

Моделирование процессов изменения температуры тела человека при воздействии холода

Аннотация

Разработана аналитическая модель адаптации организма человека к низкотемпературному воздействию, характеризующая одновременное параллельное действие температурного регулирования организма человека на различных уровнях. Предложена интерпретация параметров, входящих в уравнение динамики температуры тела человека, синтезированное в ходе разработки предложенной аналитической модели.

Актуальность

Реализация государственной программы освоения Крайнего Севера ведет к росту миграции большого числа специалистов в полярные регионы. В сложившихся условиях особенно необходимы новые подходы к организации экспедиций, обеспечивающие безопасность и эффективность работы привлекаемых сотрудников. Обеспечение безопасной и эффективной работы в условиях пониженных температур невозможно без использования нового эффективного метода профессионального отбора по медицинским показаниям. Отличие подобного метода профессионального отбора по медицинским показаниям от классической формы врачебной комиссии должно выражаться в определении адаптационных резервов организма предполагаемых участников и допустимых нагрузок, которым можно подвергнуть организм участников без ухудшения их состояния здоровья. Отсутствие учета адаптационных возможностей организма участников может привести не только к ухудшению их состояния здоровья, но также к связанным с этим экономическим потерям, выражающимся в необходимости экстренной госпитализации участников и последующем замещении выбывших участников другими.

Постановка цели и задач исследования

Для изучения процессов адаптации к условиям экстремально низких температур предлагается провести ана-

лиз имеющихся сведений о реакции организма на воздействие холода и на основании полученных данных разработать модель, раскрывающую особенности адаптационной реакции организма человека на воздействие низких температур окружающей среды. Для достижения поставленной цели необходимы анализ данных об изменении температуры тела человека с течением времени, построение аналитической модели изменения температуры тела человека и последующее получение новых знаний о механизме адаптации к воздействию холода с помощью интерпретации параметров полученной аналитической модели.

Материалы и методы

Для выполнения поставленных задач необходимы анализ экспериментальных данных об изменении температуры тела человека с течением времени и последующая разработка аналитической модели с использованием продвинутых и признанных научным сообществом сред вычислительного моделирования Matlab R2012b и Mathcad Prime 3.0.

Решение задач исследования

Исследование реакций организма человека при воздействии низких температур на все его системы одновременно сопряжено со значительными трудностями, так как уменьшение температуры тела человека даже до 32 °С уже приводит к крайне тяжелым последствиям для здоровья (табл. 1).

Таблица 1

Реакция на охлаждение: заметные реакции на различные уровни гипотермии (по данным Ingvar Holmer, Per-Ola Granberg, Goran Dahlstrom [1])

Фаза	Температура внутренних органов, °С	Физиологическая реакция	Психологическая реакция
Нормальная	37	Нормальная температура тела	Ощущение тепловой нейтральности
	36	Сужение сосудов, холодные руки и ноги	Дискомфорт
Начальная гипотермия	35	Интенсивное дрожание, уменьшение работоспособности	Умственная деятельность затруднена, потеря ориентации, апатия
	34	Усталость	Умственная и эмоциональная
33	Суетливость		
Умеренная гипотермия	32	Жесткость мышечного тонуса	Прогрессирующая форма беспамятства, галлюцинации
	31	Слабое дыхание	Помутнение сознания
	30	Никаких проявлений нервной деятельности, частота сердечных сокращений уменьшается	
Сильная гипотермия	29		Оцепенение
	28	Аритмия сердца (в предсердной и желудочковой части)	
	27	Зрачки не реагируют на свет, отсутствует рефлексия глубоких и поверхностных сухожилий	
	25	Летальный исход из-за желудочковой фибрилляции или асистолии	

Для обеспечения безопасности здоровья испытуемого и наибольшей наглядности результатов зарубежными исследователями [1] рассматривалась реакция верхних конечностей испытуемого на воздействие холода, и в результате проведенных исследований ими были получены результаты, представленные на графике (рис. 1), описывающем динамику изменения температуры различных участков верхней конечности обследуемого с течением времени.

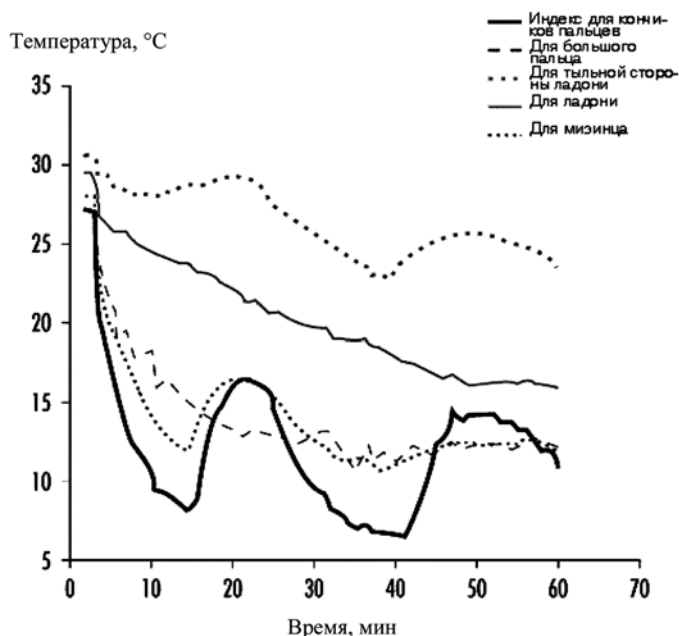


Рис. 1. Вызванное холодом расширение сосудов пальцев – причина циклических подъемов температуры тканей организма (по данным Ingvar Holmer, Per-Ola Granberg, Goran Dahlstrom [1])

На данном графике особое внимание привлекает кривая изменения температуры (температурный индекс) для кончиков пальцев, так как подобные кривые встречаются во многих публикациях, посвященных вопросу реак-

ции организма человека на низкотемпературные воздействия [2], [3]. Физиологическая природа данной кривой объясняется реакцией Льюиса, т. е. реакцией на локальное охлаждение выступающих наружу частей человеческого тела (например пальцев рук, ног или ушей), выраженной в виде неоднократного периодического подъема температуры этих частей тела на несколько градусов при помещении нижних конечностей в ледяную воду. На основании современных подходов к рассмотрению процессов, протекающих в организме человека, в качестве процессов, имеющих колебательную природу [4], становится возможным проведение аналогии между рассматриваемой температурной кривой для кончиков пальцев (рис. 1) и кривой, характеризующей изменения состояния системы при свободных затухающих колебаниях в модели крутильного маятника (рис. 2).

Подобная аналогия может быть достигнута при рассмотрении следующей гипотезы: в отличие от свободных затухающих колебаний, в начальный момент времени которых рассматривается лишь начальная амплитуда колебаний маятника A_0 , равная его первому отклонению, в начальный момент времени на графике динамики температуры кончиков пальцев их температура равна некоторому значению нормальной температуры для данной части тела в условиях отсутствия низкотемпературного воздействия внешней среды A (например, в начальный момент времени нормальная температура равна $36,6\text{ }^\circ\text{C}$), которая в то же время может быть рассмотрена как сумма следующих компонентов: двойной амплитуды колебаний $2 \cdot A_0$, которую можно интерпретировать как величину «температурного резерва», на протяжении которого еще возможна температурная саморегуляция организма, т. е. компенсация организмом человека воздействия низких температур внешней среды; постоянной составляющей температуры B как температурного уровня, на котором температурная саморегуляция обеспечивается интегральным эффектом регулирования температуры на всех уровнях регулирования систем организма, а также температурного коэффициента K , пропорционального

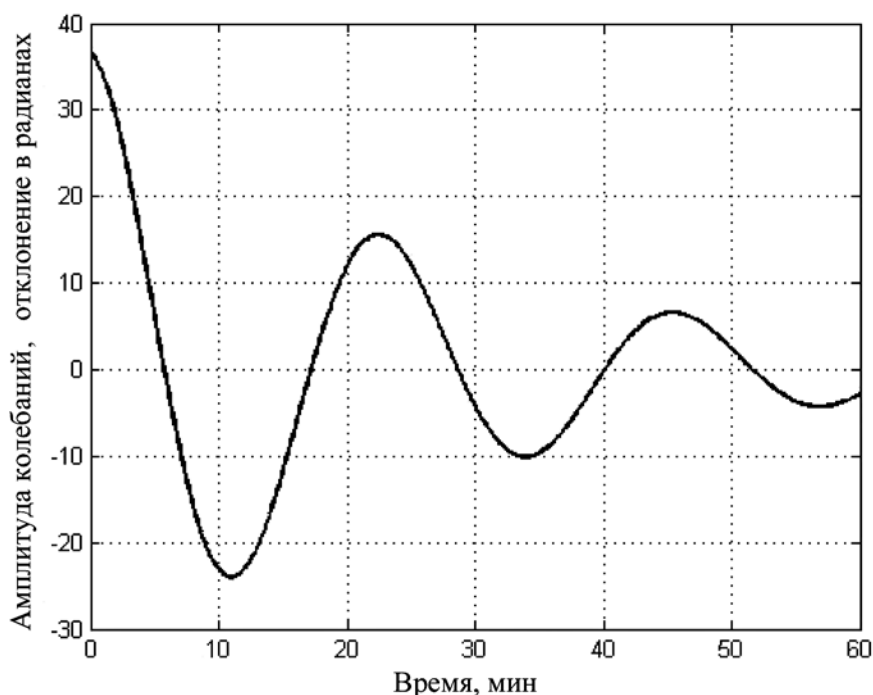


Рис. 2. График свободных затухающих колебаний

экспоненциальному характеру охлаждения тела, помещенного в холодную воду, согласно закону охлаждения Ньютона [5].

Упрощенное представление о столь сложном и многогранном понятии, как адаптация к условиям холода, объясняется желанием отразить связь между наблюдаемыми физиологическими реакциями организма человека на воздействие холода и фундаментальными физическими соотношениями, не только иллюстрирующими природу данного явления, но и предлагающими возможность его интерпретации.

Анализ изменения температуры тела человека с течением времени был проведен по совокупности точек экспериментально полученной зависимости, изображенной на рис. 1, после чего с привлечением среды вычислительного моделирования Mathcad была произведена оценка параметров модели и построен колебательный процесс, вид которого максимально соответствует рассматриваемому физическому аналогу (рис. 2) и формуле (1):

$$\varphi(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(w \cdot t), \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ – меняющаяся при колебаниях физическая характеристика системы; A_0 – начальная амплитуда; τ – время релаксации (промежуток времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз); w – циклическая частота колебаний.

Проведение расчетов и последующее построение графиков позволили найти значения времени релаксации τ и циклической частоты колебаний w , соответствующих колебательному процессу для кончиков пальцев [6], после чего анализ был продолжен с учетом экспоненциального спада температуры по закону Ньютона и в результате были получены аналитическая модель реакции тела

человека, а также соответствующие ей график (рис. 3) и уравнение (2):

$$T(t) = B + 2 \cdot A_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(w \cdot t) + K \cdot e^{-d \cdot t}, \quad (2)$$

где T – температура; t – время; B – постоянная составляющая температуры; K – коэффициент пропорциональности степени охлаждения тела; d – коэффициент скорости охлаждения тела.

Полученные численные значения данных параметров (табл. 2) носят индивидуальный характер. Но при этом их взаимное соотношение представляет интерес для получения новой информации о развитии процесса реакции организма человека на воздействие холода, благодаря высокой степени количественного и качественного подобия зависимости температуры от времени синтезированного графика (рис. 3) и графика экспериментальной зависимости температуры от времени для кончиков пальцев (рис. 1).

Таблица 2

Численные значения полученной аналитической зависимости

$B, ^\circ\text{C}$	$A_0, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{с}$	$w, \text{с}^{-1}$	$K, ^\circ\text{C}$	$D, \text{с}^{-1}$
8,77	13,47	26,56	0,27	14,36	0,06

Выводы

Разработанная аналитическая модель адаптации организма человека к воздействию холода предлагает интерпретацию данного сложного процесса с позиции фундаментального физического подхода, согласно которой найденные коэффициенты уравнения синтезированной кривой (2) приобретают следующее значение: тем-

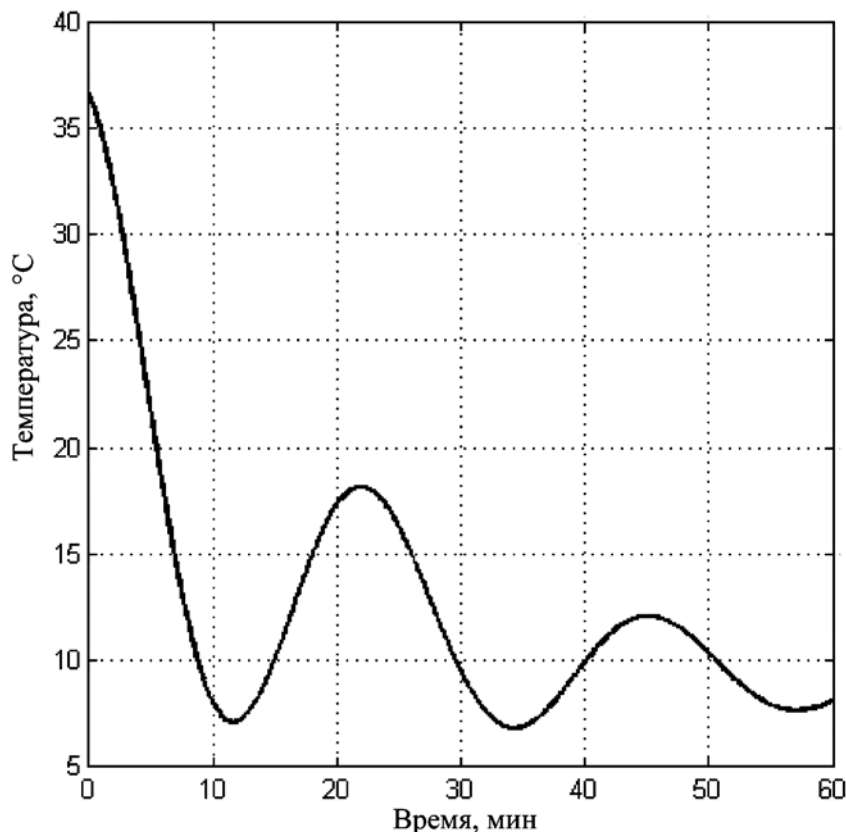


Рис. 3. Синтезированный график изменения температуры с течением времени

пература в каждый конкретный момент времени исследования складывается из значений температур двух параллельно протекающих процессов (3) – колебания температуры в пределах температурного «резерва» регуляции конкретной части тела $A(t) = 2 \cdot A_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(w \cdot t)$ и интегральной функции охлаждения тела $C(t) = K \cdot e^{-dt}$, соответствующей реакции всего организма на воздействие фактора холода, т. е. сумме двух процессов, протекающих на разных уровнях регуляции: на локальном [$2 \cdot A_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(w \cdot t)$] и глобальном уровнях ($K \cdot e^{-dt}$), которые действуют на фоне постоянной составляющей B , характеризующей вклад иных уровней регулирования организма человека в ответ на низкотемпературное воздействие [7], [8]:

$$T(t) = B + A(t) + C(t). \quad (3)$$

При этом коэффициенты, входящие в синтезированное уравнение (2) и соответствующее ему уравнение (3), могут быть интерпретированы следующим образом: A – температура тела в начальный момент времени, когда отсутствует воздействие холода; B – некоторый уровень температуры, по достижении которого саморегуляция организма на данном уровне регулирования прекращается и значение которого обеспечивается совокупным действием иных уровней регулирования температуры организма человека; $2 \cdot A_0$ – температурный «резерв» регуляции в начальный момент времени; τ – время релаксации, характеризующее скорость уменьшения температурного резерва; w – циклическая скорость, характеризующая колебательную природу изменения температуры и время активации механизмов компенсации внешнего температурного воздействия; K – коэффициент, характеризующий максимальное значение потери температуры на данном участке тела, вызванной общим охлаждением тела человека; d – коэффициент, характеризующий скорость охлаждения всего организма в целом.

Таким образом, разработана аналитическая модель реакции организма человека на воздействие низких температур, проявляемой на кончиках пальцев его верхних конечностей. В дальнейшем, при проведении соответствующих расчетов и развитии разработанных положений, данная модель может быть распространена на другие органы и системы организма человека для формирования комплексной модели адаптации всех систем организма к воздействию низких температур окружающей среды.

Список литературы:

1. Holmér I., Granberg Per-Ola, Dahlstrom G. Cold Environments and Cold Work. – Encyclopaedia of Occupational Health and Safety. Ed. Jeanne Mager Stellman, 4th ed. Geneva: International Labor Organization, 1998. Vol. 2. PP. 42-48.
2. Marriott B.M. Preliminary report: Nutritional needs in cold and in high-altitude environments: Applications for military personnel in field operations, Institute of Medicine (U.S.). Committee on Military Nutrition Research, National Academies. 1996. 79 p.
3. Ducharme M.B., VanHelder W.P., Radomski M.W. Cyclic intramuscular temperature fluctuations in the human forearm during cold-water immersion // European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. 1991. Vol. 63. Issue 3-4. PP. 188-193.
4. Гласс Л., Мэки М. От часов к хаосу: ритмы жизни / Пер. с англ. Р.И. Сельковой. Под ред. Е.Е. Селькова. – М.: Мир, 1991. С. 248.
5. Луканин В.Н., Шатров М.Г. Теплотехника. Учебник для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. 2-е изд., перер. – М.: Высш. шк., 2000. С. 671.
6. Смирнова Л.М., Юлдашев З.М. Измерительно-информационные системы для протезно-ортопедической отрасли // Биотехносфера. 2012. № 2. С. 17-23.
7. Юлдашев З.М. Многоуровневая пространственно-распределенная система ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1. С. 43-47.
8. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. Технология микрофокусной рентгенографии в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии // Биотехносфера. 2009. № 3. С. 18-23.

Юрий Игоревич Сенкевич,
д-р техн. наук, доцент,
ведущ. научный сотрудник,
лаборатория биомедицинской информатики,
Александр Захарович Яфаров,
аспирант, магистр техники и технологии
по направлению «Биомедицинская инженерия»,
кафедра биотехнических систем,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
г. С.-Петербург,
e-mail: senkevich@spiras.nw.ru

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ, РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!

ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»

НА 2014 ГОД.

Индекс по каталогу «Роспечать» – 72940.

В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.
Стоимость подписки (включая доставку и НДС 10 %): 750 руб. – за один номер,
2250 руб. – на первое полугодие 2014 года (3 номера), 4500 руб. – на 2014 год (6 номеров).

Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.