

## ПЕРЕНОС ТЕПЛА В КОЖЕ

УДК 615.322  
DOI: 10.17816/RCF15168-71

© Ю.И. Лучаков<sup>1</sup>, П.Д. Шабанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГБОУ ВО ФГБУН «Институт физиологии им. И.П. Павлова» РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup>ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» МО РФ, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 17.01.2017

Принята к печати 02.03.2017

### Ключевые слова:

теплоперенос; кожа; архитектура кровяного русла кожи; математическая модель; кровоток.

### Резюме

В работе исследовался перенос тепла в коже. Проведен анализ архитектуры кровяного русла этой области организма. Построена модель сосудистого русла кожи, в которой выделена чередующаяся микрообласть, характерная для различных ее слоев. Построена математическая модель этой микрообласти, в которой учитываются как конвективный, так и кондуктивный теплоперенос тепла. Показано, что в слоях кожи, которые

примыкают к ее поверхности, несмотря на наличие кровотока, отсутствует теплоперенос кровью, а существует только кондуктивный теплоперенос. Уже в более глубоких слоях кожи на уровне гиподермы, где залегают артериолы и венулы, где сосуды радиусом более 100 и 300 мкм соответственно, в норме в основном осуществляется конвективный перенос тепла. Выяснено, что организм, изменяя величину кровотока, может увеличить или уменьшить области кожи, где существует только конвективный или кондуктивный теплоперенос. Таким образом, сам организм способен по физиологической необходимости изменять размеры периферической ткани, где существует только конвективный или только кондуктивный теплоперенос.

## TRANSPORT OF HEAT THROUGH THE SKIN

© Yu.I. Luchakov<sup>1</sup>, P.D. Shabanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IP Pavlov Institute of Physiology, Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup>SM Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

For citation: Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy, 2017;15(1):68-71

Received: 17.01.2017

Accepted: 02.03.2017

◆ **Keywords:** heat transport; skin; cytoarchitecture of the skin blood stream; mathematical model; blood flow.

◆ **Abstract.** The transport of heat through the skin of the human body has been investigated in the paper. The analysis of cytoarchitecture of this region was done, a model of vascular stream of the skin was built where the transient microregion typical for its different tissues was separated. A mathematical model taking part both convective and conductive heat transport was reproduced for this microregion. There was no heat transfer through the blood but only conductive heat

transport was shown to be in the superficial skin tissue strates having blood current. In the norm, there was convective heat transport preferably in the deeper skin strates of the hypoderm where arterials and veins of more than 100 and 300 um in diameter were lying. The organism was revealed to be able to increase or decrease the skin region where there was only convective or conductive heat transport by means of changing the blood stream. Therefore, the organism is able to change the size of peripheral tissue where there is only convective or only conductive heat transfer according to physiological necessity.

Изучение теплового гомеостаза организма требует исследований не только процесса обмена теплом между организмом и средой, но и процессов теплопереноса внутри тела. Перенос тепла от внутренних органов к периферическим тканям осуществляется только двумя способами: во-первых, кондуктивно, за счет градиента температуры, а во-вторых, конвективно, за счет теплопереноса кровью. С физической точки зрения эти пути теплопереноса независимы, так как механизм действия их различен. Кондуктивный перенос тепла осуществляется за счет градиента температуры

между двумя точками и поэтому, конечно, не поддается физиологической регуляции. Конвективный перенос тепла осуществляется за счет переноса тепла кровью и поэтому, наоборот, является важнейшей физиологически регулируемой величиной. Этот процесс сложный и зависит от объемной и линейной скорости кровотока в сосудах, от размеров самих сосудов, в которых осуществляется теплообмен между кровью и окружающими тканями, архитектуры кровяного русла и т. д. Понимание механизма теплопереноса в различных тканях важно, так как оно позволяет количественно охарактеризо-

вать процесс переноса тепла в регулируемой и нерегулируемой областях. Определение же характера теплопереноса в оболочке тела организма, через которую собственно происходит процесс теплообмена между организмом и средой, способствует даже выяснению процессов регуляции теплообмена всего организма со средой. Экспериментальные исследования теплопереноса в микрообъеме ткани представляют большие и принципиальные сложности (так, одной из причин этого является создание измерителя с теплоемкостью по крайней мере в 100 раз меньшей, чем у микроскопического измеряемого объекта), поэтому в работе применялся метод математического моделирования.

## МЕТОДИКА

Понимание теплопереноса в коже требует подробного знания архитектоники кровеносного русла. В настоящее время анатомия сосудистого русла кожи человека выяснена достаточно подробно. Так, по данным авторов [4], артериолы, питающие кожу, образуют широкопетлистую сеть под гиподермой, которую обозначают как фасциальная сеть. Из этой сети в кожу направляются более мелкие сосуды, которые на нижней границе дермы делятся и анастомозируют друг с другом, образуя вторую глубокую, так называемую субдермальную артериальную сеть, параллельную первой. Из субдермальной артериальной сети в собственно кожу поднимаются артериолы следующего порядка ветвления диаметром около 100 мкм. Эти короткие артериолы в самой дерме тоже делятся, образуя следующий слой артериального сплетения, где сосуды имеют еще более мелкий калибр. От этого артериального сплетения отходят артериолы диаметром 40–50 мкм, а непосредственно на границе с сосочковым слоем располагается поверхностная артериальная сеть. От этого сплетения уже отходят артериальные сосуды, образующие капилляры (так называемые папиллярные капилляры). Плотность папиллярных капилляров в коже соответствует плотности сосочков, меняясь в различных областях тела и составляя величину 16–65 штук на один квадратный миллиметр поверхности кожи [3]. Капилляры переходят в вены, а те, в свою очередь, образуют мелкопетлистую поверхностную венозную сеть сразу под сосочками кожи. Из поверхностной венозной сети, которая расположена, как и поверхностная артериальная сеть, параллельно поверхности кожи, отходят венозные сосуды, которые на уровне сетчатого слоя кожи образуют следующее венозное сплетение. В гиподерме залегает уже крупночешуйчатая глубокая венозная сеть, к которой из вышележащего венозного сплетения отходят вены. Это венозное сплетение расположено параллельно соответствующему артериальному сплетению, с которым оно связано множеством артериовенозных анастомозов.

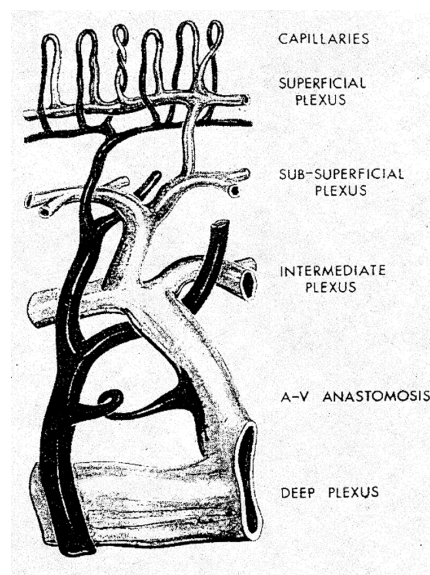


Рис. 1. Анатомическая схема сосудистого русла кожи

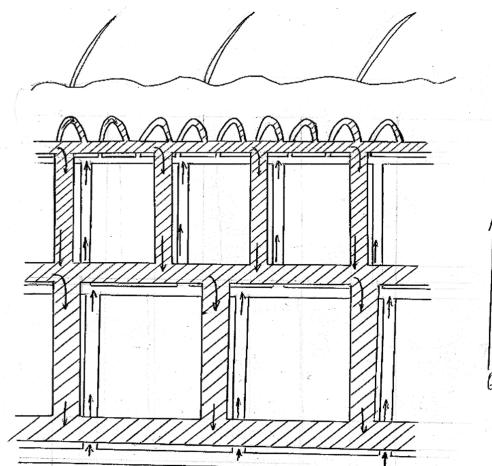


Рис. 2. Модель сосудистого русла кожи

Четкая диаграмма сосудистого русла в коже человека приводится в работе [5] (рис. 1). Для построения модели теплопереноса была создана сосудистая сеть, которая имитирует реальную сеть в коже (рис. 2). Как видно из рисунка, у поверхности кожи располагаются петлевые капилляры, объединяющие самые верхние артериальные и венозные сплетения сосудов, радиус которых составляет около 4–5 мкм. На большей глубине параллельно предыдущему сосудистому сплетению располагается следующее более мощное сосудистое сплетение, размер сосудов которого в 2–3 раза больше, чем у первого сплетения. Еще глубже в оболочке тела существует еще одно сплетение артериальных и венозных сосудов, размеры которых в 3–5 раза больше, чем у предыдущего сплетения. Между собой эти сплетения соединяются сосудами соответствующих размеров, то есть на каждом уровне соединяющие сосуды образуют регулярную структуру. Поэтому можно выделить элемент ткани кожи (ткань вместе с сосудами, ограниченная штриховыми линиями), который будет повторяться на всей длине уровня. Такая регулярная

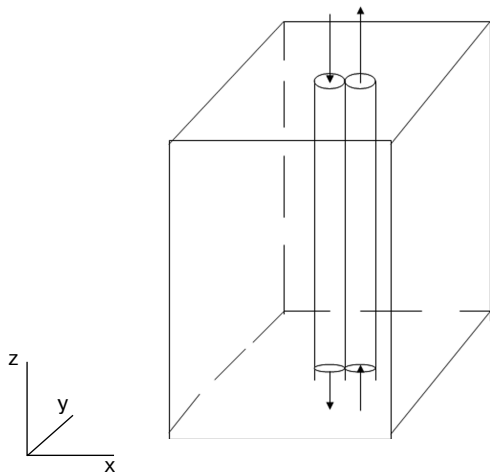


Рис. 3. Характерный регулярный элемент кожи, через который проходит теплоперенос

структура сосудов на каждом уровне позволяет рассматривать процесс теплопереноса только в одном элементе каждого уровня, чтобы оценить процесс теплопереноса во всем уровне. Этим повторяющимся элементом на каждом уровне является малый объем ткани, который включает рядом лежащие артериальные и венозные сосуды, характерные для каждого уровня, и через который проходит теплоперенос от ядра к поверхности кожи. Как видно из рисунка 3, кровь по артериальным сосудам течет к плоскости I, а по венозному руслу кровь течет к плоскости II. В таком элементе ткани кожи уже возможно оценивать одновременно как роль конвективного теплопереноса, так и кондуктивного.

Исследование процесса переноса тепла осуществлялось на выделенном микрообъеме ткани кожи, где рядом проходят артериола и венула, несущие кровь в противоположных направлениях (см. рис. 3). Математически теплоперенос в элементе ткани описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial T_{tk}^{\square}}{\partial X^{\square}} + \frac{\partial T_{tk}^{\square}}{\partial Y^{\square}} + \frac{\partial T_{tk}^{\square}}{\partial Z^{\square}} = -\frac{m}{a},$$

$$\frac{\partial T_a^{\square}}{\partial X^{\square}} + \frac{\partial T_a^{\square}}{\partial Y^{\square}} + \frac{\partial T_a^{\square}}{\partial Z^{\square}} = -\frac{V_a}{a_a} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial Z},$$

$$\frac{\partial T_v^{\square}}{\partial X^{\square}} + \frac{\partial T_v^{\square}}{\partial Y^{\square}} + \frac{\partial T_v^{\square}}{\partial Z^{\square}} = -\frac{V_v}{a_v} \cdot \frac{\partial T_v}{\partial Z}.$$

Граничные условия можно представить в виде следующих соотношений:

$$\lambda_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial n} = \lambda_{tk} \cdot \frac{\partial T_{tk}}{\partial n},$$

$$\lambda_v \cdot \frac{\partial T_v}{\partial n} = \lambda_{tk} \cdot \frac{\partial T_{tk}}{\partial n},$$

где  $T_a = T_{tk}$  на поверхности раздела артериолы и ткани;  $T_v = T_{tk}$  на поверхности раздела венулы и ткани;  $T_{tk} = T_0$  при  $z = 0$ ,  $T_a = T_0$  при  $z = 0$ ,  $T_v = T_{tk}$  при  $z = L$ ;

$$a = \frac{T_{TL} - T_{TO}}{L} \cdot V \cdot t + T_{TO}$$

при  $z = L$ , на всех боковых поверхностях области

$$\frac{\partial T_{tk}}{\partial n} = 0,$$

где  $T_a, T_v, T_{tk}$  — температура в артериальной, венозной крови и в ткани соответственно;  $T_{tl}, T_{to}$  — температура в начале элемента ткани и в конце;  $t, L, V_a, V_v$  — текущее время, длина сосудов, скорость кровотока в артериоле и венуле соответственно;  $m$  — теплопродукция единицы ткани кожи;  $\lambda_a, \lambda_v, \lambda_{tk}$  — коэффициенты теплопроводности в артериоле, венуле и ткани.

Стационарную трехмерную задачу теплопроводности решали методом сеток. Для аппроксимации дифференциальных операторов разностями использовали равномерную сетку. Шаг сетки выбирали таким образом, чтобы в сосуд наименьшего размера попадало не менее пяти точек. Как показали результаты численных экспериментов, дальнейшее дробление сетки не приводит к существенному улучшению результатов расчетов. Сеточную задачу решали методом установления с применением расщепления по трем пространственным направлениям. Параболическую задачу движения крови в сосудах также решали численно с применением разностей против потока. Общее количество узлов сетки имело порядок  $50 \cdot 50 \cdot 25$ . Время расчетов на компьютере с процессором Pentium составляло 1–3 часа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общий транспорт тепла через кожу из ядра организма во внешнюю среду осуществляется только двумя механизмами переноса тепла — конвективным и кондуктивным. Однако вследствие особого строения сосудистого русла в коже (когда сосуды при приближении к поверхности кожи становятся все меньше и переходят в капилляры) теплоперенос в определенных областях кожи, как показывают наши исследования, может осуществляться или только конвективным образом, или только кондуктивным, или смешанным. Надо отметить, что в тех областях тканей, где развита сосудистая система, то есть представлен разнообразный сосудистый бассейн, по нашим расчетам, происходит только конвективный теплоперенос. Такое явление обусловлено тем, что скорость переноса тепла кровью в десятки раз быстрее конвективного, что полностью нивелирует кондуктивный перенос тепла. Анализ переноса тепла в поверхностной области кожи, между папиллярным слоем и нижним сплетением, где залегают сосуды радиусом не более 20 мкм, показал наличие в этой области кожи только кондуктивного механизма за счет градиента температуры,

несмотря на наличие кровотока. Как показывают наши исследования на модели, температура крови в артериолах и венулах сравнивается с температурой окружающей ткани, и сколько тепла входит в эту область с артериальной кровью, столько и выходит с венозной кровью. Более того, в модели задавались условия, когда вообще нет кровотока в этой области, как в венулах, так и в артериях, однако температурное распределение в коже не изменилось. Следовательно, в этой области кожи полностью отсутствует конвективный механизм теплопереноса и работает только кондуктивный механизм переноса тепла.

Аналогичное явление проявляется в процессе теплопереноса в области между сосудами 2-го и 3-го порядков сосудистого сплетения, как показывают расчеты на модели. В этой области залегают сосуды радиусом артериол до 50 мкм, венулы до 100 мкм. Температура крови и в этих сосудах тоже сравнивается с температурой ткани, а значит, сколько тепла будет входить в микрообъем с артериальной кровью, столько и будет выходить с венозной кровью. Следовательно, и в этой области отсутствует конвективный теплоперенос, а действует исключительно кондуктивный теплоперенос. Как показывают расчеты, если обнулить кровоток в этой области, распределение температуры несколько не изменится.

Совсем другой механизм теплопереноса наблюдается в глубоком слое кожи, где проходят сосуды радиусом более 100 мкм. В этой области наблюдается уже конвективный теплоперенос. Действительно, если в модели обнулить кровоток, то распределение температуры в этой области изменится.

Таким образом, в норме в коже человека существуют области ткани, прилегающие к поверхности кожи, где, несмотря на кровоток, не существует конвективной составляющей теплопереноса. В более глубоких слоях кожи, в гиподерме, где проходят сосуды большего размера, уже существует конвективный теплоперенос. Однако надо отметить, что эти явления наблюдаются в норме, то есть когда скорость кровотока соответствует среднему уровню (нормальному физиологическому уровню). При увеличении кровотока картина теплопереноса изменится. Так, увеличение скорости кровотока в 3–5 раз, как показывают исследования на модели, приводит к тому, что на втором уровне, где залегают артерии радиусом 50 мкм, а венулы — 100 мкм, теплопере-

нос осуществляется конвективно за счет кровотока. В этой ситуации сосуды становятся теплообменниками, что и приводит к обмену теплом между тканью и кровью в этих сосудах. Поэтому увеличиваются области кожи, в которых происходит конвективный теплоперенос. Наоборот, снижение кровотока в 2–3 раза, как показывают расчеты, приводит к тому, что и на 3-м уровне (на уровне гиподермы) уже отсутствует конвективный теплоперенос. Сосуды артериол радиусом 100 мкм, а венул — 200 мкм уже не будут являться теплообменниками. Это приводит к уменьшению области кожи, где происходит конвективный теплоперенос.

Таким образом, изменяя скорость кровотока, организм физиологически как бы регулирует толщину ткани кожи, где происходит конвективный теплоперенос.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лучаков Ю.И., Камышев Н.Г., Шабанов П.Д. Перенос тепла кровью, сопоставление расчетных и экспериментальных данных // Обз. по клин. фармакол. и лек. терапии. – 2009. – Т. 7. – № 4. – С. 3–20. [Luchakov YI, Kamyshev NG, Shabanov PD. Transfer of heat by the blood: comparison of mathematical and experimental data. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*. 2009;7(4):3-20 (In Russ.)]
2. Лучаков Ю.И., Шабанов П.Д. Терморегуляция кролика при изменении температуры среды в пределах термонейтральной зоны (математическая модель) // Рос. физиол. журнал им. И.М. Сеченова. – 2013. – Т. 99. – № 9. – С. 1089–1096. [Luchakov YI, Shabanov PD. Thermoregulation of the rabbit in changing temperature conditions within thermoneutral zone (mathematical model). *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova*. 2013;99(9):1089-1096. (In Russ.)]
3. Петрищев Н.Н. Кровоснабжение кожи // Физиология кровообращения. Физиология сосудистой системы. – Л., 1984. [Petrishchev NN. Blood supply of the skin. *Physiology of vascular system*. Leningrad; 1984. (In Russ.)]
4. Спаркс Х.В. Кожа и мышцы // Периферическое кровообращение. – М., 1982. [Sparks KV. The skin and muscles. In: *Periferal circulation of the blood*. Moscow; 1982. (In Russ.)]
5. Conrad MC. Functional anatomy of the circulation to the lower extremities. Chicago, IL: Year Book; 1971.

### ◆ Информация об авторах

Юрий Иванович Лучаков — д-р биол. наук, науч. сотр., Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург. E-mail: yluchakov@yandex.ru.

Петр Дмитриевич Шабанов — д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой фармакологии Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова МО РФ, Санкт-Петербург. E-mail: pdshabanov@mail.ru.

### ◆ Information about the authors

Yury I. Luchakov — Dr Biol Sci (Physiology), Scientific Researcher, IP Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia. E-mail: yluchakov@yandex.ru.

Petr D. Shabanov — Dr Med Sci (Pharmacology), Professor and Head, Dept. of Pharmacology, SM Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia. E-mail: pdshabanov@mail.ru.