

ТЕПЛООБМЕН РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА СО СРЕДОЙ

УДК 612.01+536.2

© Ю. И. Лучаков¹, П. Д. Шабанов²¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург;² Научно-исследовательский институт экспериментальной медицины СЗО РАМН, Санкт-Петербург

Ключевые слова:

теплопродукция; теплоотдача; термперенос; терморегуляция; человек.

Резюме

Приведены литературные и расчетные данные оценки теплоотдачи и теплопродукции отдельных частей тела человека. Наблюдения за обменом тепла организма человека с окружающей средой были проведены на мужчинах весом 69–73 кг в термокамере. Доказано, что организм, не изменяя теплопродукции и величины теплоотдачи, только за счет изменения теплопереноса кровью способен изменять в определенных пределах температуру тканей туловища. Этот механизм хорошо объясняет феномен наличия субфебрильной температуры при различных заболеваниях организма человека.

В результате непрерывных энерготрат гомойотермного организма и обмена теплом с окружающей средой устанавливается определенная температура, как в глубинных тканях организма, так и на периферии. Если в ядре тела температура тканей и органов более или менее стабильна и у человека составляет величину 37,1–37,4 °С, то на поверхности кожи в различных её областях температура довольно разнообразна. Даже в термонеutralной зоне температура кожи в различных областях тела человека может изменяться до 6–8 °С и больше [1, 5, 10]. Надо сказать, что типичное для человека топографическое распределение температуры кожи можно наблюдать уже у новорожденных, хотя и величина температуры кожи у них несколько повышена по сравнению со взрослым человеком.

Температура на поверхности организма определяется как величиной внутренней теплопродукции органов и тканей, так и теплоотдачей во внешнюю среду, она зависит от многих параметров организма и среды. Тем не менее в условиях термонеutralной зоны устанавливается совершенно определенное соотношение величины температуры на поверхности тела человека. Исходя из величины поверхностной температуры той или иной части тела человека, возможно определить количество тепла, выделяемое этой частью тела. С другой стороны, величина теплопродукции отдельных тканей и органов изучена и известна [4, 15], значит количество тепла, отдаваемое в среду, должно соответствовать теплопродукции этих частей тела.

Нашей задачей было на основе экспериментальных и модельных методов установить соответствие количества тепла, которое должно уходить из различных областей тела человека на основании теплопродукции тканей этих областей организма, с количеством тепла, которое реально уходит с поверхности этих областей за счет градиента температуры между поверхностью их и окружающей среды.

МЕТОДИКА

Наблюдения за обменом тепла организма человека с окружающей средой были проведены на мужчинах весом 69–73 кг в термокамере. Обеспечение камеры холодильным и нагревательным элементами позволяла устанавливать температуру на определенном уровне. Измеряли температуру тела на поверхности лба, груди, бедра, голени, стопы, плеча, предплечья, кисти, а также и ректальную температуру. Для измерения температуры в камере использовали как обычный ртутный термометр, с помощью которого возможно измерять перепад температуры воздуха с точностью до 0,1 °С, так и градуальный, который позволял включать нагреватель или холодильник для поддержания определенной заданной температуры. Измерения температуры на поверхности тела человека производили с помощью термопар.

Для выяснения особенностей теплообмена человека со средой в термонеutralной зоне была разработана тепловая модель организма человека в покое. В модели тело человека аппроксимировано в виде 14 цилиндров [6] — это голова, туловище, бедра, голени, стопы, плечи, предплечья, кисти (рис. 1). Каждая часть тела, аппроксимированная цилиндром, с точки зрения теплообмена соответствует по физическим и физиологическим параметрам реальной части организма человека. Так, в соответствии с данными [12, 14], тепловая модель головы человека представляет собой цилиндр радиусом 8,5 см и длиной 25 см, что соответствует массе равной 5,67 кг и площади поверхности 1334,5 см². Теплопродукция тканей головы человека, исходя из тех же литературных источников, составляет 14,6 Вт.

Тепловая модель туловища человека представляет собой цилиндр радиусом 12,9 см и длиной 70 см, что соответствует массе туловища 36,5 кг и площади поверхности 5670,8 см². Теплопродукция цилиндра туловища, исходя из тех же источников, составляет

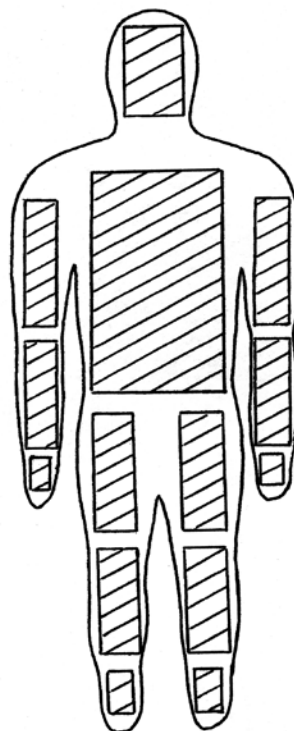
57,74 Вт. Для бедра и голени выбраны цилиндры радиусом по 5,6 см и длиной по 40 см каждый, что соответствует массе бедра и голени по 4 кг и площади поверхности, с которой происходит теплоотдача в среду, равной 1406,7 см². Теплопродукция тканей в каждом из цилиндров составляет 1,55 Вт [12, 14]. Параметры стопы-цилиндра выбраны следующим образом — радиус 4,9 см, длина 25 см, что соответствует массе 1,9 кг и площади поверхности теплоотдачи 769,3 см². Плечи и предплечья в модели тоже заданы в виде цилиндров, которые имеют радиус по 4,7 см, а длину — 20 см, что определяет вес каждого цилиндра по 1,4 кг и площади поверхности каждого из них равной 590,3 см². Теплопродукция каждого из них в соответствии с теми же литературными источниками, составляет по 0,54 Вт. Кисть-цилиндр в модели имеет радиус 4,6 см, а длину — 15 см, что задает массу ее равной 1 кг, а площадь поверхности теплоотдачи — 433 см². Величина теплопродукции равна 0,38 Вт [3, 12].

Таким образом, масса всей тепловой модели организма человека будет равняться приблизительно 70 кг, площадь всей поверхности, с которой происходит теплоотдача в среду, составит ~1,8 м², а теплопродукция — 72,34 Вт. Данные всех физических и физиологических параметров по каждому цилиндру части тела человека приведены в таблице 1.

Однако, как следует из экспериментальных данных, теплообмен организма со средой осуществляется не только за счет кондукции, а еще с дыханием и путем испарения пота (в норме — это регулируемая перспирация).

Согласно многочисленным данным, в норме можно считать, что с дыханием и потом в целом уходит 15–20% тепла от всего количества вырабатываемого всем организмом [7, 13].

Исходя из этих представлений, из каждой части тела должно уйти через кожу в среду путем кондукции на 15–20% меньше тепла, чем метаболически



■ Рисунок 1. Аппроксимация тела человека в виде 14 цилиндров [6]

выделяется тканями каждой части тела. По нашим расчетам, величина кондуктивно удаляемого тепла с каждой части тела человека будет соответствовать величинам, приведенным в таблице 1 (столбец 7).

Теплообмен между отдельными частями тела организма и средой определяется хорошо известным законом Ньютона

$$Q = \alpha \times S \times (T_k - T_{cp}),$$

где α — коэффициент теплоотдачи; S — площадь поверхности; T_k и T_{cp} — температуры кожи элемента тела и среды, соответственно; Q — теплоотдача от элемента тела человека.

■ Таблица 1. Расчетные данные всех физических и физиологических параметров по каждому цилиндру части тела человека

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8
	H, см	R ₂ , см	S, см ²	P, кг	Q _p , Вт	Q*, Вт	Q _p , Вт	Q*–Q _p , Вт
Голова	25	8,5	1334,5	5,67	14,6	12,41	6,07	–6,34
Туловище	70	12,9	5670,8	36,5	57,74	49,1	27,4	–21,7
Бедро	40	5,6	1406,7	4,0	1,55	1,32	5,41	+4,09
Голень	40	5,6	1406,7	4,0	1,55	1,32	5,41	+4,09
Стопа	25	4,9	769,3	1,9	0,73	0,62	2,21	+1,59
Плечо	20	4,7	590,3	1,4	0,54	0,46	2,3	+1,84
Предплечье	20	4,7	590,3	1,4	0,54	0,46	2,3	+1,84
Кисть	1,5	4,6	433,0	1,0	0,38	0,32	1,27	+0,95
Сумма	180	–	1,8	70,0	82,92	70,5	71,27	–

Значения H, R₂, S, P, Q_p, — длина, внешний радиус, площадь, вес, теплопродукция тканей соответственно; Q* = 0,85 × Q_p × Q_p — количество тепла, которое должно вырабатывать соответствующая часть тела, чтобы температура кожи соответствовала экспериментальным данным

В стационарном состоянии, сколько тепла вырабатывается в каждой части тела, столько должно и уходить. Поэтому, применяя эту формулу, можно получить величину теплопродукции каждой части тела, исходя только из знания его поверхности, температуры кожи и температуры среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным ряда авторов [2, 16], оптимальная температура в термонеutralной зоне для среднего человека равна 27 °С, поэтому для получения остальных параметров в тепловой модели мы исходили именно из этого значения оптимальной температуры среды. Множество измерений температуры поверхности тела человека в термонеutralной зоне, приводимые в литературе [1, 5, 8, 10] и полученные нами, показывают, что температурное распределение по различным частям тела имеет вполне определенный характер. Исходя из наших экспериментальных данных, температура на поверхности различных частей тела человека при температуре среды 27 °С устанавливается в виде следующих величин: на голове — 33,5 °С, на туловище — 33,9 °С, на бедре — 32,5 °С, на голени — 32,4 °С, на ступне — 31,1 °С, на плече — 32,6 °С, на предплечье — 32,6 °С, на кисти — 31,2 °С.

Полученные данные позволяют использовать формулу (1) для оценки теплоотдачи и, значит, теплопродукции отдельных частей тела человека. Расчет величин теплопродукции для каждой части тела организма человека приведен в таблице 1 (столбец 7). В тоже время теплопродукция отдельных частей тела, оцененная, исходя из производства тепла единицы массы, по литературным данным [4, 14, 15], должна составлять величины, приводимые в таблице 1 (столбец 6).

Сравнивая данные столбцов 6 и 7 таблицы 1, видим полное несовпадение. Так, для того, чтобы поверхность головы при температуре среды 27 °С составляла 33,5 °С, необходимо, чтобы через кожу головы уходило только 6,07 Вт, а не 12,41 Вт (столбец 6, табл. 1), а для туловища для поддержания температуры кожи на уровне 33,9 °С необходимо, чтобы через поверхность туловища-цилиндра уходило только 27,4, а не 49,1 Вт. Более того, по нашим данным, если бы все вырабатываемое метаболическое тепло в тканях головы, равное 12,41 Вт, а в тканях туловища, равное 49,1 Вт, у человека уходило во внешнюю среду через кожу путем кондукции за счет градиента температуры между температурой кожи и окружающей средой при 27 °С, то температура кожи головы и туловища должна была бы, по нашим расчетам, составлять 40 °С. Совершенно обратная ситуация наблюдается при сравнении теплоотдачи и теплопродукции тканей конечностей. Так, для поддержания температуры кожи в бедре

равном 32,5 °С при оптимальной температуре среды 27 °С необходимо, чтобы в тканях бедра выделялось 5,41 Вт и все это тепло уходило через кожу бедра. По данным литературы, в тканях бедра вырабатывается в норме только 1,32 Вт. Если в бедре через кожу будет выделяться только тепло равное 1,32 Вт, то, как показывают расчеты, температура кожи бедра составит всего 28,34 °С.

Таким образом, в тканях головы и туловища даже при оптимальной температуре среды вырабатывается больше метаболического тепла, чем его выделяется через кожу кондуктивным путем в окружающую среду, а в конечностях меньше вырабатывается метаболического тепла, по сравнению с реальным количеством его, которое выделяется через кожу в окружающую среду. Естественно, что «лишнее» тепло, которое вырабатывается в тканях головы и туловища, уходит в конечности путем конвективного теплопереноса с током крови. Действительно, как показывают расчеты, из тканей головы и туловища должно уходить конвективным путем с током крови в конечности количество тепла равное $6,34 + 21,7 = 28,4$ Вт. Наоборот, в ткани конечностей с кровотоком должно поступать, по нашим расчетам, количество тепла равное $2 \times (4,09 + 4,09 + 1,59 + 1,84 + 1,84 + 0,95) = 28,8$ Вт, что соответствует данным столбцов 7 и 5 таблицы 1. Как следует из сравнения этих цифр, сколько тепла должно уйти с метаболически активных частей тела (головы и туловища) за счет конвективного теплопереноса с током крови, столько тепла должно поступить в ткани конечностей тоже с током крови.

Полученные данные позволяют оценить теплоперенос кровью внутри организма. Как следует из выше приведенных данных, даже при оптимальной температуре среды организма человека равной 27 °С, для того, чтобы температура тканей головы и туловища не поднималась очень высоко, с помощью кровотока около половины метаболического тепла, производимого в них, переносится в конечности, откуда это тепло уже элиминируется во внешнюю среду. Причем, если все тепло, вырабатываемое головой и телом, будет с помощью конвекции уходить во внешнюю среду, то температура поверхности этих частей организма по расчетам будет составлять 40 и более градусов, а температура конечностей будет отличаться от температуры среды всего на 1,2–1,5 °С. По нашим данным, используя теплоперенос с помощью крови, организм в определенных пределах способен изменять температуру головы и туловища. Этот механизм способен объяснить, каким образом в организме возможно увеличение температуры тела (так называемая субфебрильная температура) без изменения теплопродукции, что отмечают ряд исследователей [9]. Как показывают расчеты, если из туловища в окружающую среду будет элиминироваться не 21,7 Вт, как это в норме осуществляется, а на 10 Вт больше, то температура кожи у туловища возрастет на 1 градус. При этом в конечности

с кровью не поступят те же 10 Вт тепла, что приведет к тому, что приблизительно на 1 градус снизится температура кожи в них. В этом случае с ростом температуры кожи туловища и внутренняя температура должна вырасти, как экспериментально показали исследования [11]. Таким образом, организм, не изменяя теплопродукции и величины теплоотдачи, только за счет изменения теплопереноса кровью способен изменять в определенных пределах температуру тканей туловища. Этот механизм хорошо объясняет феномен наличия субфебрильной температуры при различных заболеваниях организма человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басакин В. И. Возрастные особенности физической терморегуляции // Физиол. человека. — 1981. — Т. 7, № 5. — С. 940–942.
2. Владимирова И. П., Зотин А. И. Кривые терморегуляции и определяющие их факторы // Успехи физиол. наук. — 1989. — Т. 20, № 3. — С. 21–42.
3. Ермакова И. И. Математическое моделирование процессов терморегуляции у человека // Итоги науки и техники. Сер. Физиология человека и животных. — 1987. — 133 с.
4. Иванов К. П. Энергетика внутренних органов (доля участия в общей энергетике различных внутренних органов) // Успехи физиол. наук. — 2009. — Т. 40, № 1. — С. 54–67.
5. Лакота Н. Г., Ларина И. М. Изучение температурного гомеостаза в реальной и моделируемой невесомости // Физиол. человека. — 2002. — Т. 28, № 3. — С. 82–92.
6. Лучаков Ю. И., Камышев Н. Г., Шабанов П. Д. Перенос тепла кровью: сопоставление расчетных и экспериментальных данных // Обзоры по клин. фармакологии и лек. терапии. — 2009. — Т. 7, № 4. — С. 3–24.
7. Начала физиологии/Под ред. А. Д. Ноздрачева. — СПб.: Лань, 2002. — 1088 с.
8. Обухова А. А., Батурина Т. Д. Температурные градиенты верхних и нижних конечностей у здоровых лиц по результатам радиометрических исследований // Физиол. человека. — 1995. — Т. 21, № 6. — С. 157–159.
9. Семененя И. Н., Гурин В. Н. Теоретические и клинические аспекты проблемы субфебрилитета // Физиол. человека. — 1995. — Т. 21, № 6. — С. 127–136.
10. Слоним А. Д. Животная теплота и ее регуляция в организме млекопитающих. М.: изд-во АН СССР, 1952.
11. Солонин Ю. Г., Кацюба Е. А. Терморегуляция и кровообращение у лиц зрелого возраста при кратковременных экстремальных температурных воздействиях // Физиол. человека. — 2003. — Т. 29, № 2. — С. 67–74.
12. Справочник по космической биологии и медицине. — М., 1983. — 350 с.
13. Уэбб П. Тепловые проблемы подводных погружений. Медицинские проблемы подводных погружений. — М., 1988. — С. 321–359.
14. Человек: медико-биологические данные. — М., 1977. — 495 с.
15. Berne R. M., Levey M. N. Physiology of cardiovascular system // Clin. Fund. Physiol. — 2004. — Sect. 7, N 1. — P. 513–701.
16. Ferevik H., Markussen D., Oglend G. E., Reintertsen J. The thermoneutral zone when wearing aircrew protective clothing // J. Therm. Biol. — 2001. — Vol. 26. — P. 419–429.

THERMOEXCHANGE OF DIFFERENT REGIONS OF THE HUMAN BODY WITH ENVIRONMENT

Luchakov Yu. I., Shabanov P. D.

◆ **Summary:** The literature and proper data concerning evaluation of thermoproduction and thermoutput of different regions of the human body are analyzed in the article. The human thermoexchange with environment was assessed in human beings weighing 69–73 kg in special thermocamera. The organism was shown to change temperature of the body tissues in definite limits only by means of thermotransfer without changing thermoproduction and thermoutput. This mechanism can explain the phenomenon of subfebrile temperature in various human diseases.

◆ **Key words:** thermoproduction; thermoutput; thermotransfer; thermoregulation; human.

◆ Информация об авторах

Лучаков Юрий Иванович — д. б. н., старший научный сотрудник. Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН. 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6. E-mail: yluchakov@yandex.ru

Шабанов Петр Дмитриевич — д. м. н., заведующий отделом нейрофармакологии им. С. В. Аничкова Института Экспериментальной медицины СЗО ОРАМН. 197376, Санкт-Петербург, ул. Акад. Павлова, д. 12. E-mail: pdshabanov@mail.ru.

Luchakov Yuriy Ivanovich — Dr. Biol. Sci. (Physiology), Senior Researcher, I.P.Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences. 199034, St.-Petersburg, Makarov nab., 6. E-mail: yluchakov@yandex.ru

Shabanov Petr Dmitriyevich — Dr. Med. Sci. (Pharmacology), Professor, Head, Dept. of Neuropharmacology, Research Institute of Experimental Medicine, North-West Branch of RAMS. 197376, St.-Petersburg, Acad. Pavlov St., 12. E-mail: pdshabanov@mail.ru.