



УДК 536.2

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-2-292-298

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ
ГОМОЙОТЕРМНОГО ОРГАНИЗМА****HEATPHYSICAL ASSESSMENT OF THERMALLY NEUTRAL ZONE
GOMOYOTERMNY OF THE ORGANISM****Э.Б. Кулумбаев
E.B. Kulumbaev**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod State University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kulumbaev@bsu.edu.ru

Аннотация

На основе теплофизического подхода сделана оценка термонеutralной зоны гомойотермного организма. Получены аналитические формулы для нижней и верхней критических температур, ограничивающих термонеutralную зону тела с плоской, цилиндрической и сферической формой. Установленные теоретические зависимости критических температур от характеристик гомойотермного организма качественно соответствуют наблюдаемым экспериментальным свойствам и закономерностям термонеutralной зоны. Числовые оценки термонеutralной зоны для человека количественно согласовываются с опытными данными.

Abstract

The thermoneutral zone of the homeothermic organism on the basis of the thermophysical approach is estimated. Analytical formulas for the lower and upper critical temperatures limiting the thermoneutral zone of a body with a flat, cylindrical and spherical shape are obtained. The established theoretical dependences of the critical temperatures on the characteristics of the homeothermic organism qualitatively agreed to the observed experimental properties and regularities of the thermoneutral zone. Numerical estimates of the thermoneutral zone for a human are quantitatively consistent with the experimental data.

Ключевые слова: температура, гомойотермный организм, теплофизическое моделирование, термонеutralная зона.

Keywords: temperature, homeothermic organism, thermophysical modelling, thermoneutral zone.

Введение

Любому гомойотермному организму свойственно наличие термонеutralной зоны – интервала температур окружающей среды, при которых неизменными остаются минимально возможная (на уровне основного обмена) теплопродукция, теплоотдача и внутренняя температура тела, находящегося в состоянии покоя [1–5].

Опыт показывает, что в термонеutralной зоне, ограниченной нижней и верхней критическими температурами, температура кожи изменяется. Поэтому в теле организма пространственная картина теплопереноса должна меняться в термонеutralной зоне, но меняться так, чтобы неизменными оставались и теплопродукция, и теплоотдача. В физиологии считается, что такая перестройка теплообмена обеспечивается только за счет изме-

няющихся кровоснабжения и кровенаполнения тканей тела в результате вазомоторных реакций – сужения (при понижении температуры окружающей среды в пределах термонеutralной зоны) или расширения (при ее повышении) кровеносных сосудов [1–3]. Вне границ термонеutralной зоны интенсивность теплопродукции возрастает и организм «включает» другие физические и химические механизмы терморегуляции, направленные на поддержание изотермии [1–3].

Экспериментальные исследования теплопереноса в живом организме безусловно важны [6–7], но очевидным образом затруднены его сложностью, а часто их проведение и просто неосуществимо. Поэтому повышается значимость соответствующих теоретических исследований. Так, например, в [8–9] численное моделирование теплового гомеостазиса некоторых животных позволило показать, что наличие термонеutralной зоны обусловлено изменением размеров ядра и оболочки тела цилиндрической формы. Однако до сих пор в доступной научной и учебной литературе по физиологии отсутствуют аналитические оценки термонеutralной зоны (см., например, обзор [10]). Ценность подобного рода формул состоит в установлении функциональных закономерностей – зависимостей нижней и верхней критических температур термонеutralной зоны от величин, характеризующих гомойотермный организм и окружающую среду.

Поэтому цель данной работы – на основе простой теплофизической модели теплопередачи через плоскую, цилиндрическую и шаровую оболочку получить формульные оценки нижней и верхней критических температур.

Метод исследования

Метод исследования основан на теплофизической формализации стационарного теплообмена в системе «гомойотермный организм – окружающая среда».

В физиологической терморегуляции тело теплокровного организма общепринято представлять в виде гомойотермного ядра (внутренние органы и ткани тела), окруженного пойкилотермной оболочкой (ткани поверхностного слоя тела) [1–3]. Ядро характеризуется условно однородной в пространстве и условно постоянной во времени температурой. Приближение однородности приемлемо в силу интенсивного конвективного теплопереноса хорошо развитым кровотоком в ядре, который практически нивелирует пространственную неоднородность температуры и теплопродукции внутренних органов и тканей, а приближение стационарности – в силу малости суточных колебаний температур внутренних органов. В отличие от ядра в оболочке происходит перепад от температуры ядра до температуры внешней поверхности оболочки (кожи), а перенос тепла в ней происходит в основном за счет теплопроводности. Поскольку в термонеutralной зоне организм «не включает» дополнительные физиологические терморегуляторные механизмы, то мощность тепла производится в ядре на минимальном уровне основного обмена, вся она отводится из ядра в оболочку, из оболочки – в окружающую среду, а при изменении температуры окружающей среды в термонеutralной зоне баланс между теплопродукцией и теплоотдачей устанавливается за счет энергетически мало затратных вазомоторных реакций [1–2]. Теплопродукцией в оболочке пренебрегается, так как по приведенным в [11] данным она составляет менее 2 % от всей производимой организмом мощности.

Теплообмен «гомойотермный организм – окружающая среда» рассматривается для тел с плоской, цилиндрической и сферической формой в одномерном приближении. В плоской модели тела толщиной d ядром является плоский слой с толщиной d_c , окруженный с обеих сторон двумя плоскими слоями оболочки с толщинами $(d - d_c)/2$. Наличие симметрии относительно срединной плоскости позволяет ограничиться рассмотрением теплопереноса только в половине тела. В цилиндрической модели тела диаметром d ядром

является ему коаксиальный цилиндр с диаметром d_c , окруженный прилегающим цилиндрическим слоем оболочки с толщиной $(d - d_c)/2$. В сферической модели тела диаметром d ядром является ему концентрический шар с диаметром d_c , окруженный прилегающим шаровым слоем оболочки с толщиной $(d - d_c)/2$.

В теплофизике соответствующие этим моделям задачи формулируются как стационарная теплопередача через плоскую, цилиндрическую или шаровую стенку (оболочку), омываемую с обеих сторон жидкостями (в рассматриваемом случае кровью и воздухом) с заданными температурами [12]. Математическое описание теплопередачи основано на уравнениях переноса теплоты, выражающих законы Ньютона – Рихмана и Фурье в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат:

$$\dot{Q} = \alpha_1(T_c - T_{s1})A, \quad \dot{Q} = \frac{2\lambda(T_{s1} - T_{s2})}{d - d_c}A, \quad \dot{Q} = \alpha_2(T_{s2} - T_a)A, \quad (1a)$$

$$\dot{Q} = \alpha_1(T_c - T_{s1})\frac{d_c}{d}A, \quad \dot{Q} = \frac{2\lambda(T_{s1} - T_{s2})}{d \ln(d/d_c)}A, \quad \dot{Q} = \alpha_2(T_{s2} - T_a)A, \quad (1б)$$

$$\dot{Q} = \alpha_1(T_c - T_{s1})\frac{d_c^2}{d^2}A, \quad \dot{Q} = \frac{2\lambda(T_{s1} - T_{s2})}{d(d/d_c - 1)}A, \quad \dot{Q} = \alpha_2(T_{s2} - T_a)A, \quad (1в)$$

для плоской, цилиндрической и сферической формы тела соответственно.

Здесь \dot{Q} – поток тепла, равный мощности продуцируемого в ядре тепла; T_c – температура ядра; T_{s1} , T_{s2} – температуры внутренней (граничащей с ядром) и внешней (граничащей с окружающей средой) поверхностей оболочки; T_a – температура окружающей среды; λ – коэффициент теплопроводности оболочки; α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи с единицы площади внутренней и внешней поверхностей оболочки соответственно; A – площадь теплоотдачи внешней поверхности оболочки (кожи).

Результаты исследования

В отличие от теплофизической постановки [12–13], в которой требуется найти поток тепла, в рассматриваемой задаче \dot{Q} считается заданной величиной, а неизвестной, помимо T_{s1} и T_{s2} , является общее термическое сопротивление теплопередачи оболочки. Поэтому решения систем (1a, 1б, 1в) записываются в виде:

$$T_{s1} = T_c - \frac{q}{\alpha_1}, \quad T_{s2} = T_a + \frac{q}{\alpha_2}, \quad R^{(0)} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d - d_c}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{T_c - T_a}{q}, \quad (2a)$$

$$T_{s1} = T_c - \frac{q d}{\alpha_1 d_c}, \quad R^{(1)} = \frac{1}{\alpha_1 d_c} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d}{d_c} + \frac{1}{\alpha_2 d} = \frac{T_c - T_a}{q d}, \quad (2б)$$

$$T_{s1} = T_c - \frac{q d^2}{\alpha_1 d_c^2}, \quad R^{(2)} = \frac{1}{\alpha_1 d_c^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_c} - \frac{1}{d} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d^2} = \frac{T_c - T_a}{q d^2}, \quad (2в)$$

где $q = \dot{Q} / A$ – плотность потока тепла через внешнюю поверхность оболочки в окружающую среду; $R^{(n)}$ – общее термическое сопротивление теплопередачи плоской ($n = 0$), цилиндрической ($n = 1$) и шаровой ($n = 2$) оболочки (здесь используются теплотехнические определения общих сопротивлений теплопередачи плоской, цилиндрической и шаровой стенки, имеющие разные размерности [13]). Температура T_{s2} внешней поверхности оболочки одинакова для всех трех моделей и приведена только для плоского тела.

Формулы (2) показывают, что $T_{s1} < T_c$ и $T_{s2} > T_a$ соответственно. Поскольку в термонейтральной зоне $\dot{Q} = \text{const}$ и $T_c = \text{const}$, то в приближении $\alpha_2 = \text{const}$ для приращений получается, что $\Delta T_{s2} = \Delta T_a$, то есть при повышении (понижении) температуры окружающей среды температура кожи повышается (понижается) одинаковым с ней образом. В противном случае необходимо считать $\alpha_2 = \alpha_2(T_a)$. Аналогично из формулы (2а) для T_{s1} при $\alpha_1 = \text{const}$: в плоской модели $\Delta T_{s1} = 0$ – температура внутренней поверхности оболочки в термонейтральной зоне не изменяется; в цилиндрической и сферической моделях эта температура в (2б – 2в) будет изменяться, если переменным является размер ядра: $\Delta d_c \neq 0$. В предельном случае $\alpha_1 \gg 1$ для всех моделей $T_{s1} \approx T_c$.

Из выражений (2) для $R^{(n)}$ следует, что при повышении температуры окружающей среды в термонейтральной зоне общее термическое сопротивление теплопередачи оболочки уменьшается, так как $\Delta R^{(n)} \propto -\Delta T_a$. В физиологии зависимость $R^{(n)}(T_a)$ объясняется вазомоторными реакциями, которые управляют термическим сопротивлением теплопроводности оболочки за счет изменения, как считается, толщины оболочки при неизменной теплопроводности или теплопроводности при неизменной толщине оболочки. В любом случае, полагая, что $R_2^{(n)} \leq R^{(n)} \leq R_1^{(n)}$ (здесь $R_1^{(n)}$ и $R_2^{(n)}$ – общие термические сопротивления теплопередачи при ограничивающих термонейтральную зону нижней и верхней критических температурах T_1 и T_2 соответственно) из формул для $R^{(n)}$ получается оценка термонейтральной зоны в виде двойного неравенства $T_1 \leq T_a \leq T_2$, где критические температуры определяются формулами:

$$T_2 = T_c - q d^n R_2^{(n)}, \quad \Delta T = q d^n (R_1^{(n)} - R_2^{(n)}), \quad (3)$$

здесь $\Delta T = T_2 - T_1$ – ширина термонейтральной зоны; $n = 0; 1; 2$ – показатель степени d для плоской, цилиндрической и сферической модели соответственно.

Поскольку при повышении температуры окружающей среды общее термическое сопротивление теплопередачи оболочки монотонно уменьшается, то естественно полагать, что оно достигает минимального значения на верхней границе термонейтральной зоны, где ресурс уменьшения $R^{(n)}$ организмом оказывается уже исчерпанным и выше которой включаются дополнительные физиологические терморегуляторные механизмы. Из формул (2) видно, что минимально возможные значения $R^{(n)}$ реализуются при $d_c = d$, то есть при нулевой толщине оболочки. Тогда следует считать, что $R^{(n)}(d_c)$ на интервале $0 < d_c(T_a) \leq d$ при неизменной теплопроводности оболочки. С учетом выражений $R_2^{(n)} = R^{(n)}(d_c = d)$ и упрощающего допущения $\alpha_1 \gg 1$ формулы (3) представляются в виде:

$$T_2 = T_c - \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 A}, \quad \Delta T = \frac{\dot{Q} V}{\lambda A^2} (n+1) f^{(n)}(x). \quad (4)$$

Здесь $f^{(0)}(x) = 1 - x$; $f^{(1)}(x) = \ln x^{-1}$; $f^{(2)}(x) = (1-x)/x$ – для тела с плоской, цилиндрической и сферической формой соответственно; $x = d_{cl}/d$ – внешний безразмерный параметр теплофизической модели; d_{cl} – минимально возможный размер ядра, имеющий место при нижней критической температуре; $d = 2(n+1)V/A$ – размер плоского ($n=0$), цилиндрического ($n=1$) и сферического ($n=2$) тела, выраженный через его объем V и площадь A кожи.

Обсуждение результатов

Формулы (4) определяют аналитические зависимости термонеutralной зоны от характеристик T_c , \dot{Q} , V , A , λ , x организма, формы тела n , $f^{(n)}(x)$ и условий α_2 теплоотдачи тела в окружающую среду. Верификация этих зависимостей требует привлечения детальных опытных данных из физиологии различных гомойотермных организмов, поиск и анализ которых являются задачами отдельного исследования. Поэтому далее обсуждаются только некоторые качественные свойства термонеutralной зоны, представленные в формулах (4), и производится числовая оценка термонеutralной зоны человека.

Видно, что для данного организма верхняя критическая температура одинакова для всех моделей и увеличивается с ростом α_2 . Поэтому, например, T_2 для обнаженного человека больше, чем для легко одетого [14]. При этом ширина термонеutralной зоны от условий теплоотдачи тела в окружающую среду не зависит.

Для выяснения влияния характеристик организма на термонеutralную зону далее считается, что 1) при одинаковой средней плотности объем и масса тел организмов пропорциональны: $V \propto m$; 2) площадь поверхности кожи $A \propto V^{2/3}$ и, следовательно, $A \propto m^{2/3}$; 3) минимальная теплопродукция определяется законом Клейбера, согласно которому $\dot{Q} \propto m^{3/4}$ для всех видов млекопитающих – от мыши до слона [1].

Тогда для организмов с одинаковыми значениями T_c и α_2 из (4) следует, что при увеличении массы организма верхняя критическая температура будет уменьшаться в соответствии с формулой $T_c - T_2 \propto m^{1/12}$, а ширина термонеutralной зоны – увеличиваться как $\Delta T \propto m^{5/12}$. Таким образом, для «большого» теплокровного животного T_2 меньше, а ΔT больше, чем для «малого», что качественно согласовывается с общеизвестными экспериментальными данными физиологических наблюдений [1, 14–15].

При фиксированной массе тела изменение его формы в последовательности плоская – цилиндрическая – сферическая уменьшает площадь A поверхности кожи. Поэтому при такой «сфероидизации» формы тела T_2 будет уменьшаться, а ΔT – увеличиваться согласно (4).

Ширина термонеutralной зоны зависит от формы тела и с фиксированным отношением V/A , за что в соответствующей формуле (4) ответственен множитель $(n+1)f^{(n)}(x)$. Поскольку на интервале $0 < x \leq 1$ определения функций $f^{(n)}(x)$ выполняется соотношение $f^{(0)} \leq f^{(1)} \leq f^{(2)}$, то ширина термонеutralной зоны возрастает со «сфероидизацией» формы тела. Видно, что в плоской модели минимальный размер ядра при нижней критической температуре формально можно считать нулевым, тогда $\Delta T = \dot{Q}V/(\lambda A^2)$,

что является оценкой сверху (максимально возможной) ширины термонеutralной зоны в этой модели. Для цилиндрического и шарового тела при $x \rightarrow 0$ ширина термонеutralной зоны не ограничена, поскольку $f(0) = \infty$. Поэтому в рамках только теплофизического подхода, не учитывая физиологические ограничения на уменьшение размера ядра, за минимальный объем ядра в нулевом приближении берется объем V_b крови в теле организма. Тогда $x = (V_b/V)^{1/(n+1)}$ для плоской, цилиндрической и шаровой модели тела с объемом V соответственно.

Числовые оценки термонеutralной зоны проводятся для человека по данным, приведенным в [1]. Для человека массой 70 кг с теплопродукцией $\dot{Q} = 81$ Вт на уровне основного обмена, площадью поверхности кожи $A = 1.5$ м² и средней плотностью тела 1156 кг/м³ вычисляется объем $V = 0.06$ м³ тела. Полагается, что $T_c = 37$ °С; $\lambda = 0.96$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности кожи при нормальной температуре (32 °С – 35 °С). Тогда для $\alpha_2 = 5.5$ Вт/(м²·К) – коэффициента радиационной теплоотдачи в неподвижном воздухе, получается $T_2 \approx 27$ °С, что является оценкой снизу этой величины для раздетого человека, так как учет конвективного охлаждения приведет к увеличению α_2 и T_2 , согласно (4). Это числовое значение вполне приемлемо согласовывается с наблюдаемыми T_2 [1].

Для ширины термонеutralной зоны, полагая, что в теле человека объем $V_b = 5$ л крови, получается: $\Delta T \approx \{2.1; 5.7; 8.8\}$ °С в плоской, цилиндрической и шаровой модели формы тела соответственно. С точки зрения соответствия этих числовых оценок наблюдаемой ширине термонеutralной зоны [1] наиболее близкий количественный результат дает плоская модель тела.

“Работоспособность” оценки (4) ширины термонеutralной зоны человека подтверждается и следующим вычислением. Если зафиксировать для человека $\Delta T = 2$ °С во всех трех моделях форм тела, то, как следует из (4), соответствующий набор значений x дает, как представляется, вполне разумные значения минимального размера ядра, составляющие 12, 64, 78 % от размера плоского, цилиндрического и сферического тела.

Заклучение

Таким образом, теплофизический подход позволяет оценить термонеutralную зону гомойотермного организма с плоской, цилиндрической и сферической формой тела.

Неизменность теплопродукции, теплоотдачи и температуры ядра тела при увеличении (уменьшении) температуры окружающей среды в термонеutralной зоне осуществляется за счет уменьшения (увеличения) общего термического сопротивления теплопередачи оболочки путем изменения размера ядра (или толщины оболочки) независимо от формы тела.

Установленные аналитические зависимости нижней и верхней критических температур от характеристик теплокровного организма с плоской, цилиндрической и сферической формой тела и окружающей среды качественно согласовываются с экспериментально наблюдаемыми.

Дальнейшее развитие работы должно быть связано, прежде всего, с установлением адекватности проведенной аналитической оценки термонеutralной зоны путем сопоставления с опытными данными для различных гомойотермных организмов. Для перевода представленной оценки в ранг замкнутой модели термонеutralной зоны гомойотермного организма необходимо формализовать физиологически управляемое изменение размера ядра тела организма в зависимости от температуры окружающей среды.

Список литературы References

1. Herman I.P. 2007. *Physics of the Human Body*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 992.
2. *Human Physiology*. Ed. by Schmidt R.F. and Thews G. 1989. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 198.
3. Физиология человека: учебник. Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. 2011. М.: Медицина, 664.
Fiziologiya cheloveka: uchebник. Pod red. V.M. Pokrovskogo, G.F. Korot'ko. 2011. Moskva: Medicina, 664.
4. International Union of Physiological Sciences, Commission for Thermal Physiology. Glossary of terms for thermal physiology. *Japanese Journal of Physiology*. 2001. 51: 245–280.
5. Иванов К.П. 1990. Основы энергетики организма. Т.1. Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. Л.: Наука, 310.
Ivanov K.P. 1990. *Osnovy ehnergetiki organizma*. T.1. Obshchaya ehnergetika, teploobmen i termoregulyaciya. L.: Nauka, 310.
6. Huey R. B. et al. 2012. Predicting organismal vulnerability to climate warming: Roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367: 1665–1679.
7. Иванов К.П. 2006. Современные теоретические и практические проблемы терморегуляции. *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 92(5): 578–592.
Ivanov K.P. 2006. *Sovremennye teoreticheskie i prakticheskie problemy termoregulyacii*. Ros. fiziol. zhurn. im. I.M. Sechenova. 92(5): 578–592.
8. Лучаков Ю.И., Шабанов П.Д. 2013. Тепловой гомеостазис кролика в термoneйтральной зоне (математическое моделирование). *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 99(9): 1089–1096.
Luchakov Yu.I. Shabanov P.D. 2013. *Teplovoj gomeostazis krolika v termonejtral'noj zone (matematicheskoe modelirovanie)*. Ros. fiziol. zhurn. im. I.M. Sechenova. 99(9): 1089–1096.
9. Лучаков Ю.И. и др. 2014. Влияние соотношения размеров ядра и оболочки на тепловой гомеостазис некоторых животных. *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. – 1.
Luchakov YU.I. i dr. 2014. *Vliyanie sootnosheniya razmerov yadra i obolochki na teplovoj gomeostazis nekotoryh zhivotnyh*. Vestnik novyh medicinskih tekhnologij. Ehlektronnoe izdanie. – 1.
10. Mitchell D. et al. 2018. Revisiting concepts of thermal physiology: Predicting responses of mammals to climate change. *J Anim Ecol*. P. 1 – 18.
11. Иванов К.П. 2009. Энергетика внутренних органов (доля участия в общей энергетике различных внутренних органов). *Успехи физиол. наук*. 40(3): 54–67.
Ivanov K.P. 2009. *Energetika vnutrennih organov (dolya uchastiya v obshchej ehnergetike razlichnyh vnutrennih organov)*. Uspexhi fiziol. nauk. 40(3): 54–67.
12. Кутателадзе С.С. 1979. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 416.
Kutateladze S.S. 1979. *Osnovy teorii teploobmena*. Moskva: Atomizdat, 416.
13. Михеев М.А., Михеева И.М. 1977. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 344.
Miheev M.A., Miheev I.M. 1977. *Osnovy teploperedachi*. Moskva: Energiya, 344.
14. Kingma B., Frijns A., van Marken Lichtenbelt W. 2012. The thermoneutral zone: Implications for metabolic studies. *Frontiers in Bioscience*, 4, 1975–1985.
15. Morgan K. 1998. Thermoneutral zone and critical temperatures of horses. *J. of Thermal Biology*. 23(1): 59–61.