

Парилка в бане

«И какой же русский не любит...»

Н.В. Гоголь

Парилка в бане

Баня !!! – Сколько теплых в прямом и переносном смысле воспоминаний вызывает это слово! В баню ходят не только для того, чтобы помыться. Это и отдых, и развлечение, и повод для общения. Это и повод для физических размышлений. Известно, что в парилке сухой (финской) бани температура воздуха может достигать до 120°C и более, а температура человеческого тела гораздо меньше!

Сколько воды должен каждую минуту испарять человек средней комплекции, чтобы не перегреться, находясь длительное время в парилке (сухой) бани с температурой воздуха $+120^{\circ}\text{C}$? Вот вопрос для физиков.

Вспомним о всех механизмах теплопередачи, которые действуют в природе, и оценим их вклады в данной конкретной ситуации.

Голый (ну не ходят в парилку одетыми) человек получает тепловую энергию в данном случае посредством двух главных механизмов передачи тепла:

посредством излучения и посредством теплопроводности через окружающий его воздух. Конвекция воздуха (вспомогательный механизм теплопередачи), который в парилке опускается вдоль тела человека вниз, способствует более эффективной работе механизма теплопроводности, поскольку уменьшает толщину слоя воздуха d , через который идет поток тепла от воздуха к телу.

Если в парилке не совершать резких движений (не размахивать руками, например), то вполне можно выдержать минут 5 при температуре $+120^{\circ}\text{C}$. Если же кому-то захочется «обмахиваться» веником, то ощущение жары возрастает в очень большой степени. Это говорит нам о том, что роль теплопроводности сильно меняется в зависимости от поведения человека.

Предположим, что человек хочет просидеть в парилке подольше – установить рекорд, тогда он должен сидеть тихонько и не шевелиться. В этом случае большую часть тепловой мощности он получает в виде излучения, испускаемого стенками и воздухом в парилке. Не вдаваясь в подробности формы человеческого тела, будем считать, что оно абсолютно черное, а площадь поверхности S равна 1.5 м^2 . В инфракрасном диапазоне длин волн, которые как раз соответствуют излучению тел при температуре $+120^{\circ}\text{C}$, тела всех людей близки по свойствам к абсолютно черному телу, поскольку вода, из которой мы в основном и состоим, хорошо поглощает ИК излучение.

Мощность, получаемая человеком за счет излучения, может быть оценена с помощью формулы:

$$W_1 = -\gamma S \sigma T_T^4 + \gamma S \sigma T_B^4.$$

Здесь $\gamma \approx 1$ это коэффициент нечерноты, σ – постоянная Стефана – Больцмана, а T_T и T_B – это, соответственно, температуры человеческого тела и стенок, выраженные в шкале Кельвина. Оценка потока теплоты за счет излучения, если предположить, что температура поверхности тела равна 40°C , даёт мощность:

$$W_1 = 1.2\text{ кВт}.$$

Через прослойку воздуха толщиной d к влажной поверхности площадью S идет поток тепла, обеспечиваемый теплопроводностью:

$$W_2 = \frac{S \delta (T_B - T_T)}{d}.$$

Здесь δ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Толщина прослойки поддерживается за счет конвективного движения воздуха возле поверхности тела. Если мы примем $d = 1$ см, то при температуре воздуха

120° и температуре кожи 40°C (предположение) теплопроводность обеспечивает поток к телу, равный примерно 400 Вт. Эта величина меньше потока, обусловленного излучением (1,2 кВт).

Итак, вместе эти два механизма теплопроводности создают тепловой поток к телу примерно 1,6 кВт. (Заметим, что бытовые электроприборы: утюг и чайник имеют мощности равные 1 кВт и 2 кВт соответственно.)

При вдыхании воздуха, человек тоже получает тепло, но этот механизм, как мне кажется, не является столь же существенным, как излучение и теплопроводность, впрочем, читатели могут самостоятельно оценить его вклад в «общее дело». Поверхность кожи человека в парилке имеет температуру T_T

более высокую, чем нормальная температура внутри человеческого тела ($T_0 \approx 37^\circ C$). За счет этого организм начинает нагреваться. Теплоемкость

тела очень большая, поэтому температура внутри поднимается медленно.

Чтобы не повредилась кожа и ткани, примыкающие к ней, организм приводит в действие несколько защитных механизмов. В первую очередь расширяются кровеносные сосуды, при этом потоком крови слои, примыкающие к поверхности, охлаждаются. Скорость поступления теплоты за счет механизма теплопроводности в коже пропорциональна разности температур $\varphi(T_T - T_0)$.

Чтобы не перегреться, организм человека включает третий главный механизм теплопередачи, работающий в природе: механизм испарения – конденсации. На поверхности кожи имеются поры, сквозь которые выделяется жир и пот.

Кстати, следует сказать, что собаки в жару не потеют, зато им приходится учащать дыхание и отводить тепло за счет испарения жидкости внутри легких и на языке.

Капельки покрывают все тело человека. Тепловая мощность, поступающая снаружи, частично идет на испарение воды, а частично поступает внутрь тела:

$$W_1 + W_2 = \lambda \frac{dM}{dt} + \varphi(T_T - T_0).$$

Здесь λ – удельная теплота испарения воды.

Оценим максимальную мощность, которую человек может отводить от своего тела посредством механизма испарения. Для этого рассмотрим подробнее испарение воды с поверхности. Вблизи поверхности тела влажность воздуха близка к 100%, а на удалении от него на некоторое расстояние d уже равна влажности окружающего воздуха. При разности концентраций молекул воды в окружающем воздухе с влажностью α от мокрой поверхности тела возникает диффузионный поток молекул:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{DS}{d} \left[\frac{P_{nn(T_T)}}{kT_T} - \frac{\alpha P_{nn(T_B)}}{kT_B} \right].$$

Здесь D – это коэффициент диффузии молекул воды в воздухе.

$P_{nn(T_T)}$ – это давление насыщенного пара воды при температуре T_T .

$P_{nn(T_B)}$ – это давление насыщенного пара воды при температуре T_B .

В квадратных скобках стоит разность концентраций молекул воды вблизи тела и в окружающем воздухе.

Этому диффузионному потоку молекул воды соответствует испаряющаяся в единицу времени масса воды:

$$\frac{dM}{dt} = m \frac{dN}{dt} = \frac{\mu}{A} \frac{dN}{dt}.$$

Здесь m – масса одной молекулы,

μ – молярная масса воды 0,018 кг/моль,

A – число Авогадро.

На ее испарение требуется мощность:

$$W_{\text{испарен}} = \frac{\lambda \mu DS}{Rd} \left[\frac{P_{\text{ин}}(T_T)}{T_T} - \frac{\alpha P_{\text{ин}}(T_B)}{T_B} \right]$$

Коэффициент теплопроводности воздуха при постоянном давлении и коэффициент диффузии молекул воды в воздухе при постоянном давлении возрастают с ростом температуры. Для приблизительных расчетов в интересующем нас диапазоне температур ($60^\circ\text{C} - 120^\circ\text{C}$) можно считать, что:

$$D = 2,3 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right).$$

$$\delta = 0,034 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}.$$

$$\lambda = 2,4 \times 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Эти данные взяты из справочника физических величин.

Чтобы оценить толщину слоя воздуха d , через который идет диффузия молекул, и процесс теплопередачи посредством теплопроводности, нужно построить модель, связанную с конвекцией (и, соответственно, с вязкостью воздуха). Для упрощения модели примем, что «холодное» тело имеет форму цилиндра высотой $H = 70$ см и диаметром $\Phi = 30$ см. Теплообмен происходит только на боковых стенках цилиндра. Будем считать, что прилегающий к холодному цилиндру снаружи слой воздуха толщиной d , которую еще предстоит вычислить, движется вниз с характерной скоростью V , которая нам пока тоже не известна. За время прохождения мимо цилиндра температура «горячего»

воздуха опускается от T_B до $\frac{(T_T + T_B)}{2}$. Средняя температура воздуха в

движущемся вокруг цилиндра кольце воздуха равна:

$$T_{\text{средн}} = \frac{T_B + \frac{T_B + T_T}{2}}{2} = \frac{3T_B}{4} + \frac{T_T}{4}.$$

Средний за время движения вдоль стенки цилиндра градиент температур, за счет которого воздух охлаждается, равен:

$$\frac{T_{\text{средн}} - T_T}{d} = \frac{T_B - T_T}{4d}.$$

Скорость движения слоя воздуха связана с разностью статических давлений и определяется вязкостью воздуха.

Понятно, что модель сильно упрощена. Слова «характерная скорость» означают, что вблизи тела на разных расстояниях от него скорости воздуха различные. Проведенные рассуждения и оценки дадут, может быть, только правильный порядок величин. Каков характер течения воздуха около человека в парилке можно проверить только экспериментально.

Попробуем использовать описанную модель.

Первое условие: скорость движения воздушного потока, вязкость воздуха и разность плотностей окружающего воздуха и средней плотности воздуха в потоке связаны соотношением:

$$\frac{(\pi H \Phi) \eta V}{d} = g d (\pi H \Phi) [\rho_{\text{средн}} - \rho_{\text{окр}}].$$

В скобках выделена площадь боковой поверхности цилиндра. Отсюда следует:

$$V = g \frac{d^2}{\eta} [\rho_{\text{средн}} - \rho_{\text{окр}}].$$

Второе условие: за время прохождения мимо холодного цилиндра поток

воздуха охлаждается до температуры $\left(\frac{3T_B}{4} + \frac{T_T}{4} \right)$, отсюда следует:

$$(\pi H \Phi) \delta \frac{T_B - T_T}{4d} \times \frac{H}{V} = C_p \times \frac{\rho_{\text{средн}} \times d \times (\pi H \Phi)}{\mu} \times \frac{T_B - T_T}{4}.$$

Комбинируя эти два условия, получаем:

$$d^4 = \frac{\delta \mu \eta}{g C_p \rho_{\text{средн}} (\rho_{\text{средн}} - \rho_{\text{окр}})}.$$

Для модельного (цилиндрического) «человека» в парилке получается:
 $d \approx 0,8$ см.

Заметим, что мы получили толщину слоя, совпадающую по порядку с величиной (1 см), которую мы использовали при оценке потока тепла, связанного с теплопроводностью воздуха.

В самом лучшем случае, когда поверхность всего тела мокрая и имеет температуру 40°C, и влажность окружающего воздуха α равна нулю, мощность, идущая на испарение воды, будет равна:

$$\frac{\lambda \mu D S}{R d} \left[\frac{P_{m(T_T)}}{T_T} - \frac{\alpha P_{m(T_B)}}{T_B} \approx 400 \text{ Вт} \right]$$

Ясно, что испарение воды только частично облегчает ситуацию.

Если снаружи парилки (на улице) температура 20°C при влажности воздуха 50%, то в сухой парилке влажность воздуха при 120°C будет равна всего 0,6%. Максимальная скорость испарения жидкости при мощности 0,4 кВт должна быть равна примерно 0,2 г/с. Предположим, что это количество составляет около 30% от всего количества пота, выделяемого человеком, (остальное попадает на пол), тогда он должен терять примерно 40 граммов жидкости за минуту. Вот почему спортсмены, желающие перейти из тяжелой категории в более легкую весовую категорию, сбрасывают вес в парной.

По нашей оценке мощность теплового потока снаружи равна 1,6 кВт, следовательно, оставшиеся 1,2 кВт идут на нагрев всего тела. Достаточно, чтобы влажность окружающего воздуха стала равной 4,6%, чтобы испарение воды с кожи вообще прекратилось. А при еще большей влажности окружающего воздуха испарение сменится на конденсацию. Вот так! – Вода не испаряется с поверхности тела, а наоборот – конденсируется на ней из воздуха! Это ведет к выделению энергии на поверхности тела. Кровь не успевает отводить внутрь тела поток теплоты, идущий снаружи. В итоге можно сильно «обварить» паром кожу! Как видно, уже небольшое увеличение влажности (до 10%) приводит к сильному эффекту: на коже дополнительно выделяется тепловая мощность около 400 Вт. В еще более влажной парилке температуру в 120°C выдержать просто невозможно.

Механизм испарения-конденсации действует и в такой известной ситуации: для поднятия температуры воздуха в парилке некоторые «любители» плещут воду на нагретые камни. После такого полива, они обычно сразу выбегают наружу: воздух становится «обжигающим». Теперь нам понятно, что это водяные пары из воздуха конденсируются на поверхности тела человека, и тут уж не до рекорда: спасайся, кто как может!

С. Варламов

2 ноября 2003 г.