

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОГРУЖЕНИИ В ВОДУ

И.И. Ермакова, Ю.Н. Солопчук

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и Министерства образования и науки Украины

Описана математическая модель системы терморегуляции человека при погружении в воду, которая учитывает уровень погружения, характеристики водной и воздушной сред, интенсивность и вид физической нагрузки, выполняемой человеком. Модель позволяет оценить функциональное и тепловое состояние человека, время и условия безопасного пребывания в воде. Приведены результаты компьютерных экспериментов, показывающие динамику происходящих физиологических процессов в организме человека во время погружения.

Описано математичну модель системи терморегуляції людини при зануренні у воду. Модель враховує рівень занурення, характеристики водного та повітряного середовищ, інтенсивність та вид фізичного навантаження, яке людина виконує перебуваючи у воді. Модель дозволяє оцінити функціональний та тепловий стан людини, час та умови безпечного перебування у водному середовищі. Наведено результати комп'ютерних експериментів, які демонструють динаміку процесів, що відбуваються в організмі людини при зануренні у воду.

Введение

Компьютерные модели терморегуляции позволяют предсказать функциональное состояние человека, связанное с терморегуляционными реакциями, не подвергая при этом опасности его здоровье. Модели терморегуляции нашли широкое применение для оценки тепловых реакций при различных условиях среды: водной или воздушной. Первая математическая модель, описывающая тепловое состояние человека, была разработана Montgomery в 1974 г. [1]. С этого времени математические модели человека в воде активно развивались и адаптировались для узкоспециализированных задач многими авторами. Tikuisis и соавт. [2] разработали математическую модель оценки теплового состояния солдат в воде для армии США. Хи и соавт. [3, 4] была создана модель оценки теплового состояния человека, на базе которой было создано компьютерное обеспечение для службы спасения с целью оценки времени выживания в воде. Также есть работы, посвященные разработке и оценке защитных свойств защитного снаряжения для водной среды [5, 6].

Целью данной работы является разработка математической модели терморегуляции человека при погружении в воду, позволяющая прогнозировать функциональное и тепловое состояние человека в зависимости от температуры воды и выполняемой физической нагрузки.

Описание математической модели

В связи с неоднородностью теплофизических и физиологических свойств участков тела человека, в основу математического описания положено уравнение теплового баланса, составленное для элементарной единицы [7]. В качестве элементарной единицы взят объем цилиндрической формы ij -й

(в дальнейшем — ij -й компартмент). Первый индекс i обозначает номер цилиндра (часть тела), а второй j относится к номеру слоя в нем. Деление цилиндра j на слои выполняется с учетом основных функций выделяемого слоя: внутренние органы и мозг, мышцы, подкожный жир и кожа. Геометрическая форма тела и структура воспроизводятся набором взаимодействующих компартментов. Для описания человека, находящегося в воде, в данной модели тело человек аппроксимировано 38 компартментами, включающими подкожную жировую ткань (рис. 1). Степень аппроксимации продиктована условиями пребывания человека в воде, так как высокие теплоизоляционные свойства жировой ткани существенно влияют на время пребывания.

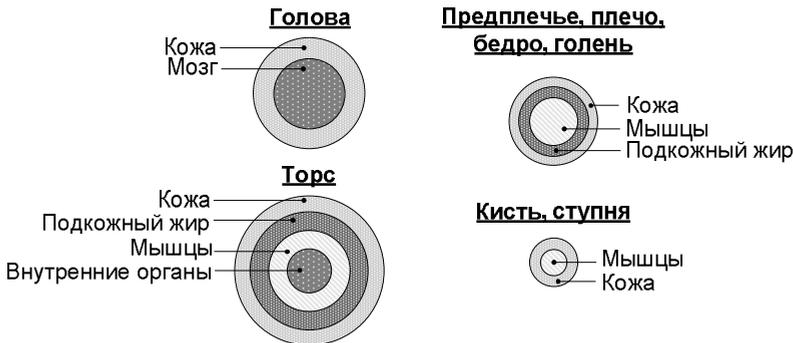


Рис.1. Аппроксимация тела человека

Допущения и ограничения

Построение моделей, описывающих столь сложные явления, как обеспечение температурного гомеостаза у человека, связаны с введением значительных упрощений, многие из которых стали общепринятыми и присутствуют в большинстве моделей:

- Каждый компартмент обладает гомогенными и изоморфными свойствами.
- Теплопередача кондукцией между торцевыми поверхностями не учитывается, так как площадь оснований элементарных компартментов несоизмеримо меньше площади боковой поверхности.
- Кровотоки в компартментах представлены системой параллельных ветвей, исходящих из одной точки.
- Смещение тепловых потоков, переносимых кровью, происходит в резервуаре смешения, включающем объем крови крупных венозных сосудов и сердца.
- Температура крови, притекающей ко всем компартментам, одинакова и равна температуре смешанной венозной крови.
- Температура венозной крови компартмента равна температуре ткани этого компартмента.
- Конвективный теплообмен между близлежащими поверхностными венами и глубинными артериями не учитывается, так как модель представляет систему с сосредоточенными параметрами.

- Не учитывается давление столба жидкости на тело человека (глубинное погружение не моделируется).

Пассивная часть системы терморегуляции

Модель пассивной части системы описывает процессы теплообразования, теплопередачи и теплообмена и, по сути, является моделью теплофизических свойств организма. Поэтому математическое описание строится на основании физических законов. На рис. 2 представлена блок-схема взаимодействия человека с водной и воздушной средами. Уравнение теплового потока для ij -го компартмента имеет вид

$$c_{ij}m_{ij}\frac{dT_{ij}}{dt} = M_{ij} + Q_{ex} + Q_{ij-1}^K - Q_{ij}^K \pm Q_{ij}^B \pm Q_{ij}^{CW} \pm Q_{ij}^{CA} \pm Q_{ij}^R - Q_{ij}^E - Q_{ij}^{RS}, \quad (1)$$

где c_{ij} — удельная теплоемкость; m_{ij} — масса; T_{ij} — температура компартмента; M_{ij} — основной метаболизм; Q_{ex} — физическая нагрузка, Q_{ij}^K — теплопередача кондукцией между смежными компартментами; Q_{ij}^B — конвективный перенос кровью; Q_{ij}^{CW} , Q_{ij}^{CA} — теплообмен с водной и воздушной средой конвекцией соответственно; Q_{ij}^R — теплообмен со средой излучением в инфракрасном диапазоне; Q_{ij}^E — теплоотдача испарением с кожи; Q_{ij}^{RS} — теплоотдача испарением с верхних дыхательных путей.

В воздушной среде теплообмен тела человека со средой происходит путем конвекции и кондукции, испарения влаги с кожи и верхних дыхательных путей, лучистого теплообмена в инфракрасном диапазоне (рис. 2). Соотношение этих процессов зависит от параметров воздушной среды: температура, влажность, скорость воздуха, атмосферное давление. Подробное описание процессов теплообмена в воздушной среде детально дано в работах Ермаковой И.И., Солопчук Ю.М. [9, 10].

В воде основной теплообмен человека со средой происходит путем конвекции и кондукции (рис. 2).

Теплопередача конвекцией в воде для ij -го компартмента имеет вид

$$Q_{ij}^{CW} = h_{ij}^{CW} A_{ij} (T_{ij} - T_{iW}), \quad (2)$$

где h_{ij}^C — коэффициент теплообмена конвекцией; A_{ij} — площадь поверхности кожи; T_{iW} — температура среды, с которой соприкасается ij -й компартмент.

Расчет коэффициента теплообмена конвекцией представляет самостоятельную задачу в каждом конкретном случае. Его величина определяется теплофизическими характеристиками среды и компартмента.

Формула для определения коэффициента теплообмена конвекцией человека с водой имеет вид [8]

$$h^{CW} = \frac{K_w Nu}{d_{ij}}, \quad (3)$$

где Nu — число Нуссельта, K_w — теплопроводность воды, d — диаметр ij -компартмента.

В зависимости от состояния воды и поведения человека конвекция в воде может быть свободной или вынужденной. Коэффициент Нуссельта

по-разному рассчитывается для свободной или вынужденной конвекции.

Число Нуссельта для вынужденной конвекции

$$Nu_f = 0,66 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (4)$$

где Re — число Рейнольдса, Pr — число Прандтля.

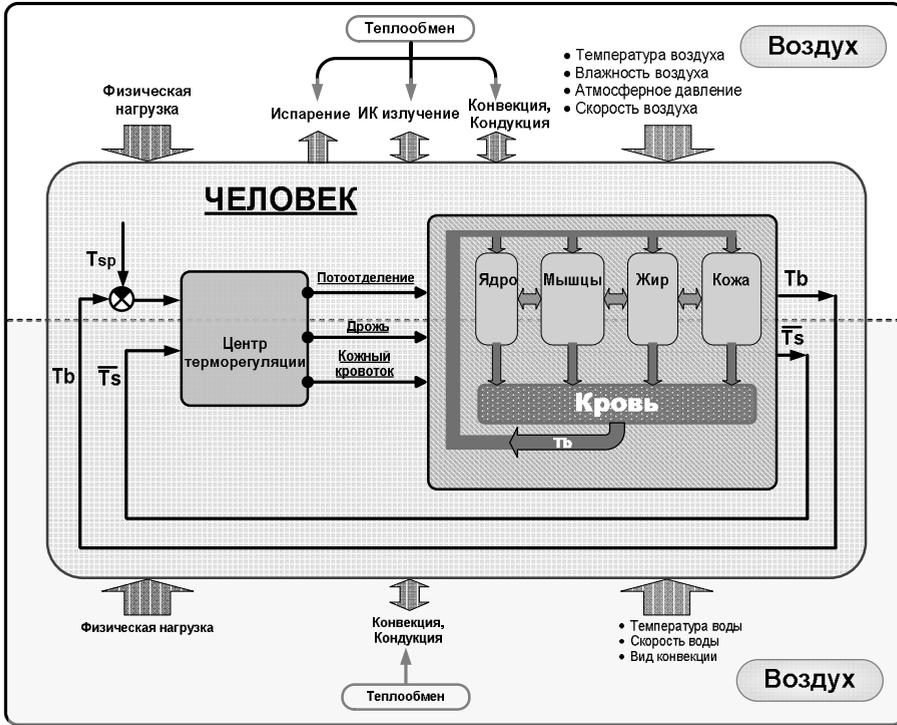


Рис. 2. Схема теплообмена человека со средой

Число Рейнольдса определяется следующим образом:

$$Re = \frac{V_w d_{ij}}{\mu}, \quad (5)$$

где V_w — скорость воды, μ — кинематическая вязкость воды.

Число Прандтля определяется по формуле:

$$Pr = \frac{\mu}{D}, \quad (6)$$

где D — коэффициент температуропроводности воды.

Число Нуссельта для свободной конвекции

$$Nu_{fr} = 0,54(Pr \cdot Gr)^{1/4}, \quad (7)$$

где Gr — число Грасгофа, которое определяется следующим образом:

$$Gr = \frac{\beta g d^3 (T_{ij} - T_w)}{\mu^2}, \quad (8)$$

где T_w — температура воды; T_{ij} — температура ij -компартамента, соприкасающегося с водой.

В целом математическое описание процессов пассивного теплообразования и теплопереноса представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, состоящую из уравнений вида (9), количество которых равно количеству компарментов:

$$c_{ij}m_{ij} \frac{dT_{ij}}{dt} = M_{ij} + Q_{ex} + Q_{ij-1}^K - Q_{ij}^K \pm Q_{ij}^B \pm \frac{K_w Nu}{d_{ij}} \pm Q_{ij}^{CA} \pm Q_{ij}^R - Q_{ij}^E - Q_{ij}^{RS}, \quad (9)$$

и уравнения смешивания тепловых потоков переносимых кровью:

$$V_b \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K w_{ij} \rho_b c_b T_{ij} - W \rho_b c_b T_b - V_b r (\rho_{ex} - \rho_{in}) - V_b c_b (T_b - T_e), \quad (10)$$

где V_b — объем крови; W — сердечный выброс.

Активная часть системы терморегуляции

Регулирование температуры тела человека в зависимости от поступающей информации (температура крови, внутренних органов, кожи, гипоталамуса) осуществляется активной частью системы терморегуляции.

Регулирующая система состоит из афферентных звеньев и эффекторов. Афферентные звенья — рецепторы, реагирующие на изменение температуры или теплового потока и проводящие сигналы в центр терморегуляции. Эффекторы — исполнительные механизмы физиологических систем, выполняющие функции, направленные на поддержание температуры тела.

Построение модели управления предполагает принятие определенной концепции, характеризующей процесс поддержания постоянства температур тела. Определив структуру центра терморегуляции, афферентных и эффекторных звеньев, необходимо установить логические связи между ними и получить количественные характеристики. К ним относятся формирование афферентных сигналов, пороговые значения терморцептивных зон, превышение которых запускает специфические реакции, расчет напряженностей самих реакций, их региональное распределение в организме и чувствительности (коэффициенты усиления) центра терморегуляции к афферентным сигналам для вызова соответствующих реакций.

В афферентные звенья входит уравнение смешивания тепловых потоков, переносимых кровью (10), средняя температура кожи определяется следующим образом:

$$T_s = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N T_{ij} A_{ij}, \quad (11)$$

где

$$A = \sum_{i=1}^N A_i, \quad (12)$$

и наружный тепловой поток

$$Q_e = \sum_{i=1}^N A_{ij} (h_{ij}^C + h_{ij}^R) (T_{ij} - T_b). \quad (13)$$

Основными терморегуляторными реакциями человека в воде являются сосудистая реакция кожи и холодовой термогенез скелетных мышц тела человека.

Сосудистая реакция кожи (изменение кожного кровотока):

$$\left. \begin{aligned} W' &= W_s^* - S_{b1}(T_{hy}^* - T_{hy}) - S_{s1}(T_s^* - T_s) - S_{p1}T_s, & (T_{hy}^* - T_{hy}) < H_{hy}, \\ W'' &= W_s^* - S_{b2}(T_b^* - T_b) - S_{s2}(T_s^* - T_s) - S_{p2}T_s, & (T_s^* - T_s) < H_{s2}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где T_{hy}^* , T_{hy} — предустановленная (сет-пойнт) и текущая температуры гипоталамуса (центра терморегуляции) соответственно; T_s^* , T_s — средняя предустановленная и текущая температуры кожи; H_{hy} , H_{s2} — пороговые значения начала реакции; S_{xi} — коэффициенты усиления; W_s^* — начальный кожный кровоток; W'_s , W''_s — увеличение и уменьшение кровотока в коже соответственно.

Существует множество эмпирических зависимостей, описывающих холодовой термогенез скелетных мышц человека в воде. Дополнительное тепло, образуемое в результате холодового термогенеза, определяется по формуле [1]:

$$M_m = A \left(5(T_s^* - T_s)(T_{hy}^* - T_{hy}) + 65 \left(\frac{T_s^* - T_s}{\%BF} \right)^{1.5} \right) T_s^* - T_s \geq H_{s3}, \quad (15)$$

где $\%BF$ — процентное содержание жира в теле человека.

Так как все реакции терморегуляции имеют специфическую локализацию в теле человека, уравнений (14) – (15) не достаточно для описания эфферентных реакций. Все полученные из уравнений (14) – (15) величины должны быть распределены соответственно по компартментам.

Кожный кровоток распределяется пропорционально площади поверхности:

$$w_{ij} = w_{si} + k_{si} W_s, \quad (16)$$

где k_{si} — коэффициент пропорциональности, определяемый площадью поверхности кожи:

$$k_{si} = \frac{A_i}{A}, 0 < k_{si} < 1, \sum_{i=1}^N k_{si} = 1. \quad (17)$$

Теплопродукция в мышцах распределяется пропорционально массе мышц:

$$M_m = M_{mi}^* + k_{mi} M_m, \quad (18)$$

где k_{mi} — коэффициент пропорциональности, определяемый массой мышц:

$$k_{mi} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, 0 < k_{mi} < 1, \sum_{i=1}^N k_{mi} = 1. \quad (19)$$

Также модель включает в себя физическую нагрузку, которая распределяется по группам мышц в зависимости от вида выполняемой нагрузки.

При выполнении физической нагрузки кровотоков в мышцах увеличивается пропорционально величине нагрузки:

$$W_{ex} = \frac{Q_{ex} W_m^*}{m}, \quad (20)$$

где Q_{ex} — выполняемая работа в килокалориях; W_m^* — начальный мышечный кровоток; m — масса тела.

Частота сердечных сокращений при выполнении физических упражнений определяется по эмпирической формуле:

$$HR = 20T_b - 661 + 0,116Q_{ex}, \quad (21)$$

где T_b — температура крови.

Результаты

Модель реализована в виде компьютерной технологии. Фрагмент интерфейса представлен на рис. 3.

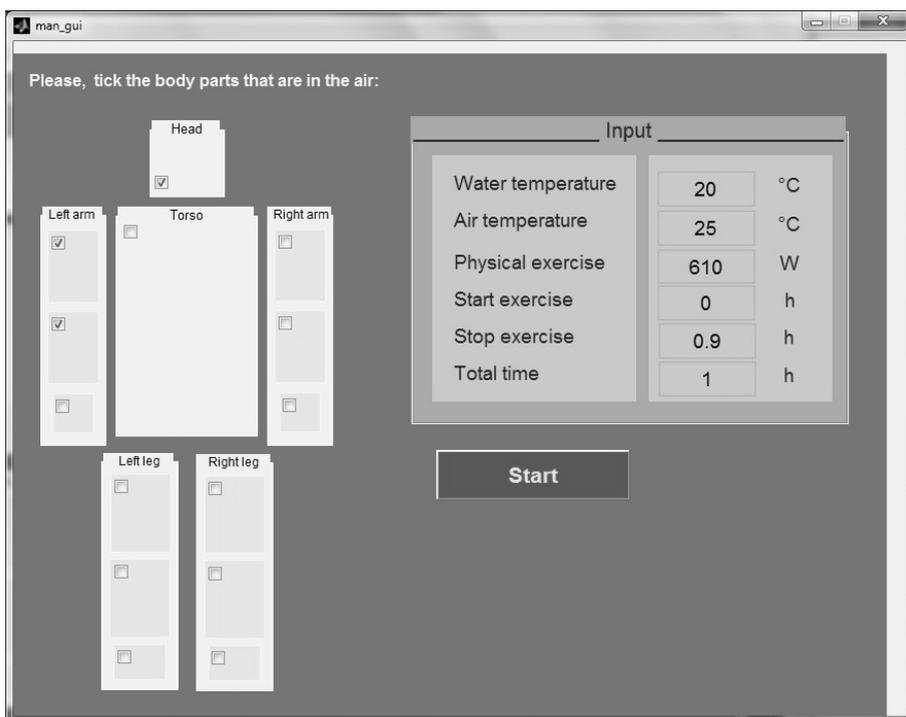


Рис. 3 Окно графического интерфейса информационной технологии для выбора условий проведения эксперимента

Было проведено две серии модельных экспериментов для прогноза теплового состояния человека в воде. Условия экспериментов одинаковые

для обеих серий: человек находится в воде; голова — на воздухе; температура воздуха 20 °С.

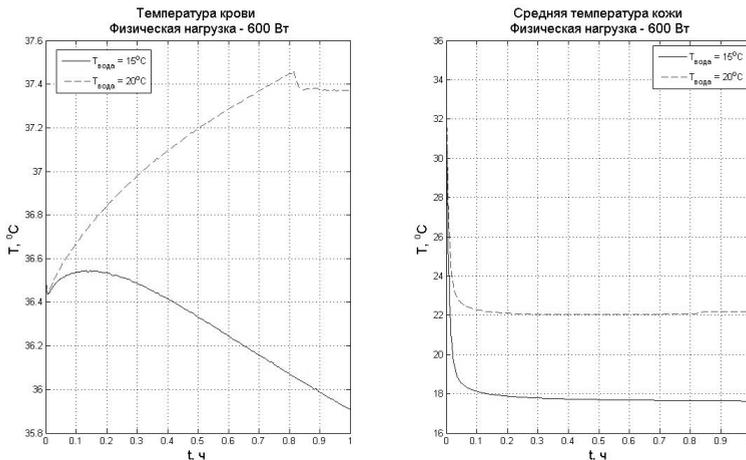


Рис. 4. Температура крови и скорость охлаждения человека при погружении в воду и выполнении физической нагрузки 600 Вт

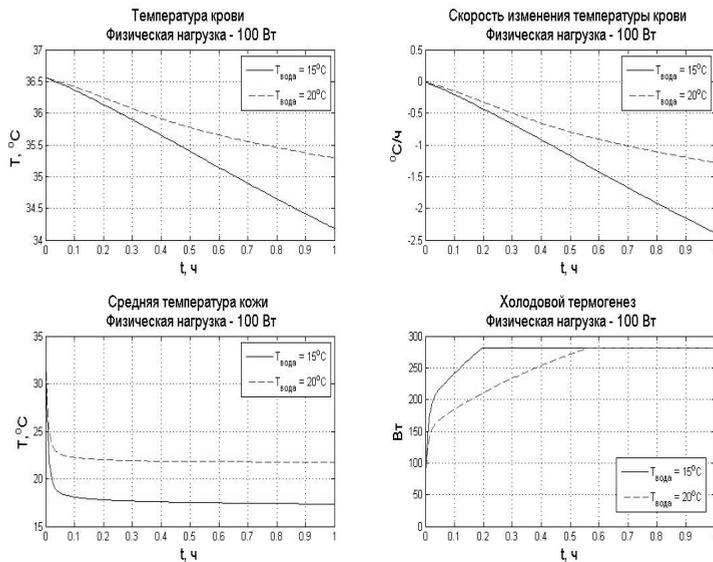


Рис. 5. Температура крови и скорость охлаждения человека при погружении в воду и выполнении физической нагрузки 100 Вт

В *первой* серии экспериментов человек плыл на протяжении часа. Физическая нагрузка 600 Вт — свободный стиль. Эксперименты проводились для двух условий: температура воды 15 °С (табл. 1, 6/15) и 20 °С (табл. 1, 6/20). Результаты экспериментов показали (рис. 4, табл. 1), что при температуре воды 20 °С нагрузка 600 Вт вполне достаточна для компенсации тепловых потерь в воде. Температура крови повышается и устанавливается на уровне 37,37 °С. При температуре воды 15 °С тепловые потери путем конвекции в воде превышали 600 Вт, в результате чего через 10 минут после погружения началось падение температуры крови со скоростью $-0,66$ °С/час.

© И.И. Ермакова, Ю.Н. Солопчук, 2013

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2013. Вып. 172

Во второй серии экспериментов человек держался в воде с минимальным движением (100 Вт). Температуры воды — 15 °С (табл.1, 1/15) и 20 °С (табл. 1, 1/20). Результаты экспериментов показали (рис. 5, табл. 1), что при обеих температурах человек сразу же испытывает холодовой стресс. При 15 °С через 1 час температура крови достигает значения, угрожающего жизни человека.

Таблица 1

Результаты проведения модельных экспериментов

	Температура, °С				Кровоток, л/час			Физическая нагрузка, Вт	Холодовой термогенез, Вт
	600/15	600/20	100/15	100/20	600/15	600/20	100/15, 100/20	600/15, 600/20	100/15, 100/20
Мозг	35,79	37,19	34,23	35,19	48	48	48	14,44	14,44
Кожа головы	29,52	31,01	28,6	29,15	0,08	0,31	0,08	0,14	0,14
Внутренние органы	36,14	37,54	34,55	35,54	230	230	230	46,51	46,51
Мышцы торса	36,23	37,88	34,98	36,32	58,86	58,86	21,06	149,81	127,49
Жир торса	26,58	29,7	25,98	28,85	2,3	2,3	2,3	2,72	2,72
Кожа торса	16,11	21,04	16,05	20,85	0,38	1,42	0,38	1,02	1,02
Мышцы плеча	31,26	33,66	28,39	31,07	3,77	3,77	1,25	10,06	13,69
Жир плеча	29,37	32,07	26,87	29,8	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
Кожа плеча	16,91	21,7	16,58	21,3	0,04	0,16	0,04	0,09	0,09
Мышцы предплечья	31,33	33,77	27,46	30,36	3,77	3,77	1,25	10,06	11,36
Жир предплечья	29,47	32,22	26,07	29,2	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
Кожа предплечья	17,48	22,19	16,91	21,58	0,03	0,11	0,03	0,09	0,09
Мышцы кисти	22,44	26,36	20,2	24,58	1,01	1,01	0,38	2,73	6,55
Кожа кисти	17,03	21,81	16,43	21,25	0,02	0,08	0,02	0,05	0,05
Мышцы бедра	36,92	38,54	33,84	35,26	24,68	24,68	5,78	73,35	30,79
Жир бедра	35,28	37,15	32,47	34,13	0,27	0,27	0,27	0,31	0,31
Кожа бедра	16,63	21,48	16,4	21,14	0,08	0,28	0,08	0,21	0,21
Мышцы голени	36,91	38,56	33,64	35,21	24,68	24,68	5,78	73,35	30,79
Жир голени	35,28	37,18	32,27	34,08	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15
Кожа голени	16,87	21,69	16,6	21,3	0,06	0,24	0,06	0,21	0,21
Мышцы ступни	24,34	27,9	22,45	26,35	1,26	1,26	0,63	3,06	6,87
Кожа ступни	16,49	21,36	16,2	21,02	0,03	0,13	0,03	0,07	0,07
Кровь	35,91	37,37	34,19	35,29	–	–	–	–	–

Выводы

Разработанная математическая модель системы терморегуляции человека при погружении в воду учитывает уровень погружения, характеристики водной и воздушной сред, интенсивность и вид физической нагрузки, выполняемой человеком.

Модель позволяет оценить функциональное и тепловое состояние человека, время и условия его безопасного пребывания в воде. Модель позволяет прогнозировать значения температур, кровотоков, теплопродукции и потерь тепла в различных частях тела человека, что позволяет предотвратить повреждение здоровья человека.

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

- European Journal of Applied Physiology*, 2007, vol. 100, pp. 79–88.
4. Xu X., Turner C.A., Santee W.R. Survival time prediction in marine environments. *Journal of Thermal Biology*, 2011, vol. 36, pp. 340–345.
 5. Tikuisis P. Prediction of the thermoregulatory response for clothed immersion in cold water. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1989, vol. 59, pp. 334–341.
 6. Shender B.S., Todd W. Predicted water immersion survival times for antiexposure ensembles. *Proc. of the Forty Third Annual SAFE Association Symposium*, 2005, pp. 176–184.
 7. Yermakova I. Mathematical modeling of thermal processes in man for development of protective clothing. *Journal of Korean Society of Living Environmental system*, 2001, vol. 8, pp. 127–134.
 8. Campbell G. S., *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York: Springer-Verlag, 1977. 159 p.
 9. Yermakova I., Solopchuk Y., Khudyakova L. Heat production, heat transfer and heat exchange in man during water immersion. *Proc. of 2013 XXXIII Int. Scientific Conf. Electronics and Nanotechnology*. Kiev, 2013, pp. 290–292.
 10. Yermakova I.I., Solopchuk Y.M., Tadeieva J.P. Heat exchange model for prediction of human thermal state in water. *Proc. of XXXII Int. Scientific Conf. ELNANO 2012*. Kiev, 2012, pp. 200.

Получено 23.05.2013