гипоксемии и в пятую и, особенно, в четвертую фазы цикла, таким образом подчеркивая значение системного кровотока в эти фазы цикла.

При нормоксии снижение системного кровотока привело бы к снижению  $pO_2$  в мозге на 5,04 мм рт.ст., в тканях сердца на 2,91 мм рт.ст.

В исследуемых тканях при гипоксической гипоксии (вдыхание воздуха с 11 % кислорода)  $pO_2$  в тканях мозга составило бы всего 23,27 мм рт.ст. (снижение на 16,86 мм рт.ст. по отношению к нормоксии и на 0,82 мм рт.ст. по отношению к гипоксической гипоксии) что значительно ниже критического уровня. В тканях сердца напряжение кислорода снизилось бы на 9,98 мм рт.ст. по отношению к условиям нормоксии и на 0,33 мм по отношению к гипоксической гипоксии (18,9 мм рт.ст.).

В пятую фазу при имитации условий нормоксии расчеты показали, что  $pO_2$  в мозге снизилось бы на 4,73 мм рт.ст., в тканях сердца на 3,07 мм рт.ст., при имитации вдыхания газовой смеси с 11 % кислорода  $pO_2$  в тканях мозга снизилось на 13, 91 мм рт.ст., а в сердечной мышце на 7,56 мм рт.ст., снижение величины системного кровотока снизилось бы  $pO_2$  в тканях мозга на 0,95 мм рт.ст., в сердце на 1,12 мм рт.ст., т.е реакция была бы более выраженной чем в четвертую фазы.

Приведенные результаты имитационного моделирования наглядно демонстрируют имеющиеся различия в кислородных режимах тканей организма в разные фазы менструального цикла и достоверные различия в реакциях тканей мозга, сердца, скелетных мышц на гипоксическую гипоксию при изменении гормонального статуса организма спортсменки.

Результаты теоретического исследования на математической модели массопереноса респираторных газов в организме свидетельствуют о необходимости при планировании тренировочного процесса спортсменок с одной стороны учитывать фазы МЦ, а с другой стороны разрабатывать новые методы, позволяющие улучшать функциональное состояние организма спортсменок и способствовать росту спортивных результатов.

При планировании объема, интенсивности, направленности тренировочных нагрузок с учетом гормонального статуса организма спортсменки необходимо учитывать, что вторая и четвертая фазы цикла характеризуются экономичностью и эффективностью системы дыхания и кровообращения, кислородных режимов организма: проявление скоростно-силовых возмож-

ностей, проприоцептивная чувствительность, координация движений в эти фазы выше. Поэтому в эти фазы будет более эффективно развитие скоростно-силовых качеств, специальной выносливости, технического мастерства.

В третью фазу, в связи с биологическими особенностями женского организма, любой вид деятельности, не имеющий прямого отношения к процессу овуляции, становится второстепенным, поэтому нарушается точность и координация движений, повышается лабильность нервных процессов, что приводит к снижению работоспособности, т.к. повышается функциональная стоимость работы, ее силовых и скоростных возможностей.

## ВЫВОДЫ

При имитации вдыхания газовой смеси с 11 % кислорода были получены значения локальных кровотоков и напряжения кислорода в рассматриваемых тканях, что позволяет судить о специфике функциональной саморегуляции и, следовательно, адаптационных возможностях к гипоксии организма женщин при циклических изменениях гормонального статуса в разные фазы менструального цикла. Результаты предварительных исследований показывают, что в условиях гипоксии в результате вдыхания газовой смеси с 11% кислорода без компенсаторного увеличения легочной вентиляции и системного кровообращения напряжение кислорода в тканях организма может оказаться ниже критического уровня и с разной степенью выраженности в разные фазы МЦ, что и подтверждается представленными результатами расчета на математической модели напряжения кислорода в исследуемых тканях. Расчетные значения системного кровотока показали хорошее совпадение с данными, полученными экспериментальным путем.

Приведенные выше рассуждения говорят о необходимости дальнейшего изучения индивидуальных реакций организма спортсменок в условиях гипоксической гипоксии для научной обоснованности спортивной подготовки женщин с учетом биологических особенностей их организма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Олимпийский спорт. под общ. ред. В.Н. Платонова. Киев: Олимпийская литература, 2009. Т.2. С.641–671.
2. Шахлина Л.Я.-Г., Чистякова М.А. Психофизиологические состояния спортсменок высокой квалификации, специализирующихся в дзюдо в различные фазы менструального цикла. *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2013. № 8 (116). С. 11–16.
3. Шахлина Л.Я.-Г., Вовчаныця Ю.Л., Калитка С.В. Морфологический и биохимический состав красной крови спортсменок высокой квалификации, специализирующихся в видах спорта преимущественным развитием качества выносливости. *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2013. № 9 (117). С. 22–25.
4. Шахлина Л.Я.-Г. Реакция организма спортсменок на снижение содержания кислорода во вдыхаемом воздухе в разные фазы менструального цикла. *Спортивная медицина*. 2008. № 1. С. 78–82.
5. Иорданская Ф.А. Мужчина и женщина в спорте высших достижений. Проблемы полового диморфизма. Москва: Сов.спорт, 2012. 256 с.
6. Шахлина Л.Я.-Г. Особенности функциональной адаптации организма спортсменок высокой квалификации к большим физическим нагрузкам. *Спортивная медицина*. 2012. № 1. С. 20–30.

7. Шахлина Л. Я.-Г., Евпак Н.А. Взаимосвязь психофизиологического состояния и специальной работоспособности спортсменов, специализирующихся в водном поло. *Спортивная медицина*. 2015. № 1–2. С. 59–63.
8. Колчинская А.З., Цыганова Т.Н., Остапенко Л.А. Нормобарическая интервальная гипоксическая тренировка в медицине и спорте. Москва: Медицина, 2003. 408 с.
9. Шахлина Л.Я.-Г. Медико-биологические основы спортивной тренировки женщин. Киев: Наук. думка, 2001. 325 с.
10. Онопчук Ю.Н., Белошицкий П.В., Аралова Н.И. К вопросу о надежности функциональных систем организма. *Кибернетика и вычислительная техника*. 1999. Вып. 122. С. 72–82.
11. Спортивная медицина: Учебник для студентов высших учебных заведений физического воспитания под ред. Л. Я.-Г. Шахлиной. Киев: Наукова думка, 2016. 452 с.
12. Онопчук Ю.Н., Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б. и др. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия. *Биоэкология. Единое информационное пространство*. Киев. 2001. С. 59–81.
13. Онопчук Ю.Н., Гриценко В.И., Вовк М.И., Котова А.Б. и др. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия. *Биоэкология. Единое информационное пространство*. Киев. 2001. С. 82–104.
14. Аралова Н.И., Шахлина Л. Я.-Г. Математические модели функциональной самоорганизации системы дыхания человека при изменении гормонального статуса организма. *Международный науч.-техн. журн. «Проблемы управления и информатики»*. 2018. № 3. С. 132–141.
15. Вторичная тканевая гипоксия. под общ. Ред. А.З. Колчинской. Киев: Наук. думка. 1983. 253 с.
16. 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.
17. Онопчук Ю.Н. Об одной имитационной модели для исследования сложных физиологических процессов. *Кибернетика*. 1979. № 3. С. 66–72.
18. Онопчук Ю.Н. Об одной общей схеме регуляции режимов внешнего дыхания, минутного объема крови и тканевого кровотока по кислородному запросу. *Кибернетика*. 1980. № 3. С. 110–115
19. Онопчук Ю.Н., Полинкевич К.Б., Бобрякова И.Л. Концептуальные модели управления системой дыхания и их анализ при математическом моделировании. *Кибернетика и системный анализ*. 1993. № 6. С. 76–88.
20. Аралова Н.И. Исследование на математической модели роли гипоксии, гиперкапнии и гипометаболизма в саморегуляции системы дыхания при внутренних и внешних возмущениях. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. Вып. 188. С. 49–64.
21. Аралова А.А., Аралова Н.И., Ковальчук-Химюк Л.А., Онопчук Ю.Н. Автоматизированная информационная система функциональной диагностики спортсменов. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 3. С. 73–78.
22. Аралова Н.И. Математическая модель механизмов краткосрочной и среднесрочной адаптации функциональной системы дыхания лиц, работающих в экстремальных условиях. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015. Вып. 182. С. 16–21.
23. Аралова Н.И. Информационные технологии поддержки принятия решений при реабилитации спортсменов, занимающихся спортивными единоборствами. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. № 3. С. 160–170.
24. Колчинская А.З. Кислородные режимы организма ребенка и подростка Киев: Наук. думка, 1973. 320 с.

Отримано 07.05.2018



REFERENCES

1. Olympic sport, by V.N. Platonova (ed.). Kyiv: Olympic literature, 2009. V. 2. P. 641–671. (in Russian).
2. Shakhlina L.- Ya. G., Chistyakova MA Psychophysiological conditions of athletes of high qualification, who specialize in judo in various phases of the menstrual cycle. *Physiotherapy exercises and sports medicine*. 2013. No. 8 (116). P. 11–16. (in Russian).
3. Shakhlina L.Ya.-G., Vovchanytsya Yu.L., Kalitka S.V. Morphological and biochemical composition of red blood of athletes of high qualification, specializing in sports, the predominant development of the quality of endurance. *Therapeutic physical training and sports medicine*. 2013. No. 9 (117). P. 22–25. (in Russian).
4. Shakhlina L.Ya.-G. The reaction of the athlete's body to reduce the oxygen content in the inspired air in different phases of the menstrual cycle. *Sports medicine*. 2008. No. 1. P. 78–82. (in Russian).
5. Iordanskaya F.A. Man and woman in the sport of higher achievements. Problems of sexual dimorphism. Moscow: Sov.sport, 2012. 256 p. (in Russian).
6. Shakhlina L.Ya.-G. Features of functional adaptation of the organism of high-qualified athletes to large physical loads. *Sports Medicine*. 2012. No. 1. C. 20–30. (in Russian).
7. Shakhlina L.Ya.-G., Evpak N.A. Interrelation of the psychophysiological state and special working capacity of athletes specializing in water polo. *Sports medicine*. 2015. № 1–2. P.59–63. (in Russian).
8. Kolchinskaya AZ, Tsyganova TN, Ostapenko LA Normobaric interval hypoxic training in medicine and sports. Moscow: Medicine, 2003. 408 p. (in Russian).
9. Shakhlina L.Ya.-G. Medical and biological principles of sports training of women. Kyiv: Nauk. dumka, 2001. 325 p. (in Russian).
10. Onopchuk Yu.N., Beloshitsky P.V., Aralova N.I. To the question of the reliability of the functional systems of the organism. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 1999. Issue. 122. P. 72–82. (in Russian).
11. Sport medicine: Textbook for students of higher educational institutions of physical education / editor L.Ya.-G. Shakhlina. Kiev: Naukova dumka, 2016. 452 p. (in Russian).
12. Onopchuk Yu.N., Gritsenko V.I., Vovk M.I., Kotova A.B. & other. Homeostasis of the functional respiratory system as a result of intrasystemic and systemic-environmental information interaction. *Bioecomedicine. Single information space*. Kiev. 2001. P. 59–81. (in Russian).
13. Onopchuk Yu.N., Gritsenko V.I., Vovk M.I., Kotova A.B. & other. Homeostasis of the functional circulatory system as a result of intrasystemic and systemic-environmental information interaction. *Bioecomedicine. Single information space*. Kiev. 2001. P. 82–104. (in Russian).
14. Aralova N.I., Shakhlina L. Ya.-H. The mathematical models of functional self-organization of the human respiratory system with a change of the hormonal states of organism. *Journal of Automation and Information Sciences*. No. 3, pp. 132–141. (in Russian).
15. Secondary tissues hypoxia ed. A.Z. Kolchinskaya. Kyiv: Nauk.dumka, 1983. 253 p. (in Russian).
16. K.B. Polinkevich, Y.N. Onopchuk. Conflicts in the regulation of the primary functions of the respiratory system of the body and the mathematical model for their solution. *Cybernetic*. 1986, No. 3, pp. 100–104 (in Russian).
17. Onopchuk Yu.N. On one imitation model for the study of complex physiological processes. *Cybernetics*. 1979. No. 3. P. 66–72. (in Russian).
18. Onopchuk Yu.N. About a general scheme of regulation of external respiration regimes, minute volume of blood and tissue blood flow by oxygen demand. *Cybernetics*. 1980. № 3. P. 110–115. (in Russian).
19. Onopchuk Yu.N., Polinkevich K.B., Bobryakova I.L. The conceptual models of control of the respiratory system and their analysis in mathematical modeling. *Cybernetics and system analysis*. 1993. No. 6. P. 76–88. (in Russian).
20. Aralova N. I. Research of role of hypoxia, hypercaphnia and hypometabolism in the regulation of the respiratory system in their internal and external disturbances based on the

- mathematical model. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2017. No 188, pp. 49–64. (in Russian).
21. Aralova A.A., Aralova N. I., Kovalchuk – Khimiuk L. A., Onopchuk, Yu. N. Computer – aided information system of functional diagnostics of sportsmen. *Control Systems and Computers*. 2008. No 3, pp. 73–78. (in Russian).
  22. Aralova N.I. Mathematical model of the mechanism short- and medium-functional adaptation of breath of persons work in extreme conditions high. *Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*. 2015. Vol. 182. P. 16–21. (in Russian).
  23. Aralova N.I. Information technologies of decision making support for rehabilitation of sportsmen engaged in combat sport. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. No. 3. P. 160–170. (in Russian).
  24. Kolchinskaya A.Z. Oxygen regimes of an organism of a child and adolescent Kyiv: Nauk. dumka, 1973. 320 p.

Received 07.05.2018

Л.Я.-Г. Шахліна<sup>1</sup>, д-р. мед. наук, проф.  
професор кафедри спортивної медицини  
e-mail: sportmedkafedra@gmail.com

Н.І. Аралова<sup>2</sup>, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.  
старш. наук. співроб. відд. оптимізації керованих процесів  
aralova@ukr.net

<sup>1</sup> Національний університет фізичного виховання і спорту України  
вул.Фізкультури 1, Київ, 03150, Україна

<sup>2</sup> Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187 Україна

#### ПРОГНОЗУВАННЯ РЕАКЦІЇ ОРГАНІЗМУ СПОРТСМЕНОК НА ВДИХАННЯ ГІПОКСИЧНОЇ СУМІШІ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДИХАННЯ

За допомоги математичної моделі функціональної системи дихання проімітовано вплив вдихання спортсменками газової суміші з низьким вмістом кисню та досліджено залежність функціональної самоорганізації організму спортсменок від гормонального статусу протягом менструального циклу. Отримані результати свідчать про те, що під час планування тренувального процесу та формування команд в змагальній діяльності необхідно враховувати особливості адаптації до гіпобаричного середовища за умови циклічних змін концентрації статевих гормонів у організмі спортсменок.

**Ключові слова:** математична модель функціональної системи дихання, тренувальний процес, адаптація організму спортсменки, інтервальне гіпоксичне тренування, функціональна самоорганізація організму.

L.Ya.-G. Shakhlina<sup>1</sup>, DSc (Medicine), Professor,  
Professor of Sport Medicine Dep.  
e-mail: sportmedkafedra@gmail.com

N.I. Aralova<sup>2</sup>, PhD (Engineering), Senior Researcher,  
Senior Researcher of Dep. of Optimization  
of Controlled Processes  
e-mail: aralova@ukr.net

<sup>1</sup>National University of Physical Education and Sport of Ukraine  
Fiscultury Street, 1, Kiev, 03150, Ukraine

<sup>2</sup>Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine,  
Acad. Glushkov av., 40, Kiev, 03187, Ukraine

## FORECASTING THE ORGANISM REACTION OF THE ATHLETES ON INHIBITING HYPOXIC MIXTURES ON THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONAL RESPIRATION SYSTEM

**Introduction.** In the modern sports of higher achievements, the issues of training and competitive activity of athletes using the hypoxic factor in natural-mountain conditions or with artificial hypoxic training with the use of pressure chambers or hypoxicators continue to attract great interest among specialists in the field of physiology, medicine, sports pedagogy. The influence of reproductive hormones on the functional breathing system responsible for the aerobic capacity of the female body remains insufficiently studied. There are no scientifically substantiated programs for training athletes, mainly developing the quality of endurance, in conditions of hypoxic hypoxia, taking into account the phases of the menstrual cycle.

**The purpose of the article is to** determine the reaction of the functional breathing system and to reveal the degree of tissue hypoxia in athletes when inhaled hypoxic gas mixture with 11% oxygen in different phases of the menstrual cycle.

**Results.** On the mathematical model of the functional breathing system, based on physiological examination data, an imitation of a hypoxic mixture with athletes was performed with athletes of 11% oxygen in different phases of the menstrual cycle. The partial pressures and voltages of oxygen in alveolar air, arterial and mixed venous blood, heart, brain and skeletal muscle tissues were calculated. Numerical experiments were also performed with the replacement of the real values of the minute volume of respiration and the minute volume of blood in the corresponding phases of MC for adaptation processes in other phases of the cycle.

**Conclusions.** The results of the prediction on the mathematical model of the respiratory system of the athlete's reactions to the inhalation of hypoxic mixtures testify to the specificity of functional self-regulation and, consequently, the adaptive capabilities to the hypoxia of the female body during cyclic changes in the hormonal status in different phases of the menstrual cycle. The results of preliminary studies show that under hypoxic conditions, as a result of inhalation of a gas mixture with 11% oxygen without a compensation increase in pulmonary ventilation and systemic circulation, the oxygen tension in the body tissues may be below the critical level and with different degrees of expression in different phases of the MC, which is confirmed by the presented results of calculation on a mathematical model of oxygen tension in the studied tissues.

The obtained results testify to the need for further study of the individual reactions of the organism of athletes in conditions of hypoxia for the scientific substantiation of sports training for women taking into account the biological characteristics of their organism.

**Keywords:** *mathematical model of the functional breathing system, training process of athletes, interval hypoxic training, phases of the menstrual cycle, functional self-organization of the organism.*