

КОНВЕКТИВНЫЙ И КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС
В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ОРГАНИЗМА

Ю.И. ЛУЧАКОВ, Н.К. АРОКИНА, А.А. НЕСМЕЯНОВ

Институт физиологии им.И.П. Павлова, наб. Макарова, д. 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Аннотация. В работе исследован процесс переноса тепла в организме человека. Используя экспериментальные и математические методы, доказано, что в тканях теплового ядра организма осуществляется в основном конвективный механизм теплопереноса (за счет тока крови). В тканях тепловой оболочки, наоборот, существует в основном кондуктивный перенос тепла (за счет градиента температуры). Только при этих условиях температура в ядре сохраняется достаточно высокой и равномерной, а оболочка низкой и изменяющейся, как это показано в экспериментах (при нормальных условиях и без нагрузки). Изменения размеров ядра и оболочки могут являться механизмом для поддержания теплового гомеостаза в нормальных условиях.

Ключевые слова: температура, математическая модель, теплое ядро и оболочка организма, конвективный и кондуктивный теплоперенос в организме.

CONVECTIVE AND CONDENSIVE HEAT TRANSFER IN VARIOUS AREAS OF ORGANISM

Yu.I. LUCHAKOV, N.K. AROKINA, A.A. NESMEYANOV

Institute of Physiology named after I.P. Pavlov, Makarov sq., 6, St. Petersburg, 199034, Russia

Abstract. The process of heat transfer in the human body has been studied. Using experimental and mathematical methods, it is proved that the convective mechanism of heat transfer (due to the blood flow) is realized in the tissues of the thermal core of the organism. In the tissues of the thermal envelope, on the contrary, there is basically conductive heat transfer (due to the temperature gradient). Only under these conditions, the temperature in the core remains fairly high and uniform, and the shell is low and changing, as shown in experiments (under normal conditions and without load). Changes in the size of the core and shell can be a mechanism for maintaining thermal homeostasis under the normal conditions.

Key words: temperature, mathematical model, heat kernel and shell body, convective and conductive heat transfer in the tissues of the body.

Температура всего организма определяется несколькими процессами, и прежде всего величиной теплопродукции органов и тканей и величиной теплоотдачи. Однако, на температуру в различных областях тканей влияют не только величины теплопродукции и теплоотдачи, но и процессы переноса тепла внутри организма. В соответствии с физическими представлениями перенос тепла в организме происходит только за счет двух механизмов – это процесс конвекции (с током крови) или за счет процесса кондукции (из-за градиента температуры между двумя точками в ткани). Конечно, при определенных условиях теплоперенос в тканях организма может осуществляться и совместным действием этих механизмов. Эти механизмы переноса тепла, как следует из их определения, осуществляются по своим независимым законам. Однако довольно часто кондуктивный теплоперенос в тканях физиологии определяют в зависимости от величины кровотока в тканях. Так, в [3] задается коэффициент теплопроводности невазуляризованной кожи равный 0.209 Вт/м К, а при сильном кровотоке в 7 раз больший. Однако, величина теплопроводности мягких тканей (за исключением жировой) приблизительно одинаковая, из-за того, что они на 80 процентов состоят из воды. Кровь тоже в основном состоит из воды. Поэтому вне зависимости от наполнения ткани кровью физическая величина теплопереноса не может измениться. Сам механизм кондуктивного переноса тепла есть чисто физический процесс, и зависит только от свойств вещества, через которое осуществляется теплоперенос. Коэффициент интенсивности кондуктивного теплопереноса определяется коэффициентом теплопроводности, величина которого на основании теоретических и опытных данных для различных жидкостей представляет собой следующую формулу [6]:

$$\lambda = A \cdot (C_p \cdot \rho^{4/3}) / \mu^{1/3}$$

где C_p – теплоемкость жидкости при постоянном давлении; ρ – плотность жидкости; μ – молекулярная масса жидкости. Коэффициент A , пропорциональный скорости распространения упругих волн в жидкости, не зависит от природы жидкости, но зависит от температуры её. Как следует из выше приведенной формулы, интенсивность переноса тепла определяется только свойствами среды в которой осуществля-

ется теплоперенос и величиной температуры. В связи с тем, что в тканях организма изменение температуры крайне незначительны коэффициент A представляет, конечно, постоянную величину.

Таким образом, кондуктивный механизм переноса тепла осуществляется исключительно за счет физических параметров тканей организма. Приводимый выше в справочнике коэффициент теплопроводности в ткани кожи, зависящий от её наполнения кровью, по нашему мнению отражает не только кондуктивный теплоперенос, но и конвективный перенос тепла, за счет тока крови. При совместном действии этих механизмов переноса, чем больше перенос тепла осуществляется конвективным механизмом, тем больше будет и коэффициент теплопроводности.

Сам кондуктивный процесс переноса тепла в тканях может иметь место только при наличии градиента температуры в различных областях организма обусловленный, например различной интенсивностью теплопродукции различных органов. Важно отметить, что на кондуктивный теплоперенос в тканях сам организм никак активно влиять или регулировать не может. Как и в случае диффузии кислорода в тканях организма, процесс кондуктивного распространения тепла в организме осуществляется исключительно пассивно.

Совсем другие свойства имеет конвективный теплоперенос, перенос тепла за счет тока крови. Кровь, протекая по различным сосудам, обменивается теплом с окружающей тканью. В активно работающих органах (табл.), где производится много тепла, в связи с активными метаболическими процессами, кровь, протекающая в этих органах, нагревается и переносит тепло в другие ткани, где происходят менее интенсивные метаболические процессы (в периферийные области), и соответственно они имеют более низкую температуру. В результате градиента температуры между «теплой» кровью и окружающей «холодной» периферийной тканью происходит обмен теплом. Сам процесс движения крови по сосудистому руслу в тканях управляется организмом, поэтому конвективный теплоперенос является физиологически регулируемым процессом.

Таблица

Средний вес различных органов и частей тела и среднее потребление ими энергии у человека весом 65 кг [7, 22, 23]

Орган	Вес органов		Продукция тепла	
	кг	% от Веса тела	Ккал/час	% от общей теплопродукции
Почки	0.29	0.45	6.0	7.7
Сердце	0.29	0.45	8.4	10.70
Легкие	0.60	0.90	3.4	4.40
Мозг	1.35	2.00	12.5	16.0
Печень	1.5	2.28	15.78	20.23
Желудочно-кишечный тракт	1.0	1.52	10.48	13.43
Кожа	5.0	7.80	1.5	1.9
Мышцы	27.0	41.50	12.2	15.7
Другие органы	27.97	43.00	7.8	10.00
Всего	65	100	78.0	100

Большое биологическое значение имеет скорость распространения тепла в тканях. При медленном теплопереносе регуляция температуры в тканях организма затруднена в связи динамическим поведением животных и человека, приводящего к нахождению в среде с различной температурой. При быстром переносе тепла в тканях организма сложно установить достаточно высокую температуру в организме. Только сложное взаимодействие быстрой и медленной скорости теплопереноса позволяет организму поддерживать достаточно высокую температуру тканей организма. Поэтому важно оценить скорость распространения тепла, во-первых, с помощью кондуктивного механизма, а во вторых – с помощью конвективного.

Наши исследования показывают эффективность кондуктивного распространения тепла только на микрорасстоянии в тканях. Так, температура на расстояние 8-15 мкм от нагретой стенки стержня с температурой 37°C повышается уже через 20 сек. Через 1 мин температура на этом расстоянии увеличивается до 30°C. Поэтому перенос тепла с помощью кондуктивного механизма эффективен на небольшом расстоянии. Например, в случае обмена теплом между кровью в капиллярах и рядом расположенных нервных клеток. Как показывают экспериментальные исследования, капилляры в головном мозгу очень близко залегают от нервных клеток. Расстояние от тела нервной клетки и рядом расположенными капиллярами составляет 10 мкм или немного больше. Конечно, такое топологическое расположение нервных клеток и капилляров необходимо, прежде всего, для обеспечения их кислородом, который тоже пас-

сивно диффундирует из протекающей крови. Процесс диффузии кислорода в тканях тоже эффективен только на микрорасстояниях. Однако и обмен теплом между интенсивно работающими нервными клетками и кровью крайне важен из-за теплового режима в самой нервной клетке. Интенсивность теплопродукции одного нейрона крайне высока и поэтому отвод тепла от тела нейронов должен быть быстрым и эффективным. Именно близкое расстояние капилляров от клетки позволяет не перегреться этим клеткам, так как только на малом расстоянии эффективен механизм теплопереноса от клетки в кровь, близ залегающего капилляра. Однако если брать весь организм теплокровных животных и человека, размеры которых уже измеряются не микрометрами, а сантиметрами, а у больших животных десятками и сотнями сантиметров, теплоперенос кондуктивным образом крайне не эффективен. Так, по нашим расчетам, при кондуктивном механизме теплопереноса тепла на расстоянии только несколько сантиметров занимает более часа. Для больших животных и человека, вес которых превышает 70 кг (как у человека) и больших, перенос тепла от центра до кожи с помощью кондуктивного теплопереноса может достигать несколько часов.

Совсем другая ситуация возникает, если перенос тепла в организме теплокровных осуществляется конвективным образом, за счет тока крови. При конвективном теплопереносе, даже считая, что кровь от центра к периферии на расстоянии 12 см (размер который характерен для туловища человека) переносит тепло только по капиллярам со средней скоростью 1000 мкм/сек, время теплопереноса составит не более нескольких минут. От того какой механизм переноса тепла будет реализовываться – будет различное распределение температуры в тканях организма.

Для выяснения действия того или иного механизма теплопереноса в организме надо обратиться к реальному экспериментальному распределению температуры в тканях организма. Распределение температуры в организме человека при нормальных физиологических условиях (в термонеutralной зоне и без нагрузки) можно представить, как показано на рис. 1. Из-за сложной геометрической формы тела человека распределение температуры в пространстве представляет собой сложную трехмерную фигуру. Внутри туловища, головы и конечностей температура тканей достаточно высокая. Величина температуры внутренних тканей составляет около тридцати семи градусов. На периферии организма температура в некоторых тканях на 8-9 градусов меньше. Причем можно фиксировать градиент температуры как по радиусу, от центра тела к поверхности, так и по оси тела. В нормальных физиологических условиях температура на поверхности стопы составляет 28-30°C, в то время как температура кожи на спине или груди обычно составляет величину 33-35°C. Кроме того, периферийные ткани способны испытывать довольно большие перепады температуры (20-25°C) без вреда для собственного метаболизма.

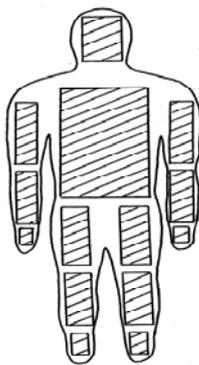


Рис. 1. Схематическое распределение температуры в различных областях тела человека

Совсем другие величины температур наблюдаются в центральных областях организма, и прежде всего во внутренних органах. Несмотря на большую разницу в интенсивности теплопродукции различных органов, в их размерах (табл. 1), изменение температуры тканей в них не испытывает значительных колебаний. Изменение температуры внутренних областей организма при нормальных физиологических условиях (в термонеutralной зоне, без нагрузок) обычно не превышает одного градуса [4, 7]. Это положение важно с точки зрения биохимии т.к. многие ферменты внутренних тканей теплокровных животных и человека оптимально могут выполнять свои функции только в довольно узком диапазоне температур [1, 19, 21]. В связи с этими представлениями о температурном состоянии тканей организма можно выделить в организме «теплые» и «холодные» ткани. Действительно, И.П. Павлов еще в 1893 году выделял внутреннюю область тела, где поддерживается высокая температура тела, и внешнюю, где температура

может изменяться довольно в широком диапазоне температур. В настоящее время в терморегуляции гомойотермных животных и человека выделяют внутреннюю часть организма, так называемое ядро (где температура тканей поддерживается почти на постоянном уровне), и внешнюю часть организма, так называемую оболочку (где температура тканей может значительно изменяться).

В норме в понятие «ядра организма» включаются внутренние органы, мозг, частично мышцы, а в понятие «оболочка организма» включают кожу, подкожную жировую клетчатку и частично мышцы [2, 10]. Однако, ядро и оболочка организма в принципе функциональные понятия, а не морфологические. Величина ядра и оболочки могут изменяться в процессе терморегуляционных реакций организма в ответ на изменение температуры среды или на изменение интенсивности метаболизма. По нашему мнению такое разделение тканей по тепловому признаку (на ядро и оболочку) обусловлено своеобразием механизмов теплопереноса, которые включают в себя, во-первых, конвективный путь, вместе с током крови, во вторых, кондуктивный путь, за счет градиента температуры между двумя точками в тканях. Важным моментом в установлении определенного температурного распределения в тканях организма является то, какой процесс теплопереноса превалирует в той или иной области тела.

В соответствии с физическими представлениями перенос тепла в организме происходит за счет процесса конвекции (с током крови) или за счет процесса кондукции (из-за градиента температуры между двух точек в ткани) или за счет совместного действия этих механизмов. Отделить действие переноса тепла конвективным образом или кондуктивным в организме экспериментально невозможно. В этом случае, как и в физике, приходят на помощь математические исследования. К настоящему времени уже давно применяют математические исследования в физиологии, которые не просто обобщают физиологические данные, полученные экспериментальным образом, а используют их как методы исследования физиологических процессов в организме.

Для выяснения механизма теплопереноса в организме была использована модель человека в виде цилиндра. Как показывают многочисленные исследования [14, 15, 20, 24-28] представление тепловой модели гомойотермного организма в виде цилиндра в целом вполне адекватно имитирует теплообмен реального организма со средой. В модели выделен внутренний цилиндр, имитирующий внутренние ткани организма (ядро организма), и внешний цилиндр, имитирующий оболочку организма (рис. 2, А). Во внутренних областях организма человека в покое температура тканей достаточно высокая и составляет 37.3°C , поэтому и температура внутреннего цилиндра считаем равной 37.3°C . При этом, как в реальном организме, где температура внутренних тканей фактически неизменна, так и по всем областям внутреннего цилиндра считаем температуру фактически неизменной. В периферийных областях организма температура падает по направлению от ядра к коже. Соответственно и в модели уменьшаться температура от внутреннего цилиндра к поверхности внешнего цилиндра, имитируя распределение температуры на периферии в реальном организме (рис. 2, Б). Такое распределение температуры по различным областям организма наиболее характерно при нормальных физиологических условиях (в термонеutralной зоне и без нагрузки). Как следует из рисунка, внутренним областям организма человека соответствует внутренний цилиндр, а периферийным областям – внешний цилиндр. Во внутреннем цилиндре температура тканей считается постоянной, а на периферии температура снижается от внутреннего цилиндра к поверхности внешнего цилиндра. В нашем случае тепловая модель человека представляла собой цилиндр с теплопродукцией 90 Вт [9, 16]. Считаем, что с актом дыхания и неощутимой перспирации в среду уходит 20% тепла, а остальное тепло, вырабатываемое всем организмом, уходит в среду через кожу за счет градиента температуры между кожей и окружающей средой. Радиус цилиндра 12 см, длина 155 см, поэтому вес цилиндра оптимальный составляет 70.8 кг. Тепловая модель цилиндр-человек помещена в воздушную среду с температурой равной 27°C , которая характерна для термонеutralной зоны человека. Распределение тепла в самом цилиндре, имитирующем организм человека, при этих условиях будет определяться способом распространения тепла.

Для выяснения процесса переноса тепла в тканях организма на математической модели задавались различные способы переноса тепла во всем организме. В результате действия того или иного механизма теплопереноса в модели устанавливалось определенное распределение температуры по тканям. Полученная кривая распределения температуры в модели, сравнивалась с исходным распределением температуры по тканям организма, которое представлено на рис. 2,Б. При совпадении поведения кривой распределения температуры в модели (которое устанавливалось в результате заданного механизма теплопереноса) и исходного распределения температуры по тканям, можно утверждать, что исходное распределение температуры в тканях организма определяется процессом переноса, которое задавалось в модели.

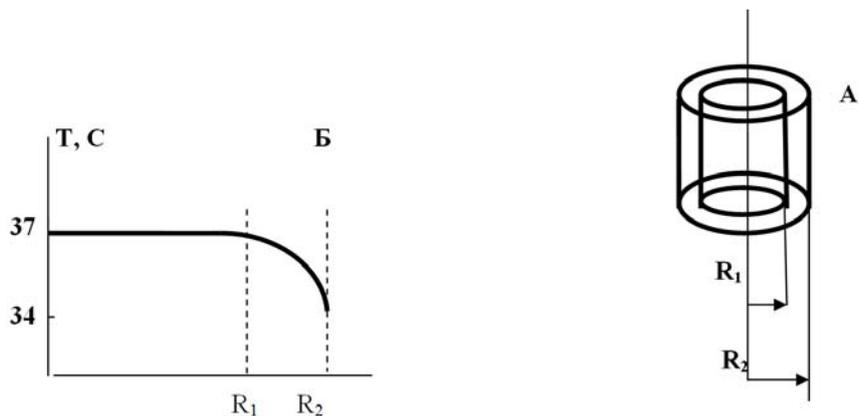


Рис. 2. Схематическое изображение цилиндра – человека (А);
 экспериментальное распределение температуры по тканям цилиндра – человека (Б).

Первоначально считали, что тепло в организме распространяется только кондуктивно за счет градиента температуры между различными точками в тканях организма. В этом случае процесс теплопереноса в тканях цилиндр-человек становится аналогичным процессу теплопереноса в однородном цилиндрическом стержне при наличии распределенного источника тепла, а математическое описание этого процесса в соответствии с данными [6]) будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\lambda \cdot \left(\frac{d^2 T}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{dT}{dR} \right) + q = 0 \quad (1)$$

$$\left. \frac{dT}{dR} \right|_{R=0} = 0, \quad -\lambda \cdot \left. \frac{dT}{dR} \right|_{R=R_u} = \alpha \cdot (T - T_{cp})$$

$$0 \leq R \leq R_u$$

где T – текущая температура в тканях цилиндра; R_u – радиус цилиндра; λ – коэффициент теплопроводности в тканях (при кондуктивном процессе теплопереноса $\lambda = \lambda_{т} = 0.6$ Вт/м·К [3]); α – коэффициент теплоотдачи в среду; q – мощность теплопродукции единицы объема ткани; T_{cp} – температура среды.

Решение этой системы дифференциальных уравнений можно представить в виде следующей формулы в соответствии с данными [6]

$$T = \frac{q}{4 \cdot \lambda} \cdot (R_u^2 - R^2) + \frac{q}{2 \cdot \alpha} \cdot R_u + T_{cp} \quad (2)$$

Линия, описывающая распределение температуры в туловище-цилиндре, исходя из этой формулы, представлена, кривой 2 (рис. 3). Как видно из рисунка, при наличии только кондуктивного механизма теплопереноса температурное распределение в организме имеет форму колокола, где в центре существует максимальная температура тела. Исходя из рисунка, даже в термонейтральной зоне при наличии только кондуктивного механизма теплопереноса температура в центре составляет $\sim 41^\circ\text{C}$, а в теле даже во внутренних областях существует резкий перепад температур. Такое распределение температуры не совпадает с распределением температуры на рис.3,1, которое соответствует экспериментальным данным. Конечно, такое представление о механизме теплопереноса в организме физиологически не оправдано. В теле человека при нормальных физиологических условиях и температуре окружающего воздуха 27°C не может быть столь высокой температуры тканей ядра, а внутри тела нет столь резких перепадов температур.

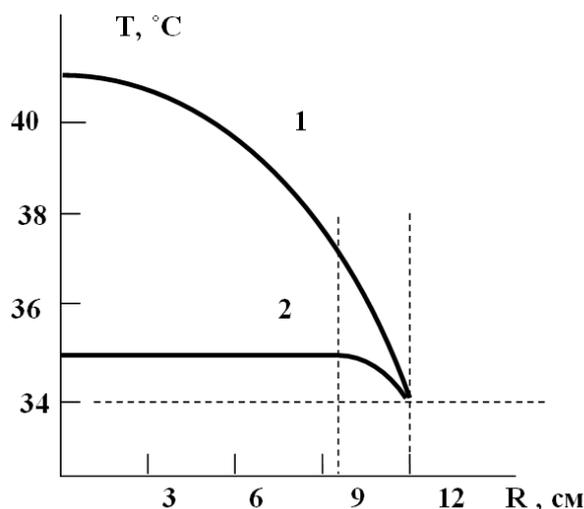


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу цилиндр-человек при кондуктивном процессе теплопереноса (1) ; распределение температуры по радиусу цилиндру только при конвективном процессе теплопереноса (2)

В противоположном варианте предполагаем наличие только конвективного теплопереноса во всем организме от центра до внешнего края кожи. В этом случае, как ранее было показано, распространение тепла в теле будет во много раз быстрее, что в модели можно учесть путем увеличения коэффициента теплопроводности в тканях ($\lambda=10 \times \lambda_{тн}$). Однако сам процесс можно описывать той же системой уравнений (1), а значит и решение можно представить в виде формулы (2). При этом, как показывают расчеты, распределение температуры в теле будет соответствовать кривой 2 (рис. 3). Как следует из рисунка, распределение температуры почти равномерное от центра до внешнего края кожи. Градиент температуры между центром и периферией составит всего 0.5°C . Максимальная температура внутри организма при окружающей температуре воздуха в 27°C составляет всего 35.5°C . Поэтому и в этом случае такое представление о механизме теплопереноса в организме физиологически не оправдано. Во-первых, потому что в теле человека при нормальных физиологических условиях и температуре окружающего воздуха 27°C невозможна столь низкая температура в центре тела. Во-вторых, даже в термонеutralной зоне температура ядра больше температуры кожи на величину гораздо большую, чем 0.5°C . В третьих, такое распределение не соответствует установленному в практике распределению, показанному на рис. 2, Б.

Таким образом, наличие в организме только кондуктивного или только конвективного механизмов теплопереноса не приводит к адекватному соответствию температурного распределению температуры в тканях организма, которое приведено на рис. 2, Б.

Однако, существование в организме ядра, где температура тканей мало изменяется, и оболочки, где существует резкий перепад температуры, позволяет предположить, что в теле в этих областях организма действует различные процессы теплопереноса. При этом математическое описание различных процессов теплопереноса в ядре и оболочке требует уже наличие двух дифференциальных уравнений. Одно уравнение должно описывать теплоперенос в первой области с помощью одного способа теплопереноса, а другое уравнение должно описывать теплоперенос в другой области с помощью другого способа переноса тепла. Смешанный тип теплопереноса обычно не существует т.к. наличие развернутого конвективного механизма нивелирует кондуктивный механизм теплопереноса, как это было выяснено выше. Однако, если эти механизмы действуют в разных областях организма, то существование двух механизмов теплопереноса возможно.

Математическое описание процесса теплопереноса в теле-цилиндре, где существует как конвективный, так и кондуктивный способ в различных областях можно представить в виде следующей системы дифференциальных уравнений

$$\lambda_{я} \cdot \left(\frac{d^2 T_{я}}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dT_{я}}{dR} \right) + q_{я} = 0, \text{ при } 0 < R < R_1 \quad (3)$$

$$\lambda_{об} \cdot \left(\frac{d^2 T_{об}}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dT_{об}}{dR} \right) + q_{об} = 0, \text{ при } R_1 < R < R_2$$

$$\left. \frac{dT_{я}}{dR} \right|_{R=0} = 0 \quad T_{я}|_{R_{я}} = T_{об}|_{R_{я}}$$

$$\left. \frac{dT_{я}}{dR} \right|_{R_{я}} = \left. \frac{dT_{об}}{dR} \right|_{R_{я}} - \lambda_{об} \cdot \left. \frac{dT_{об}}{dR} \right|_{R_{об}} = \alpha \cdot (T_{об} - T_{cp})|_{R_{об}},$$

где $T_{я}$ и $T_{об}$ – температура в ядре и оболочке, соответственно; $q_{я}$ и $q_{об}$ – теплопродукция единицы тканей ядра и оболочки; $\lambda_{я}$ и $\lambda_{об}$ – коэффициенты теплопроводности в тканях ядра и оболочки.

Решение такой системы дифференциальных уравнений имеет следующий вид

$$T_{об} = \frac{q_{об}}{4 \cdot \lambda_{об}} \cdot (R_{об}^2 - R^2) + C_3 \cdot \left(\ln \frac{R}{R_{об}} - \frac{\lambda_{об}}{\alpha \cdot R_{об}} \right) + \frac{q_{об}}{2 \cdot \alpha} \cdot R_{об} + T_{cp} \quad (4)$$

$$T_{я} = \frac{q_{я}}{4 \lambda_{я}} \cdot (R_{я}^2 - R^2) + \frac{q_{об}}{4 \cdot \lambda_{об}} \cdot (R_{об}^2 - R_{я}^2) + C_3 \cdot \left(\ln \frac{R}{R_{об}} - \frac{\lambda_{об}}{\alpha \cdot R_{об}} \right) + \frac{q_{об}}{2 \cdot \alpha} \cdot R_{об} + T_{cp}$$

$$C_3 = \frac{R_{я}^2}{2 \lambda_{об}} (q_{я} - q_{об})$$

Если считать, что механизм теплопереноса в ядре в основном осуществляется кондуктивно, за счет перепада температур, а в оболочке, наоборот, конвективно, за счет переноса тепла кровью, то распределение температуры в теле- цилиндре, как следует из расчетов по формуле 4, будет соответствовать кривой 1 (рис. 4).

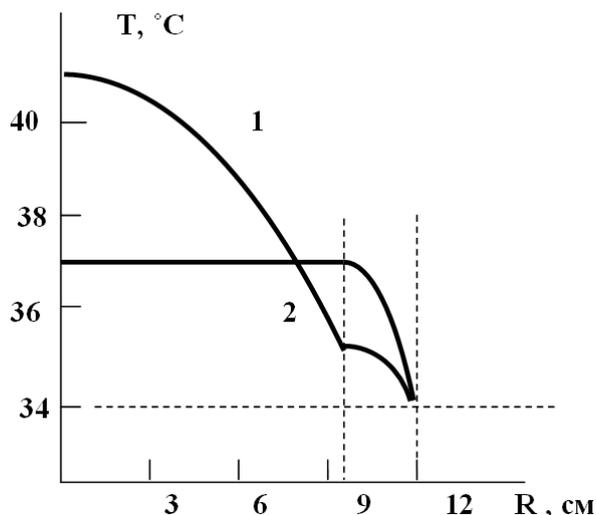


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу цилиндр-человек при кондуктивном теплопереносе в ядре организма ($\lambda=\lambda_{н}$) и конвективном теплопереносе в оболочке $\lambda=10 \times \lambda_{н}$ (1); при конвективном теплопереносе в ядре организма ($\lambda=10 \times \lambda_{н}$) и кондуктивном теплопереносе в оболочке $\lambda=\lambda_{н}$ (2)

Как следует из рисунка, температура в центре организма достигает уровня $\sim 41^{\circ}\text{C}$ при температуре среды 27°C . В ядре организма перепад температур составляет уже около 6°C . Совершенно неестественная картина распределения температуры наблюдается в оболочке тела, где теплоперенос осуществляется только конвективным образом (кривая 1, рис. 4). В этом случае в любой точке оболочки температура тканей фактически остается постоянной. Конечно, нет никакого совпадения распределения температуры с реальным распределением. Поэтому представление о том, что внутри организма существует только кондуктивный теплоперенос, а в оболочке кондуктивный – физиологически не оправдано.

Далее, считаем в модели наличие во внутреннем цилиндре только конвективного теплопереноса, а во внешнем существование только кондуктивного переноса тепла. В этом случае, по расчетам на модели, распределение температуры по радиусу цилиндра – человека будет выглядеть как на рис. 2. Как следует из рисунка, внутри тела температура почти равномерно распределена и в центре составляет величину, равную 37.4°C . В оболочке тела кривая распределения температуры имеет вид ниспадающей кривой от внутренних областей к поверхности тела. Если на границе ядра и оболочки температура составляла 37°C ,

то на поверхности 35°C . Такое распределение температуры внутри тела полностью совпадает с распределением температуры, полученное экспериментальным образом.

Таким образом, наши исследования показывают, что только при конвективном теплопереносе внутри организма и кондуктивном в оболочке организма наблюдается совпадение распределения температуры по тканям организма.

Важно, что при всевозможных рассматриваемых видах теплопереноса и одной и той же мощности и теплопродукции, температура поверхности тела цилиндра остается одной и той же что в нашем случае этот факт определяет одинаковую теплоотдачу во всех рассматриваемых вариантах. Поэтому при одной и той же мощности теплопродукции и одной и той же мощности теплоотдачи (которая определяется в нашем случае температурой поверхности цилиндра и остается во всех рассматриваемых случаях постоянной) распределение температуры в тканях тела-цилиндра может быть различным. Определяющим моментом в закономерности распределения температур в тканях, как следует из приведенных выше исследований, является процесс теплопереноса.

Конечно, вывод о том, что в ядре организма перенос тепла организма в основном осуществляется кровотоком и температура тканей почти неизменная, а на периферии организма перенос тепла в основном осуществляется за счет градиента температуры в различных точках тканей организма, а температура тканей резко изменяется, требует физиологического объяснения.

Надо отметить, что существование в ядре организма главным образом конвективного механизма теплопереноса не является неожиданностью (из-за наличия большого количества циркулирующей крови и разветвленного сосудистого русла, что приводит к развитому конвективному механизму теплопереноса). Более того, так как в тканях ядра кровотоков значительно интенсивнее, то, по нашим расчетам, и всякие тепловые изменения в них должны нивелироваться. Большая интенсивность кровотока внутри тела организма позволяет во многом нивелировать изменения температуры в отдельном органе достаточно быстро.

Наличие в основном кондуктивного механизма теплопереноса в коже требует количественного анализа. Действительно, в коже хоть и не интенсивная, но есть циркуляция крови, а значит может осуществляться и конвективный теплоперенос. По данным ряда авторов [4, 13, 28] в коже циркулирует 200–500 мл/мин крови (в среднем 375 мл/мин). Поэтому в работе было оценено количество тепла, которое уходит из ядра в кожу, а оттуда в среду путем конвективного и кондуктивного способа. Общее количество тепла, вырабатываемое тканями организма человека в норме, составляет около 90 Вт. При этом около 20% всего тепла уходит в среду с дыханием и неощутимой перспирацией т.е. $90 \times 0.2 = 18$ Вт. Остальное тепло $90 - 18 = 72$ Вт, которое в норме в основном вырабатывается в ядре организма, уходит из ядра в кожу и оттуда в среду. Конвективный теплоперенос в организме из ядра в кожу можно представить в виде следующего процесса: теплая артериальная кровь с температурой, приблизительно равной температуре ядра, поступает в кожу и охлаждается до определенного уровня и с «холодной» венозной кровью возвращается в ядро организма. Если учесть, что температура венозной крови, втекающей в ядро организма из кожи, в норме не отличается от температуры тканей ядра больше чем на 0.2°C (из экспериментальных данных Е.В. Хоревой [17, 18]), то количество тепла переносимое кровью из ядра в кожу как следует из расчетов будет составлять 6 Вт.

Таким образом, путем конвекции из ядра в кожу уходит всего около 6 Вт, путем кондукции из ядра в кожу уходит остальное тепло $72 - 6 = 66$ Вт. Т.е. в процентном отношении количество тепла переносимое кровью из ядра в кожу, составит не больше 10%, а количество тепла, переносимое кондуктивно, составляет 90% от общего количества тепла, вырабатываемое организмом.

Более того, в оболочке тела в архитектонике кровеносного русла существует особенность, которая тоже ограничивает конвективный теплоперенос. Нами был проведен тщательный анализ переноса тепла кровью в различных сосудах. Как показывают наши исследования, в различных сосудах перенос тепла кровью происходит различным образом. Активными теплообменниками являются в основном сосуды радиусом от 300 до 50 мкм. Кровь, проходя по эти сосудам, активно отдает тепло в окружающую их ткань. Сосуды радиусом большие, чем 300 мкм играют в основном роль теплопереносчиков. Кровь, проходя по таким большим сосудам, почти не остывает и передает все тепло в последующие сосудистые генерации, т.е. выполняет функцию переноса. В тоже время в небольших сосудах радиусом меньше чем 50 мкм температура крови сравнивается с температурой окружающей их ткани. Поэтому малые сосуды выпадают из теплообмена. Очень важное свойство теплопереноса в различных сосудах заключается в изменении теплообмена между кровью в различных сосудах от величины скорости кровотока. При увеличении скорости кровотока и малые сосуды становятся теплообменниками, и наоборот, при уменьшении скорости кровотока из теплообмена выпадают и более крупные сосуды.

Архитектоника кровяного русла достаточно хорошо изучена, благодаря легкому доступу к нему. На рисунке представлено сосудистое русло кожи с характерными особенностями, главной особенностью сосудистого русла является то, что при приближении к поверхности кожи залегают все более мелкие сосуды, которые, в конце концов, переходят в петлевые капилляры (рис. 5).

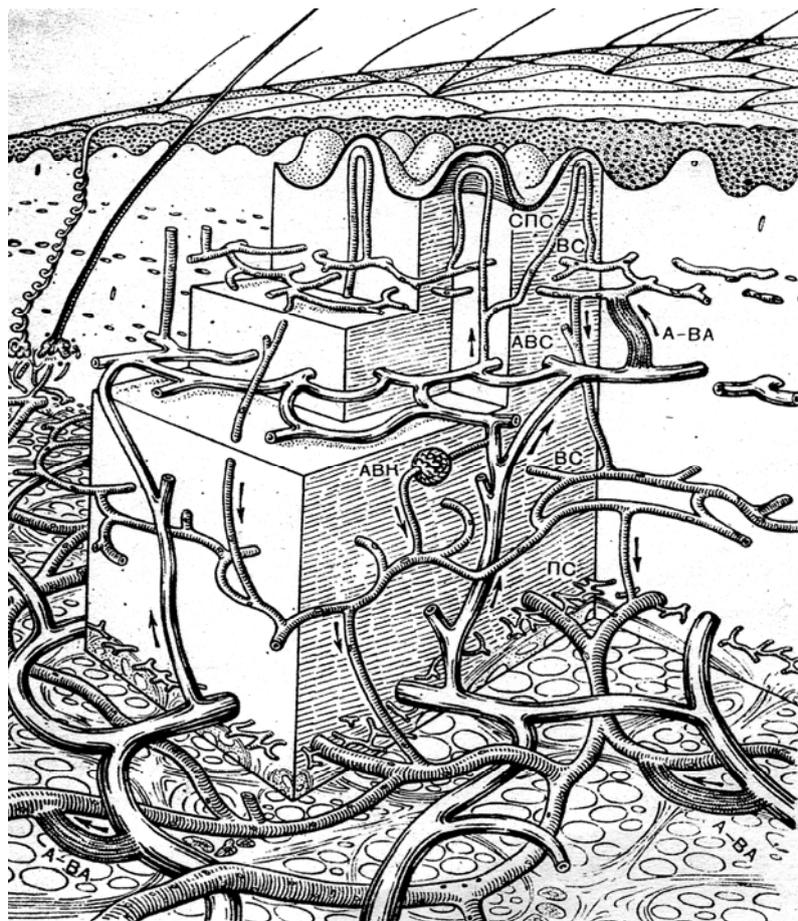


Рис. 5. Структура сосудистого русла кожи по Джонсон [5]

Здесь наглядно видна эта закономерность. Чем ближе к поверхности кожи залегают и артериальные и венозные сосуды, тем они становятся все меньше и верхних слоях кожи переходят в папиллярные капилляры. Причем радиусы этих сосудов определенных слоев кожи не превышают 50 мкм. В соответствии с ранее приведенными данными, температура крови в этих сосудах равна температуре окружающей ткани. Возникает такая ситуация, когда в определенный объем ткани, где залегают такие сосуды, сколько тепла будет входить с артериальной кровью, столько тепла будет уходить из этого объема ткани вместе с венозной кровью. Поэтому, несмотря на кровоток, перенос тепла кровью будет отсутствовать.

Таким образом, ткани гомойотермного организма можно разделить на две области. Это ткани ядра и ткани оболочки организма, причем в норме объем тканей оболочки составляет половину объема тканей ядра. Главное отличие этих областей организма заключается в способе проводимости тепла в них. Надо сказать, что о таком разделении тканей организма на ядро и оболочку, говорил еще Иван Петрович Павлов [11, 12]. И тогда было сказано им, что не может ни быть физиологического различия между тканями ядра и оболочки, несмотря на их физиологическое сходство. И вот теперь об этом разделении можно сказать определенно, что это различие заключается в способе проведения тепла в тканях ядра и оболочки.

Надо сказать, что разделение организма на две области - ядро, где существует конвективный теплоперенос, и оболочка, где действует кондуктивный теплоперенос, является ключом к пониманию терморегуляции самого организма. Дело в том, что ядро и оболочка являются функциональными понятиями. Размеры ядра и оболочки способны изменяться. При увеличении температуры среды размеры ядра увеличиваются за счет объема оболочки, и наоборот. При этом часть тепла из ядра переходит в оболочку, что позволяет до определенного уровня поддерживать температуру тканей ядра на постоянном уровне. Если происходит уменьшение температуры среды, то размеры ядра способны уменьшаться, а объем оболочки увеличивается. В результате тепло сосредотачивается в меньшем объеме, что позволяет поддерживать организму на постоянном уровне.

Литература

1. Александров В.Я. Клетки, макромолекулы и температура. Л., 1975. 329 с.
2. Апчел В.Я. Физиология человека и животных. Академия, 2013. 448 с.
3. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. Киев: Наукова думка, 1990. 223 с.
4. Брин В.Б. Физиология человека. Учебное пособие. СПб, Лань. 2016, 608 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Москва: Энергоиздат, 1981. 417 с.
6. Иванов К.П. Энергетика внутренних органов (доля участия в общей энергетике различных внутренних органов) // Успехи физиологических наук. 2009. Т. 440, № 3, С. 54–67.
7. Любимова З.В. Возрастная анатомия и физиология. 2-х т. 2016, 447 с.
8. Косицкий Г.И. Физиология человека. Учебник для вузов. 2015. 544 с.
9. Минут-Сорохтина О.П. О роли поверхностных и глубоких холодовых рецепторов оболочки в реакции терморегуляции // Физиол. журн. СССР им. Сеченова. 1987. Т. 73, №2. С. 290–293.
10. Павлов И.П. Полное собрание сочинений. 1951. Т. 2, кн. 1. С. 128.
11. Павлов И.П. Полное собрание трудов. М.-Л., 1949. Т.3. С. 103–104.
12. Петрищев Н.Н. Кровоснабжение кожи. Физиология кровообращения. Физиология сосудистой системы. Л., 1984. С. 533–546.
13. Румянцев Г.В. Изменение температуры теплофизической модели тела крысы при кратковременном отклонении окружающей температуры // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 1999. Т. 85, №5. С. 696–700.
14. Румянцев Г.В. Распределение температур и температурных градиентов в теплофизической модели тела кролика при внутренних и внешних температурных возмущениях // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2002. Т. 75, № 4. С. 596–598.
15. Слоним А.Д. Частная экологическая физиология млекопитающих. М.-Л., 1962. 496 с.
16. Хорева Е.В. Теплоперенос в задней полой вене и брюшной аорте кролика // Физиол. журн. СССР им. И.М. Сеченова. 1991. Т.77, №2. С. 106–110.
17. Хорева Е.В., Дымникова Л.П. Температурные различия между артериальной и венозной кровью в магистральных сосудах кролика // Физиол. журн. СССР им. И.М. Сеченова. 1989. Т.75, №8. С. 1154–1145.
18. Хочачка П.В., Сомеро Дж. Биохимическая адаптация. М., 1977. 388 с.
19. Хочачка П.В., Сомеро Дж. Н. Стратегия биохимической адаптации. М., 1977. 398 с.
20. Хадарцев А.А., Лучаков Ю.И., Шабанов П.Д., Несмеянов А.А. Влияние соотношения размеров ядра и оболочки на тепловой гомеостазис некоторых животных // Вестник новых медицинских технологий (электронный журнал). 2014. Публикация 2-20. URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4785.pdf> (дата обращения 30.04.2014).
21. Штрауб Ф.Б. Биохимия. Будапешт: Изд-во АН Венгрии, 1965. 400 с.
22. Berne R.M., Levey M.N. Physiology of cardiovascular system // Clinical and Fundamental Physiology. 2004. Section VII. № 1. P. 513–701.
23. Lichtenbelt W.D.M., Schranwen P., Kerckhove S.D., Westerterp – Plantenga M.S. Individual variation in body temperature and energy expenditure in response to mild cold // Am J Physiol Endocrinol Metab. 2002. V. 285, № 5. P. E1077–E1083.
24. Lichtenbelt W.D.M., Frijns A.J.H., Fiala D., Javssen A.M.J., Steenhoven A.A. Effect of individual characteristics on mathematical model of human thermoregulation // J Thermal Biology. 2004. V. 29, P. 577–581.
25. Lichtenbelt W.D.M., Frijns A.J.H., Ooijen M.J., Fiala D., Kester A.M., Steenhoven A.A. Validation of an individualised model of human Thermoregulation for predicting responses to cold air // J of Biometeorology. 2007. V 51, № 3. P. 169–179.
26. Werner J. Biophysics of heat exchange between body and environment. In: Physiology and Pathophysiology of Temperature Regulation, edited by Blatteis C.M. Farrer Road. Singapore: World Scientific, 1998. P. 25–45.

References

1. Aleksandrov VYa. Kletki, makromolekuly i temperature [Cells, macromolecules and temperature.]. Leningrad; 1975. Russian.
2. Apchel VYa. Fiziologiya cheloveka i zhivotnykh [human and animal Physiology.]. Akademiya; 2013. Russian.
3. Berezovskiy VA, Kolotilov NN. Biofizicheskie kharakteristiki tkaney cheloveka [Biophysical characteristics of human tissue. Reference.]. Spravochnik. Kiev: Naukova dumka; 1990. Russian.
4. Brin VB. Fiziologiya cheloveka. Uchebnoe posobie [human Physiology.]. Sankt-Peterburg: Lan', 2016. Russian.

5. Isachenko VP, Osipova VA, Sukomel AS. Teploperedacha [Heat Transfer.]. Moscow: Energoizdat; 1981. Russian.
6. Ivanov KP. Energetika vnutrennikh organov (dolya uchastiya v obshchey energetiki razlichnykh vnutrennikh organov) [Energetics of internal organs (share in total energy of various internal organs)]. Uspekhi fiziologicheskikh nauk. 2009;440(3):54-67. Russian.
7. Lyubimova ZV. Vozrastnaya anatomiya i fiziologiya [anatomy and physiology.]. 2-kh t. 2016. Russian.
8. Kositskiy GI. Fiziologiya cheloveka [human Physiology. Textbook for high schools.]. Uchebnik dlya vuzov; 2015. Russian.
9. Minut-Sorokhtina OP. O roli poverkhnostnykh i glubokikh kholodovykh retseptorov obolochki v reaktsiyakh termoregulyatsii [the role of surface and deep cold receptors of the shell in thermoregulation reactions]. Fiziol. zhurn. SSSR im. Sechenova. 1987;73(2):290-3. Russian.
10. Pavlov IP. Polnoe sobranie sochineniy [Complete works]. 1951. Russian.
11. Pavlov IP. Polnoe sobranie trudov [Complete collected works.]. Moscow-Leningrad; 1949. T.3. Russian.
12. Petrishchev NN. Krovosnabzhenie kozhi. Fiziologiya krovoobrashcheniya [The blood supply of the skin. Physiology of circulation.]. Fiziologiya sosudistoy sistemy. Leningrad; 1984. Russian.
13. Rumyantsev GV. Izmenenie temperatury teplofizicheskoy modeli tela krysy pri kratkovre-mennom otklonenii okruzhayushchey temperatury [temperature variation of the thermophysical model of the body of a rat]. Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova. 1999;85(5):696-700. Russian.
14. Rumyantsev GV. Raspredelenie temperatur i temperaturnykh gradientov v teplofizicheskoy modeli tela krolika pri vnutrennikh i vneshnikh temperaturnykh vozmushcheniyakh [Distribution of temperature and temperature gradients in the thermal model of the body of the rabbit with internal and external temperature disturbances]. Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova. 2002;75(4):596-8. Russian.
15. Slonim AD. Chastnaya ekologicheskaya fiziologiya mlekoopitayushchikh [Private ecological physiology of mammals]. Moscow-Leningrad; 1962. Russian.
16. Khoreva EV. Teploperenos v zadney poloy vene i bryushnoy aorte krolika [heat transfer in the posterior Vena cava and abdominal aorta of the rabbit]. Fiziol. zhurn. SSSR im I.M. Sechenova. 1991;77(2):106-10. Russian.
17. Khoreva EV, Dymnikova LP. Temperaturnye razlichiya mezhdunarterial'noy i venoznoy krov'yu v magistral'nykh sosudakh krolika [Temperature differences between arterial and venous blood in the great vessels of the rabbit]. Fiziol. zhurn. SSSR im I.M. Sechenova. 1989;75(8):1154-45. Russian.
18. Khochachka PV, Somero Dzh. Biokhimicheskaya adaptatsiya [Biochemical adaptation]. Moscow; 1977. Russian.
19. Khochachka PV, Somero DzhN. Strategiya biokhimicheskoy adaptatsii [The strategy of biochemical adaptation]. Moscow; 1977. Russian.
20. Khadartsev AA, Luchakov YI, Shabanov PD, Nesmeyanov AA. Vliyanie sootnosheniya razmerov yadra i obolochki na teplovoy gomeostazis nekotorykh zhivotnykh [Influence of the ratio of the size-ing core and shell on the thermal homeostasis of some animals]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy (elektronnyy zhurnal). 2014 [cited 2014 Apr 30]. Russian. Available from: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4785.pdf>.
21. Shtraub FB. Biokhimiya [Biochemistry.]. Budapesht: Izd-vo AN Vengrii; 1965. Russian.
22. Berne RM, Levey MN. Physiology of cardiovascular system. Clinical and Fundamental Physiology. 2004;1:513-701.
23. Lichtenbelt WDM, Schranwen P, Kerckhove SD, Westerterp– Plantenga MS. Individual variation in-body temperature and energy expenditure in response to mild cold. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2002;285(5):1077-83.
24. Lichtenbelt WDM, Frijns AJH, Fiala D, Javssen AMJ, Steenhoven AA. Effect of individual characteristics on mathematical model of human thermoregulation. J Thermal Biology. 2004;29:577-81.
25. Lichtenbelt WDM, Frijns AJH, Ooijen MJ, Fiala D, Kester AM, Steenhoven AA. Validation of an individualised model of human Thermoregulation for predicting responses to cold air. J of Biometeorology. 2007;51(3):169-79.
26. Werner J. Biophysics of heat exchange between body and environment. In: Physiology and Pathophysiology of Temperature Regulation, edited by Blatteis C.M. Farrer Road. Singapore: World Scientific; 1998.

Библиографическая ссылка:

Луцаков Ю.И., Арокина Н.К., Несмеянов А.А. Конвективный и кондуктивный теплоперенос в различных областях организма // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2018. №1. Публикация 1-3. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2018-1/1-3.pdf> (дата обращения: 22.01.2018). DOI: 10.24411/2075-4094-2018-15958.