

ОБ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И СОЛНЦА, ИЛИ ПОЧЕМУ У КОМАРА «ХОЛОДНАЯ КРОВЬ»

В.Ланге, Т. Лоте

Поток энергии, идущей от Солнца, колоссален. Из геофизических измерений следует, что даже в верхних слоях атмосферы Земли, на громадном расстоянии почти в 150 миллионов километров от Солнца, каждый квадратный метр, расположенный перпендикулярно солнечным лучам, получает от Солнца каждую секунду 1,4 кДж. Эту величину называют солнечной постоянной и обычно обозначают буквой I . Зная, что $I = 1,4 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1,4 \text{ Вт} / \text{м}^2$, нетрудно найти полную мощность излучения Солнца P_1 (I называют также полным потоком энергии Солнца, тогда I можно определить как плотность потока солнечной энергии на расстоянии от Солнца, равном радиусу орбиты Земли). Для этого достаточно умножить солнечную постоянную на площадь сферы, описанной вокруг Солнца, с радиусом $R = 150000000 \text{ км}$:

$$P_1 = I \cdot 4\pi R^2 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Конечно, энергетические возможности человека во много раз скромнее. Среднюю мощность P_2 , развиваемую человеком, можно довольно точно оценить по калорийности пищи, потребляемой им в сутки. Как известно, лица, не занимающиеся тяжелым физическим трудом, должны получать с пищей ежедневно примерно 12 МДж. Почти вся эта энергия идет на поддержание постоянной температуры человеческого тела и в конечном счете генерируется человеком в окружающее пространство. (Лишь очень малую часть получаемых 12 МДж человек расходует на совершение механической работы.) Разделив 12 МДж на длительность суток (86400 с), получим

$$P_2 \approx 140 \text{ Вт.}$$

Таким образом, как генератор энергии Солнце примерно в $3 \cdot 10^{24}$ раз мощнее человека. Тем неожиданнее результат сравнения их удельных (т.е. приходящихся на единицу массы) мощностей. Масса M Солнца составляет около $2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, массу m человека примем равной 80 кг. Тогда

$$P_1 : M = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/кг}, P_2 : m = 1,75 \text{ Вт/кг}$$

– удельная мощность человека оказывается почти в 10000 раз больше, чем у Солнца!

Результат, к которому мы пришли, кажется на первый взгляд совершенно неправдоподобным. Однако так и есть на самом деле. Как же объясняется этот «парадокс»? Почему Солнце – этот гигантский термоядерный реактор – проигрывает по удельной мощности человеку, энергию которому поставляют химические реакции, куда более «слабосильные», чем ядерные?

Ответ на этот вопрос нетрудно получить, если принять, что тепло в человеческом теле и в Солнце выделяется более или менее равномерно по всему объему. Тогда, скорость выделения тепла прямо пропорциональна объему тела, иными словами - кубу линейного размера. Скорость же теплоотдачи пропорциональна площади поверхности тела, т.е. квадрату линейного размера. Стало быть, чем больше тело, тем меньшей может быть скорость выделения тепла, необходимая для поддержания некоторой заданной температуры.

Объем Солнца порядка 10^{27} м^3 , площадь его поверхности около 10^{18} м^2 . Соответствующие параметры тела человека – 10^{-1} м^3 и 1 м^2 . Таким образом, отношение объемов Солнца и человека равно приблизительно 10^{28} , а отношение площадей поверхностей этих тел порядка 10^{18} . Образно говоря, на единицу объема Солнца приходится приблизительно в 10 миллиардов раз меньше свободной поверхности, чем у человека. Поэтому не удивительно, что, несмотря на то, что солнечный «обмен веществ» протекает со

скоростью всего лишь $0,2 \text{ Вт/кг}$, температура на поверхности Солнца достигает 6000 градусов.

Проиллюстрируем связь между размерами, темпом энерговыделения и температурой тел следующими примерами из жизни животного мира.

Температуры тел млекопитающих отличаются не особенно сильно. В частности, они примерно одинаковы и у слона, и у маленькой полевой мышки. Однако скорость выделения тепла в организме слона примерно в 30 раз меньше. Если бы внутри тела слона выделение тепла происходило с такой же скоростью, как у мыши, то выделяющееся тепло не успевало бы покинуть организм слона достаточно быстро, чтобы сохранилась нормальная температура, и слон бы «зажарился» в собственной шкуре.

Чем меньше теплокровное животное, тем больше должна быть удельная (т.е. в расчете на единицу массы) скорость выделения тепла, чтобы скомпенсировать потери и поддержать температуру тела, обеспечивающую нормальную жизнедеятельность организма, тем больше пищи (опять-таки в расчете на единицу массы) оно должно поглощать. Мальчик-с-пальчик из широко известной детской сказки должен быть ужасно прожорлив: при одинаковых пропорциях с нормальным человеком ему требовалось бы на 1 кг массы в 20 раз больше пищи.

Самые маленькие млекопитающие на Земле – этрусские мыши – имеют массу всего 1,5 г, а съедают за сутки в два раза больше. Если этрусскую мышь оставить без пищи хотя бы на несколько часов, она погибнет. Практически весь период бодрствования заняты поисками и поглощением еды колибри (крошечные птички с массой около 2 г, обитающие в Южной Америке). Длительный ночной перерыв в этом занятии колибри могут переносить только потому, что температура их тела на это время резко понижается.

Можно показать, что очень маленькие существа, комар например, не могут быть теплокровными. Для простоты будем считать, что комар имеет форму цилиндра с диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$ и длиной $l = 4 \text{ мм}$. В таком случае площадь поверхности S и объем V его тела равны, соответственно,

$$S = 2 \frac{\pi d^2}{4} + \pi dl \approx 10^{-5} \text{ м}^2, \quad V = \frac{\pi d^2}{4} l \approx 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Оценим мощность, «генерируемую» комаром. Тело, имеющее температуру T , передает в окружающее пространство, где температура T_0 ($T_0 < T$), тепловую мощность

$$P = \alpha S \Delta T.$$

Если тепло передается за счет излучения, а разность температур $\Delta T = T - T_0$ мала по сравнению с температурой T , то коэффициент α пропорционален T^3 ; при комнатных температурах $\alpha \approx 2 - 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ (в зависимости от отражательной способности тела). Предположив, что температура тела комара 30°C ($T = 303\text{K}$), и взяв $\alpha = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, найдем, что при температуре окружающей среды 17°C ($T_0 = 290\text{K}$) комар излучает тепловую мощность $P \approx 10^{-3} \text{ Вт}$. Приняв плотность вещества тела комара равной плотности воды, найдем массу комара: $m \approx 10^{-6} \text{ кг}$. Стало быть, удельная мощность комара составляет $10^{-3} \text{ Вт}/10^{-6} \text{ кг} = 10^3 \text{ Вт/кг}$, т.е. примерно в 600 раз больше, чем у человека (и в 6 миллионов раз больше, чем у Солнца!). Если человек поглощает в сутки около 1 кг пищи, т.е. примерно $1/80$ часть от своей массы, то масса пищи комара должна бы превышать его собственную в $600/80 = 7,5$ раза. (Фактически мы получаем заниженные цифры, так как при оценке не учитывалось тепло, отдаваемое за счет конвекции.) Температура окружающего воздуха чаще оказывается значительно ниже 17°C , а при 7°C (обычные комары достаточно активны и в этих условиях) энергозатраты возрастают почти в 2 раза, так что поглощать пищи комару пришлось бы уже в 15 раз (!) больше своей массы. Поэтому ясно, что поддерживать постоянной температуру своего тела (т.е. быть теплокровным) комар не может.

Рассматривая связь между линейными размерами тела и интенсивностью энергообмена с окружающей средой, легко получить ответ и на такой интересный вопрос: почему тонкую проволоку можно расплавить в пламени спички, а толстую трудно раскалить даже с помощью газовой плиты? Поток энергии, которую получает проволока от огня, прямо пропорционален площади ее боковой поверхности $S_1 = 2\pi Rl$ (R – радиус проволоки, l – длина ее части, находящейся в пламени). В то же время скорость отвода тепла вдоль оси проволоки к ее холодным концам (которые не попадают в пламя) прямо пропорциональна площади поперечного сечения проволоки $S_2 = \pi R^2$. Если радиусы двух проволок отличаются в 10 раз, то при прочих равных условиях более толстая проволока будет получать за единицу времени в 10 раз больше тепла, чем тонкая, но терять она будет в 100 раз больше. Ясно, что температура толстой проволоки в равновесном состоянии (когда оба тепловых потока – к проволоке и от нее – сравняются) окажется заметно меньше.