

УДК 004.946:001.57+519.7

И.И. Ермакова, д-р биол. наук<sup>1</sup>, А.Ю. Николаенко<sup>1,2</sup>, А.Г. Григорьян, канд. биол. наук<sup>3</sup>,  
Л.А. Худякова<sup>2</sup>

## Динамическая модель для оценки риск факторов при работе человека в жарких условиях среды

Разработана модель для выявления и предотвращения риск факторов функционального состояния человека при работе в жарких условиях среды. Результаты исследований показали, что при работе человека в жарких условиях среды основным риск фактором следует считать потерю жидкости организмом вследствие интенсивного потоотделения.

The model for evaluation and prevention of risk factors during human work in hot environments has been developed. The simulation results shown, that the main considered risk factor is the water losses of human organism.

**Ключевые слова:** информационные технологии, компьютерное моделирование, тепловой стресс, физическая нагрузка, защитная одежда.

### Введение

В связи с изменением климата на планете жара становится первостепенным экстремальным фактором. В новой среде организм стремится перестроить свои функции, но человек не в состоянии полностью приспособиться к влиянию экстремальных условий, что ведет к нарушению жизнедеятельности организма и развитию заболеваний. Поэтому обеспечение безопасной жизнедеятельности человека в жарких условиях среды относится к актуальным задачам современности. Задача сама по себе чрезвычайно сложная и может быть решена с помощью комплекса различных подходов. Метод математического моделирования относится к эффективным подходам, так как позволяет прогнозировать состояние человека в различных условиях среды и количественно оценить влияние экстремальных факторов среды, а также мер защиты.

Разработано достаточно много математических моделей для прогнозирования термофизиологических реакций людей, работающих в экстремальных условиях. В моделях авторы используют неинвазивные исходные данные, такие как метаболическая нагрузка, частота сердечных сокращений, температура окружающей среды, индивидуальные антропологические характеристики (рост, вес и одежда) и др. Модели всегда ориентированы для решения определенных задач.

Модель [1] разработана для военнослужа-

щих, которые прошли акклиматизацию, имеют нормальное или низкое содержание жира в теле и подвергаются длительному воздействию теплового стресса. Недостаток данной модели в узком спектре выполняемых задач.

Цель данной работы – разработать модель для оценки и предотвращения риск факторов функционального состояния человека при работе в жарких условиях среды.

### 1. Модель

Модель построена на базе комплекса мультикомпарментальных моделей терморегуляции и теплообмена человека [2, 3].

Модель реализована в виде информационной технологии. Информационная технология позволяет прогнозировать динамику функционального состояния человека по показателям, характеризующим систему дыхания, кровообращения, водно-солевого баланса, теплообмена и температурного гомеостаза.

### 2. Программная реализация

Компьютерная модель написана в форме проекта в среде Borland C++ Builder 6. Разработанный графический интерфейс удобен в использовании и проведение эксперимента сводится к простым и понятным действиям. Программу нужно запустить, ввести исходные данные и получить результаты.

Ввод исходных данных представлен несколькими независимыми вкладками, каждой из которых соответствует отдельный класс характеристик и параметров. Модель содержит четыре базовых класса: «человек», «одежда», «нагрузка» и «среда».

На вкладке «человек» (рис. 1, а) представлены характеристики физиологических систем человека: вес, рост, площадь поверхности тела, метаболизм, потребление кислорода, кровотоки, легочная вентиляция, коэффициенты теплопереноса и теплообмена, сердечный выброс и др. Предоставлена возможность моделировать процессы физиологической терморегуляции в организме человека изменяя свойства центральной и периферической температурной чувствительности, регулирующие реакции организма, адаптационные и индивидуальные характеристики человека (рис. 1, б).

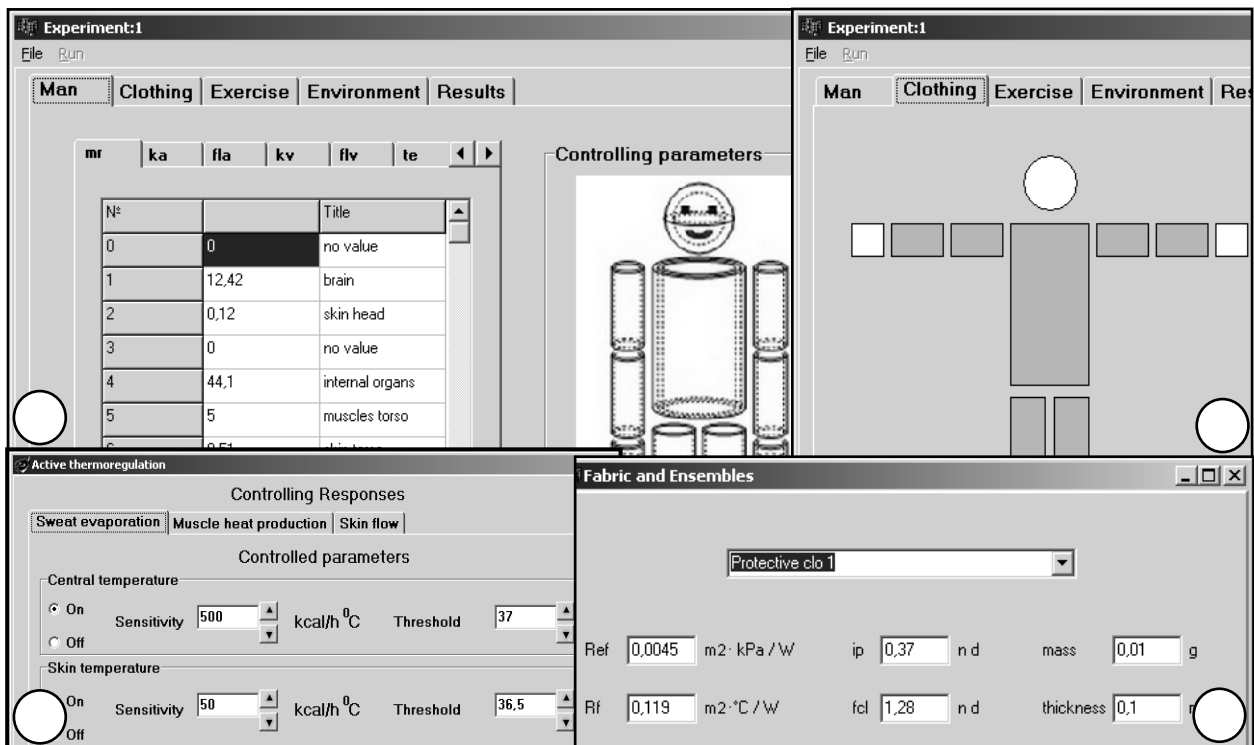


Рис.1. Фрагменты интерфейса программы: а – вкладка «человек», б – адаптационные и индивидуальные характеристики человека, с – вкладка «одежда», д – выбор ткани из базы данных

Программа позволяет моделировать практически любую одежду человека, включая защитное снаряжение для человека, работающего в экстремальных условиях. Для этого на вкладке «одежда» нужно выбрать конструкцию (вид) одежды (рис. 1, с) и ее материал из базы данных тканей (рис. 1, d). Есть возможность редактирования и дополнения этой базы данных. В нее входят такие параметры, как теплоизоляция и толщина ткани, испарительное сопротивление, коэффициент проницаемости и коэффициент, отражающий изменение площади поверхности тела человека в одежде.

Модель позволяет имитировать различные виды физической нагрузки (например, ходьба, бег, перенос тяжести и др.), для чего на вкладке «нагрузка» (рис. 2, а) необходимо задать:

- Коэффициенты, отражающие относительное распределение физической нагрузки по группам скелетной мускулатуры тела, которые выполняют физическую нагрузку (рис. 2, б). В модели 7 групп мышц: мышцы кисти, плеча, предплечья, туловища, бедра, икроножные мышцы и мышцы ступни.
- Мощность нагрузки (от 85 Вт до 1000 и более Вт) для двух этапов.
- Длительность этапов нагрузки, а также, при

необходимости, длительность отдыха до, после и между этапами нагрузки.

На вкладке «среда» (рис. 2, с) задаются температура, относительная влажность и скорость движения воздуха для двух этапов нагрузки.

В модели используется большое количество вводимых исходных данных, но это не является недостатком, так как все они заданы по умолчанию. Наоборот, возможность их изменять, допускает практически неограниченное число вариантов и комбинаций, что расширяет возможности использования программы.

Проведение вычислительных экспериментов на модели позволяет получить переходные и установившиеся режимы температур, кровотоков, метаболических процессов, потоотделения, сердечного выброса, ударного объема сердца, частоты сердечных сокращений и др. (рис. 2, d). Вывод результатов осуществляется в виде графиков и таблиц.

Имеется возможность сохранения условий и результатов вычислительных экспериментов (Archive), их автоматического анализа, вывода на экран заключения о возможности пребывания человека в выбранных условиях, получение практических рекомендаций для обеспечения комфортных условий и предотвращения опасных ситуаций.

Man	Clothing	Exercise	Environment	Results
Local coefficients of exercise				
Torso		0,3		
Arm		0,04		
Forearm		0,04		
Hand		0,01		
Thigh		0,3		
Calf		0,3		
Foot		0,01		
Sum		1		
Total parameters				
Temperature environment	ta	40	°C	Time 1
Relative humidity	rh	0,2	ND	
Air velocity	va	0,1	m/s	
Activity velocity	ve	0,9	m/s	<b>c</b>
Environment Results				
Temperatures				
Mean values				
T-Responses				
Cardiac parameters <b>d</b>				

Clothing	Exercise	Environment
Exercise 1	300 W	
Start 1	0 hours	
Finish 1	1 hours	
Exercise 2	300 W	
Start 2	1 hours	
Finish 2	2 hours	
Time	2 hours	

Рис.2. Фрагменты интерфейса программы: **a** – вкладка «нагрузка», **b** – распределение физической нагрузки по группам скелетных мышц, **c** – вкладка «среда», **d** – результаты эксперимента

#### 4. Результаты исследований

Проведено четыре модельных эксперимента в следующих условиях. Человек выполняет физическую нагрузку мощностью 300 Вт на открытом воздухе (скорость движения воздуха 1 м/с) в течение двух часов в жарких условиях среды (40 °С) с различной относительной влажностью воздуха (50 %; 20 %). Модельные эксперименты позволили оценить динамику процессов и проанализировать влияние характеристик одежды (хлопковый костюм; защитный костюм) на функциональное состояние человека.

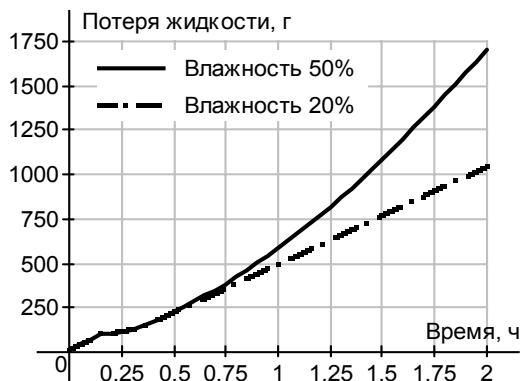


Рис.3. Динамика потери влаги при работе в жарких условиях среды. Одежда – защитный костюм

Как видно из рис. 3 в сухих жарких условиях (влажность 20%) организм в защитном снаряжении за два часа теряет 1050 г. жидкости. Эти потери находятся в пределах нормы, и организму не угрожает обезвоживание [4, 5]. При влажности воздуха 50 % человек в защитном снаряжении теряет 1700 г. жидкости за два часа работы в жарких условиях среды. Эта величина

составляет более 2% от его массы тела и является угрожающим здоровью человека сигналом обезвоживания организма. Модель выдает сигнальное предупреждение о необходимости прекращения работы и восполнения жидкости организмом. Важно заметить, что при тех же условиях при работе человека в хлопковом костюме за это же время теряет 1040 г. жидкости, как при влажности 20%, так и 50%. Эта величина находится в пределах нормы и не угрожает дегидратации организма.

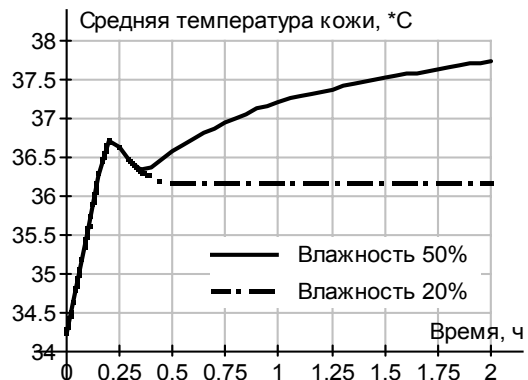


Рис.4. Динамика средней температуры кожи при работе человека в жарких условиях среды. Одежда – защитный костюм

Результаты моделирования показали, что при работе человека в защитном костюме и относительной влажности воздуха 20% средняя температура кожи вначале возрастает до 36.7 °С, а затем снижается до 36.1 °С благодаря терморегулирующей реакции потоотделения с последующим испарением (рис. 4). Величина испарения влаги с поверхности тела к концу пребывания в заданных условиях составляет

320 ккал/час (при работе 300 Вт). Частота сердечных сокращений с 72 до 119 уд/мин. Эти данные справедливы и для человека в хлопковом костюме при влажности воздуха 20% и 50%.

При влажности воздуха 50% теплоотдача испарением с поверхности тела человека в защитном костюме к концу эксперимента (2 часа) составляет 290 ккал/час. Так как нет условий среды для полного испарения пота, 1320 г/час жидкости стекает, и система терморегуляции человека не справляется со своей функцией. В силу того, что избыточное тепло накапливается в организме, а не отводится в среду, температура кожи возрастает до 37.7 °С, так же увеличивается частота сердечных сокращений до 140 уд/мин.

Для оценки функционального состояния человека рассчитывался индекс, характеризующий тепловую напряженность человека, по формуле Parsons [6]:

$$HSI = \frac{E_{required}}{E_{possible}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где  $E_{required}$  – требуемое испарение с поверхности кожи для поддержания температурного гомеостаза человека;  $E_{possible}$  – максимально допустимое испарение в данных условиях среды.

В таблице 1 представлены индексы тепловой напряженности по результатам моделирования к концу пребывания в заданных условиях при различной влажности воздуха в различной одежде.

**Таблица 1. Индекс тепловой напряженности HSI**

Влажность	20%	50%
Хлопковый костюм	45	88
Защитный костюм	69	265

Индекс тепловой напряженности (табл. 1) для человека работающего в хлопковом костюме при относительной влажности 0.2 и 0.5, а так же для человека в защитном костюме при относительной влажности 0.2, меньше 100%. Таким образом эти условия не вызывают опасений, угрожающих здоровью человека. При работе человека в защитном снаряжении и относительной влажности 0.5 индекс тепловой напряженности достигает 265%, что говорит о сильном тепловом стрессе, которому подвержен человек.

Таким образом, с помощью модели можно прогнозировать термофизиологическое состояние человека в различных условиях среды с учетом свойств одежды, предупредить повреждающие факторы среды и принять защитные меры.

## Выводы

Разработанная модель позволяет решать большой класс задач, связанных с прогнозом функционального состояния человека при работе в жарких условиях среды. Эффективность терморегуляции зависит от степени агрессивности среды – температуры и влажности воздуха, а также от одежды, в которой работает человек. Результаты исследований показали, что при работе человека в жарких условиях среды основным риск фактором следует считать потерю жидкости, угрожающую обезвоживанию организма. Модельные эксперименты позволили количественно оценить эту угрозу и проверить условия, влияющие на ее возникновение.

## Литература

1. *Miyo Yokota, Larry Berglund, Samuel Chevront. Thermoregulatory model to predict physiological status from ambient environment and heart rate // Computers in Biology and Medicine 38.–2008.–P.1187-1193.*
2. *Yermakova I., Candas V. Practical use of thermal model for evaluation of human state in hot environment // Summary of French-Ukrainian project ICEE X11, Ljubliana.–2007.–P.468-471.*
3. *Candas V., Yermakova I. Computer simulation of human physical activity in moderate heat // Manikins and Modelling, Coimbra, Portugal.–2008.–Ed. M.Silva.*
4. *Bruce C. Wenger, Human Adaptation to Hot Environments // Medical Aspects of Harsh Environments.–Vol. 1.–2002.–P.51-86.*
5. *Candas V., Adaptation to Extreme Environments // Comparative Physiology of Environment Adaptation.–Vol. 2.–1986.–P.76-93.*
6. *Parsons K. Human Thermal Environments // Loughborough University, Leicestershire, UK.–2003.–527 pp.*

<sup>1</sup>Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем ЮНЕСКО

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

<sup>3</sup>Научно-клинический центр физиологии, Ашхабад, Туркменистан