

УДК 004.942:001.57+519.7+612.5

И.И. Ермакова, А.Ю. Николаенко, Ю.Н. Солопчук

Модель терморегуляции человека для оценки холодового стресса

Разработана динамическая модель для прогноза функционального состояния человека в воде и на воздухе. Результаты моделирования позволили сделать вывод об «агрессивности» прохладной воды для человека в сравнении с воздухом той же температуры. Модель реализована в виде компьютерной программы и может быть использована для оценки времени безопасного пребывания человека в холодных условиях среды.

The dynamic model to predict changes in human functional state during water and air impact was developed. Comparison of modelling results showed that the cooling effect of water is much more than the effect of air of the same temperature. The model was implemented as a computer simulator and can be used to estimate safe stay time in water to avoid health hazard caused by water cooling.

Розроблено динамічну модель для прогнозу функціонального стану людини в воді і на повітрі. Результати моделювання дозволили зробити висновок про «агресивність» прохолодної води для людини у порівнянні з повітрям тієї ж температури. Модель реалізовано у вигляді комп'ютерної програми і може бути використана для оцінки часу безпечного перебування людини в холодних умовах середовища.

Введение. Организм человека способен поддерживать гомеостаз при воздействии на него многих факторов окружающей среды. Однако возможности механизмов регуляции не безграничны. Один из факторов, провоцирующих нарушение жизнедеятельности человека, – низкая температура среды. На холоде вырабатываемой энергии может оказаться недостаточно, чтобы возместить потери тепла. В результате продолжительного холодового стресса происходит переохлаждение организма.

Быстрее всего гипотермия возникает при погружении незащищенного тела человека в холодную воду. Это связано с тем, что теплопроводность воды почти в 25 раз больше воздуха. Скорость охлаждения также зависит от физического состояния человека и его индивидуальных характеристик, в том числе толщины подкожного жирового слоя. Причем гипотермия может развиваться даже в прохладной воде, последствия будут зависеть от длительности воздействия.

Прогноз динамических изменений функционального состояния человека в холодной ок-

ружающей среде относится к актуальным задачам современности. Для решения этих задач использован наиболее эффективный и безопасный метод – математическое моделирование. Такой подход дает возможность оценить степень охлаждения, не подвергая при этом риску здоровье испытуемых.

Существует множество математических моделей для прогноза физиологических реакций человека. Видимо, основной моделью человека в холодной воде следует считать модель *Montgomery* [1]. Большинство современных исследователей – его последователи [2–4]. Математические модели человека нашли широкое применение для нужд армии, служб спасения, разработчиков искусственного микроклимата, создателей одежды и защитного снаряжения.

Но в большинстве случаев существующие модели ориентированы на узкий спектр выполняемых задач и, как следствие, недостаточно гибки и детализированы для учета действия нескольких факторов одновременно.

Цель данной статьи – создать динамическую модель терморегуляции человека для оценки холодового стресса на воздухе и в воде.

Ключевые слова: терморегуляция, моделирование, охлаждение, пребывание в воде.

Модель

Модель построена на базе комплекса математических мультикомпарментальных моделей терморегуляции и теплообмена человека, включенных в информационную платформу [5, 6].

Аппроксимация тела человека

Геометрическая форма тела человека аппроксимирована набором многослойных цилиндров и сферы. Каждый компартмент (слой цилиндра или сферы) соответствует определенному органу или ткани. В данном исследовании рассматривается аппроксимация тела человека 39 компартаментами без одежды (рис. 1). Голова представлена двухслойной сферой, внешний слой которой соответствует коже, а внутренний – мозгу. Тело человека условно разделено на 13 цилиндров: туловище, плечи, предплечья, кисти, бедра, голени, стопы. Туловище представлено следующими компартаментами – внутренние органы, мышцы, жир и кожа; руки и ноги – мышцы, жир, кожа; кисти и стопы – мышцы и кожа. Кровь выделена отдельным компарментом, участвующим в теплообмене со всеми остальными компартаментами.

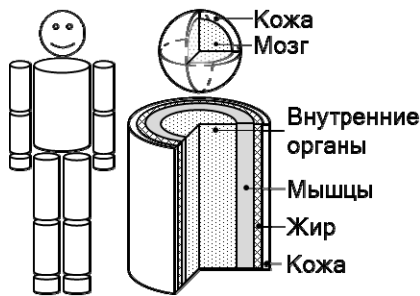


Рис. 1. Аппроксимация тела человека

Математическое описание

Терморегуляция человека может быть представлена взаимодействием двух систем – активная и пассивная (рис. 2). К пассивной системе относятся физиологические процессы, связанные с теплообразованием, теплопереносом и теплообменом со средой. Активная система описывает реакции физиологической терморегуляции, направленной на поддержание температурного гомеостаза, а также афферентные и эфферентные звенья. Ключевая структура активной системы – центр терморегуляции,

осуществляющий управление системой по обратным связям – температуры мозга и средней температуры кожи.

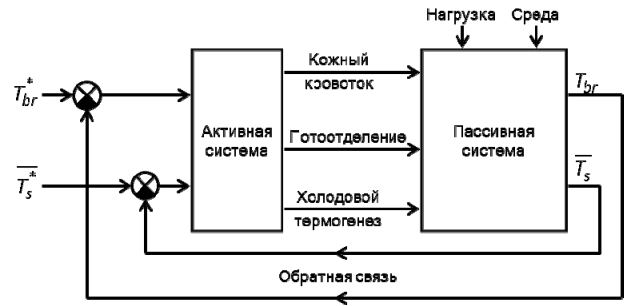


Рис. 2. Блок-схема терморегуляции человека. T_{br} – температура мозга, \bar{T}_s – средняя температура кожи, * – начальное значение (set-point)

Математическое описание класса моделей представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений.

Между человеком и средой постоянно происходит теплообмен, определяемый как состоянием человека, так и физическими характеристиками среды. Система терморегуляции человека стремится к сохранению теплового баланса – количество производимого тепла должно быть равным количеству тепла, отдаваемого организмом в среду. Если этот баланс не поддерживается, то избыток тепла приведет к повышению температуры ядра тела, а недостаток – к его охлаждению. В обоих случаях возникают неблагоприятные условия для функционирования организма.

Уравнение динамики теплового баланса для ij -компартамента имеет вид [7]:

$$c_{ij} m_{ij} \frac{dT_{ij}}{dt} = M_{ij} - Q_{ij} - a_{ij-1} \lambda_{ij-1} (T_{ij} - T_{ij-1}) - a_{ij} \lambda_{ij} (T_{ij} - T_{ij+1}) - \rho_b c_b w_{ij} (T_{ij} - T_b), \quad (1)$$

$$i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, K},$$

где T – температура, t – время, c – удельная теплоемкость, m – масса, M – метаболизм, Q – теплоотдача в среду, a – толщина компартамента, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, w – кровоток; индексы: i – номер цилиндра, j – номер слоя, b – кровь, N – количество цилиндров, K – количество слоев в цилиндре.

Теплообмен человека на воздухе обеспечивается путем испарения, излучения и конвекции. Количество тепла, отдаваемого в среду, зависит от температуры, влажности и скорости движения воздуха:

$$Q_{ij}^{air} = h_{ij}^C A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) - h_{ij}^R A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) - h_{ij}^E A_{ij} (P_{ij} - P_i^{air}), \quad (2)$$

где h – коэффициент теплообмена, A – площадь поверхности тела, P – давление насыщенных и ненасыщенных паров; индексы: C – конвекция, R – излучение, E – испарение, air – воздух.

Теплообмен человека в воде происходит только путем конвекции. В модели этот процесс описан так [8]:

$$Q_{ij}^{water} = h_{ij}^{water} A_{ij} (T_{ij} - T_i^{water}), \quad (3)$$

где $water$ – вода.

Коэффициент теплообмена конвекцией в воде зависит от теплопроводности воды, коэффициента Нуссельта и диаметра компартмента.

Коэффициент теплообмена конвекцией в воде определяется по формуле:

$$h_{ij}^{water} = K_{water} \cdot Nu / d_{ij}, \quad (4)$$

где K_{water} – теплопроводность воды, Nu – число Нуссельта, d – диаметр компартмента.

Согласно расчетам коэффициент теплообмена конвекцией в воде в условиях покоя равен $230 \text{ ккал} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, а при физической нагрузке увеличивается и находится в пределах от 427 до $580 \text{ ккал} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ [2, 3, 9].

Терморегуляция

Для обнаженного человека в состоянии полного покоя нейтральными считаются температуры для воздуха $28\text{-}30\text{°C}$, а для воды $33\text{-}35\text{°C}$. Пребывание человека при более низких температурах ведёт к неизбежному охлаждению организма.

Сосудистая реакция кожи. Первоочередной реакцией организма на изменение температуры окружающей среды, будь это вода или воздух, есть сосудистая реакция кожи. На холоде происходит сужение кровеносных сосудов в коже, т.е. кожный кровоток уменьшается. Объ-

емная скорость крови в коже зависит от температур мозга и кожи:

$$W_s = W_s^* - S_{br} (T_{br}^* - T_{br}) - S_s (T_s^* - T_s), \quad (5)$$

где W – кровоток, S – чувствительность центра терморегуляции; индексы: * – начальное значение, br – мозг, s – кожа.

Локальное распределение кожного кровотока в модели выполняется пропорционально площади участка тела:

$$W_{s_{ij}} = \frac{A_{ij}}{A} W_s. \quad (6)$$

Холодовой термогенез. Следующей по времени наступает основная терморегуляторная реакция человека в ответ на холод – терморегуляторный тонус и холодовая дрожь в скелетных мышцах. Образующаяся в результате быстрого непроизвольного сокращения мышечных волокон дополнительная энергия полностью переходит в тепло и согревает организм.

Математическое описание мышечного термогенеза при холодových воздействиях относится к нерешенным задачам. Каждый исследователь обосновывает выбор той или иной формулы, исходя из собственного опыта и результатов коллег. Анализ литературы позволил заключить, что регуляторная теплопродукция определяется температурой мозга и полем температур кожи. Неясной остается взаимосвязь этих двух показателей и коэффициентов, отражающих влияние каждого сигнала на величину термогенеза.

Существует несколько видов математического описания холодовой дрожи скелетных мышц человека. *Montgomery* предложил следующую формулу для описания термогенеза на воздухе [1]:

$$\begin{aligned} CHILL = & -CCHIL * ERROR(1) + \\ & +SCHIL * (COLDS - WARMS) + \\ & +PCHIL * COLD(1) * COLDS, \end{aligned} \quad (7)$$

где $CHILL$ – дрожь в ответ на холодовой стресс, $CCHIL$, $SCHIL$ и $PCHIL$ – коэффициенты регулирования, $ERROR(1)$ – разница между текущей и заданной температурой мозга, $COLD(1)$ – выходной сигнал терморепрепторов

мозга, равный разнице между текущей и заданной температурой мозга, *COLDS* и *WARMS* – выходные сигналы кожных терморецепторов (холодовых и тепловых соответственно).

Согласно *Gagge*, описание холодового термогенеза на воздухе имеет следующий вид [10]:

$$M_{shiv} = 19,4(36,8 - T_c)(33,7 - T_s), \quad (8)$$

где M_{shiv} – теплопродукция, образуемая при холодовой дрожи в Вт/м², T_c и T_s – температуры ядра и кожи соответственно.

Для описания термогенеза в воде предлагаются другие зависимости. Наиболее распространенной следует считать формулу *Tikuisis*, который впервые ввел в уравнение холодовой дрожи зависимость от процентного содержания жира в организме человека [9]:

$$M_{shiv} = \frac{155,5 \cdot (37 - T_c) + 47 \cdot (33 - \bar{T}_s) - 1,57 \cdot (33 - \bar{T}_s)^2}{\sqrt{\%BF}} \quad (9)$$

где $\%BF$ – количество жира в процентах.

В предлагаемой модели общее количество тепла, вырабатываемое мышцами при холодовом термогенезе, определяется по формуле:

$$M_{sh} = A \left(\begin{array}{l} (T_s^* - T_s)(T_{br}^* - T_{br}) + 3(T_s^* - T_s) + \\ + 3(T_{br}^* - T_{br}) + 65 \left(\frac{T_s^* - T_s}{\%BF} \right)^{1,5} \end{array} \right), \quad (10)$$

$$T_s^* - T_s \geq H_s, \quad T_{br}^* - T_{br} \geq H_{br},$$

где M_{sh} – холодовой термогенез в ккал/ч, H – пороговое значение.

В холодовой дрожи участвуют все скелетные мышцы тела человека. Но, к сожалению, до сих пор не установлен характер распределения дополнительного тепла. В предлагаемой модели 86 процентов образующегося тепла продуцируется мышцами туловища и распределяется равномерно. Оставшееся тепло вырабатывается мышцами рук и ног и также распределяется равномерно.

Компьютерная реализация

Комплекс математических мультикомпарментальных моделей терморегуляции и теплообмена человека реализован в виде информационной технологии. Интерфейс программы разделен на несколько вкладок для ввода дан-

ных, каждая из которых позволяет моделировать соответствующую ей ситуацию. Модель предполагает возможность выбора среды в соответствии с поставленными задачами: воздух, вода или их комбинация. При моделировании пребывания человека на воздухе задаются температура, влажность и скорость движения воздуха, а также скорость движения человека (рис. 3).

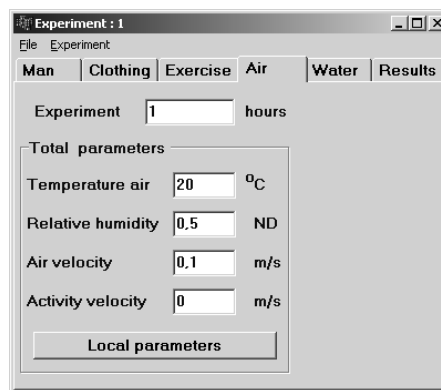


Рис. 3. Фрагмент интерфейса программы: ввод параметров воздуха

Для моделирования погружения задаются температура воды, выполняемая в воде нагрузка и время погружения (рис. 4). Модель допускает полное и частичное погружение человека в воду.

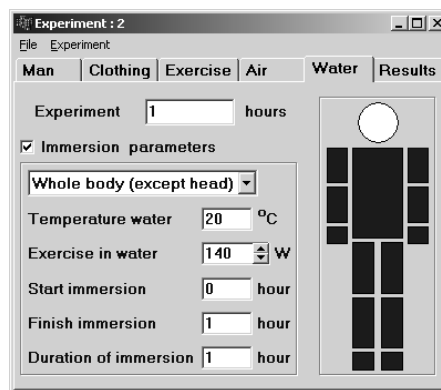


Рис. 4. Фрагмент интерфейса программы: ввод параметров погружения

Информационная технология аналогична реальному мониторингу физиологического состояния человека при взаимодействии со средой, позволяет прогнозировать динамику локальных температур тела, тепловых потоков, кровотоков, потоотделения, метаболических процессов, сердечного выброса, частоты сердечных сокраще-

ний и др. По окончании вычислительного эксперимента модель делает заключение о резервных возможностях организма и предупреждает об опасности их исчерпания.

Результаты

Для сравнительной оценки охлаждающего влияния воздуха и воды выбрана одна и та же температура. Характеристики воздуха: температура 20°C , относительная влажность 50 процентов, скорость движения воздуха $0,1$ м/с. Характеристики воды: температура 20°C , статус человека – погружение до головы. Характеристики человека: мужчина, 25 лет, вес 70 кг, рост 170 см, относительное количество жира составляет 15 процентов от веса тела, площадь поверхности тела $1,8$ м². Интенсивность нагрузки 140 Вт, продолжительность пребывания в среде 1 час.

Результаты моделирования показали, что вода оказывает более сильное охлаждающее действие, чем воздух при одинаковой температуре и времени пребывания в среде. При погружении человека в воду температура мозга за час падает на 1°C от начального значения (рис. 5), а на воздухе она снизилась на $0,1^{\circ}\text{C}$. Частота сердечных сокращений человека за время пребывания на воздухе почти не изменяется и составляет $76-78$ ударов/мин, а в воде уменьшается до 59 ударов в минуту к концу исследования.

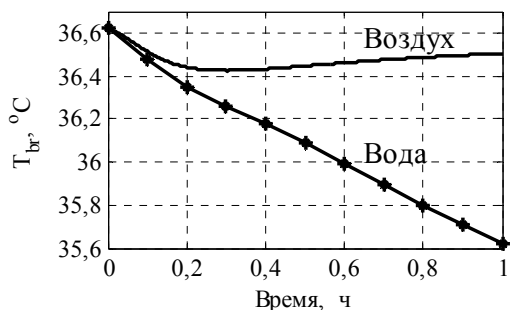


Рис. 5. Динамика температуры мозга

При температуре воздуха 20°C суммарная теплоотдача в среду к концу пребывания составила 66 ккал/час. Теплоотдача конвекцией при погружении в воду той же температуры достаточно высокая – 330 ккал/ч, что в пять раз больше, чем на воздухе. Это вызывает су-

щественные изменения в системе терморегуляции.

Попадая в холодную окружающую среду, организм человека стремится сохранить внутреннее тепло. Кожный кровоток снижается до минимального значения – 1 л/ч. В результате уменьшается перенос тепла кровью от ядра тела к его поверхности. Это препятствует падению температуры ядра тела, но приводит к снижению кожной температуры. При погружении температура кожи всего за несколько минут становится на $1-2^{\circ}\text{C}$ выше температуры воды. За час пребывания человека на воздухе средняя температура кожи экспоненциально падает с 34 до 31°C , что на 10°C выше, чем в воде такой же температуры (рис. 6).

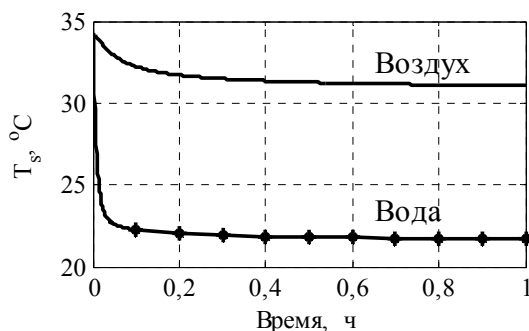


Рис. 6. Динамика средней температуры кожи

Для компенсации организмом потери тепла включается механизм холодовой дрожи. Анализ терморегуляторной реакции показал следующее (рис. 7). При погружении в воду производство тепла скелетными мышцами составляет 200 ккал/ч, тогда как на воздухе достаточно 43 ккал/ч для поддержания температуры ядра.

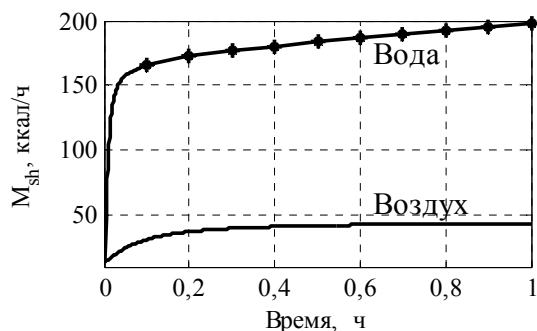


Рис. 7. Динамика холодового термогенеза

Теплопродукция мышц в воде в пять раз больше, чем на воздухе той же температуры, что

очень важно, так как демонстрирует холодовой стресс человека при погружении в воду.

За 12 минут температура мозга уменьшается на $0,2^{\circ}\text{C}$ от начального значения для обеих сред. Далее происходят существенные отличия. Организм, стремясь сохранить температуру ядра, увеличивает производство тепла в мышцах, а кровь разносит это тепло по всему организму. Если на воздухе вырабатываемого тепла достаточно для компенсации теплопотерь, то в воде температура мозга продолжает стремительно падать (рис. 5). К концу исследования ее значение достигает $35,6^{\circ}\text{C}$, несмотря на то что производство тепла в мышцах постоянно увеличивается (рис. 7). Аналогичная ситуация происходит с температурой внутренних органов. На воздухе организму удается поддерживать температуру внутренних органов на начальном уровне $36,8^{\circ}\text{C}$. При погружении в воду ее значение снижается до 36°C , что на $0,8^{\circ}\text{C}$ ниже, чем на воздухе такой же температуры.

Адекватность модели

Для доказательства адекватности математической модели результаты моделирования сравнивались с измерениями на испытуемых [2]. Авторы приводят усредненные результаты скорости метаболизма и ректальной температуры для 13 испытуемых. Характеристики человека: мужчина, 25 лет, вес 70 кг, рост 170 см, относительное количество жира составляет 15 процентов от веса тела, площадь поверхности тела $1,8\text{ м}^2$, уровень метаболизма 71 ккал/ч. Температура воды 20°C , статус человека – полностью погружен в воду без защитного снаряжения, продолжительность пребывания 1 час.

Измерение ректальной температуры проводилось с помощью термисторного зонда, вводимого в прямую кишку [2]. Из рис. 8 видно, что динамика изменения температуры ядра, предложенная нашей моделью, хорошо согласуется с измерениями [2].

На рис. 9 представлены результаты моделирования и измеренные значения скорости теплопродукции. Измерения были проведены с

помощью спирометрии методом «открытого контура» [2]. Если принять во внимание, что точность этого метода составляет около 15–20 процентов, то можно сделать вывод, что модельные и измеренные результаты сопоставимы.

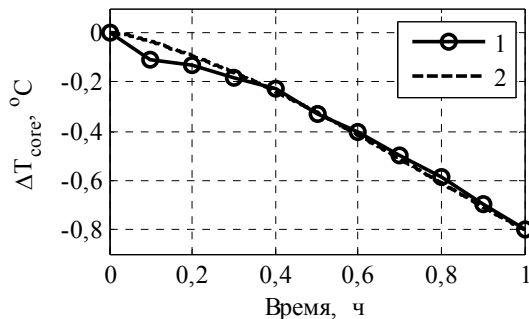


Рис. 8. Отклонение температуры ядра при погружении человека в воду. 1 – измеренные данные, 2 – результаты моделирования

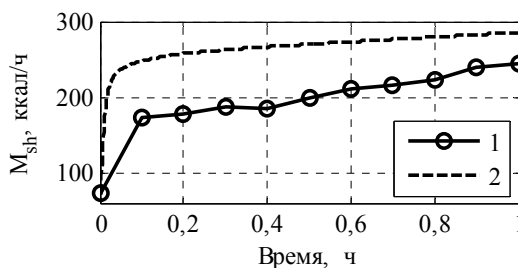


Рис. 9. Динамика метаболизма при погружении человека в воду. 1 – измеренные данные, 2 – результаты моделирования

Заключение. Разработанная динамическая математическая модель позволяет прогнозировать термофизиологическое состояние человека и оценить холодовой стресс в воде и на воздухе. Сравнение результатов вычислительных экспериментов показало, что в воде холодовой стресс намного сильнее, чем на воздухе при одинаковой температуре и времени пребывания в среде.

Уменьшение кожного кровотока и увеличение теплопродукции в скелетных мышцах компенсировало потерю тепла организмом на воздухе температурой 20°C . К концу эксперимента функциональное состояние человека находится в норме и ему не угрожает гипотермия.

Тогда как в воде той же температуры обнаженный человек теряет в пять раз больше тепла, чем на воздухе. Несмотря на высокую теп-

лопродукцию к часу пребывания в воде температура мозга снизилась на 1°C от начального значения. Человек находится в состоянии легкой гипотермии.

Таким образом, модель позволила не только качественно, но и количественно оценить агрессивность воды для человека. В то время как снижение кожного кровотока и увеличение теплопродукции на воздухе защищают организм от холода, в воде той же температуры этих механизмов явно недостаточно. Длительное охлаждение истощает организм, и дальнейшее пребывание в воде может нанести вред здоровью. Модель можно использовать для прогноза степени охлаждения человека и расчета времени безопасного пребывания в холодной воде и на воздухе.

1. *Montgomery L.D.* A model of heat transfer in immersed man. – *Annals of Biomedical Engineering*, 2, 1974. – P. 19–46.
2. *Tikuisis P., Gonzalez R.R., Pandolf K.B.* Thermoregulatory model for immersion in cold water // *J. of Applied Physiology*. – 1988. – **64**. – P. 719–727.
3. *Thermal responses for men with different fat compositions during immersion in cold water at two depths: prediction versus observation / X. Xu, J.W. Castellani, W.R. Santee et al. // Ibid.* ~– 2007. – **100**. – P. 79–88.

4. *Van Dorn W.G.* Thermodynamic model for cold water survival. – *J. Biomed. Eng.* – 2000. – **122**. – P. 541–544.
5. *Yermakova I.* Mathematical modeling of thermal processes in man for development of protective clothing // *J. of the Korean society of living environmental system*. – 2001. – **8**, N 2. – P. 127–133.
6. *Ермакова И.И.* Информационная платформа мультикомпарментальных моделей терморегуляции человека // *Кибернетика и вычислительная техника*. – 2013. – **174**. – С. 81–91.
7. *Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A.* Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment // *J. of Physical Science and Application*, David Publishing Company. – 2013. – **3** (4). – P. 238–243.
8. *Yermakova I., Solopchuk Y., Khudyakova L.* Heat production, heat transfer and heat exchange in man during water immersion: mathematical modeling // *IEEE XXXIII Int. Sci. Conf.*, April 2013. – P. 290–292.
9. *Shivering endurance and fatigue during cold water immersion in humans / P. Tikuisis, D.A. Eyolfson, X. Xu et al. // J. of Applied Physiology*. – 2002. – **87** (1). – P. 50–58.
10. *Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Nishi Y.* An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response // *ASHRAE Trans.* 1971. – **77**. – P. 247–262.

Поступила 04.09.2014

Тел. для справок: +38 044 253-6669, 273-6388, 050 289-1999,
066 743-6718, 093 142-7400 (Киев)

E-mail: irena_yermakova@gmail.com, n_nastja@ukr.net,
julia.solopchuk@gmail.com

© И.И. Ермакова, А.Ю. Николаенко, Ю.Н. Солопчук, 2014

Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.
В розничную продажу журнал не поступает.
Подписной индекс 71008**