

юсь), с большой долей уверенности можно сказать: мы ощущаем изменение теплоотвода или теплопритока по сравнению с обычным. Между прочим, при одной и той же достаточно высокой температуре (но не такой, чтобы обжечься, экспериментируя) металл кажется значительно горячее, чем, скажем, дерево. А холодный металл кажется холоднее дерева. Теплопроводность металла значительно больше теплопроводности дерева. А в воздухе...

Давайте сравним перенос тепла за счет ветра, т.е. за счет упорядоченного перемещения частиц газа, с настоящей теплопроводностью. Пусть скорость ветра есть v_v . Плотность потока тепла, переносимого ветром, по порядку величины равна Wv_v , где W – количество тепловой энергии в единице объема газа ($C = \Delta W/\Delta T$ – помните?). Сравнивая Wv_v с плотностью потока тепла из выражений (2) и (3'), видим, что при равенстве плотностей потоков скорость ветра должна быть равной величине

$$v_T = \frac{C}{W} l \bar{v} \left| \frac{\Delta T}{\Delta x} \right|.$$

Оценка скорости изменения температуры проста: $\Delta T/\Delta x \approx \delta T/L$, где δT – разность температур на расстоянии L ; $C/W \approx 1/T$ (см. определение теплоемкости). Итак,

$$v_T = \bar{v} \frac{l}{L} \frac{\delta T}{T}.$$

Большая это скорость или маленькая? Естественно посчитать ее для воздуха. Массы молекул N_2 и O_2 (основных составляющих воздуха) близки. Примем их равными $m \approx 6 \cdot 10^{-26}$ кг. Тогда

$$\bar{v} \approx \sqrt{\frac{kT}{m}} \approx 10\sqrt{T} \text{ (м/с)}.$$

Длина свободного пробега l частиц газа тем больше, чем меньше размер молекул газа и меньше число молекул в единице объема n . Нетрудно оценить:

$$\frac{1}{l} \approx na^2,$$

где a – размер молекулы (как правило, это несколько ангстрем, т.е. $\sim 10^{-10}$ м). В газе при нормальных условиях $n = p/(kT) \sim 10^{25}$ $1/\text{м}^3$. Отсюда $l \sim 10^{-5}$ м. Остается выбрать оценку для $\delta T/L$. Конечно, оценка существенно зависит от конкретных условий: в комнате перепад темпера-

туры 1°C бывает на расстоянии метров, а вокруг человеческого тела (с температурой $\sim 37^\circ\text{C}$) есть тонкий слой (~ 1 мм), в котором происходит изменение температуры иногда на десятки градусов.

При самых оптимистических оценках – при $\delta T \sim 1^\circ\text{C}$, $L \sim 3$ м – скорость переноса тепла по комнате составляет $v_T \sim 10^{-4}$ м/с. Реальные ветерки, которые дуют в комнате, если она не плотно закупорена, имеют значительно большую скорость, и, следовательно, главный механизм переноса тепла – движение воздуха. Это, пожалуй, было и так очевидно: кто не знает, что можно выстудить комнату, неплотно прикрыв форточку. А когда «работает» исключительно теплопроводность (потоков воздуха нет, форточка плотно закрыта), то в комнате при той же работе отопления очень тепло.

Итак, теплопроводность – медленный процесс, что и не удивительно: частицы движутся хаотически и лишь благодаря многократным случайным столкновениям из теплой области попадают в холодную. Не то что при направленном потоке частиц, когда они движутся как бы организованно. Конечно, в потоке они движутся хаотически, но в среднем – все, как одна, со скоростью, значительно, как правило, превышающей v_T .

Для теплообмена на поверхности тела человека, когда $\delta T \sim 10^\circ\text{C}$ и $L \sim 1$ мм, для скорости переноса тепла получаем $v_T \sim 1$ м/с. Скорость небольшого ветра $v_v \approx 2 - 4$ м/с ненамного превышает скорость v_T . Так почему же на ветру нам становится заметно холоднее? Видимо, при анализе наших ощущений важную роль играют какие-то не учтенные нами факторы. Прежде всего, в ветреную погоду заметно возрастает интенсивность испарения влаги с поверхности тела, что, естественно, охлаждает кожу. Кроме того, ветер сдувает теплый слой воздуха, который в отсутствие ветра окружает кожу и заметно замедляет процесс теплообмена (за счет увеличения L).

Но поток сознания пока не позволяет перейти к «космической» теме. Вспомнилась одна из задач П.Л.Капицы, которую (как и многие другие) он предлагал поступающим в аспирантуру. Задача формулируется чуть игриво, но прелесть ее, конечно, в

физике дела. Чтобы сформулировать задачу Капицы, вернемся к уравнениям, описывающим законы сохранения: тепла – уравнение (1), частиц – уравнение (1'). Последнее уравнение описывает движение растворенных в среде чужеродных частиц. Если никакие механические силы на частицы не действуют, то изменение числа частиц в элементе объема ΔV связано только с «желанием» однородно распределиться по телу. Поэтому

$$j_x = -D \frac{\Delta n}{\Delta x}, \quad (2')$$

(мы, как и раньше, считаем, что концентрация n зависит только от координаты x). Мы специально не присвоили этому уравнению новый номер, чтобы подчеркнуть его сходство с уравнением (2) (аналогично сходству между уравнениями (1') и (1)). Коэффициент пропорциональности D между $\Delta n/\Delta x$ и плотностью потока частиц j_x называется *коэффициентом диффузии*.

Уравнения (1') и (2') описывают диффузию – случайное блуждание растворенных в теле частиц, которое приводит к движению против градиента их плотности: частицы в среднем движутся туда, где их меньше. Если в теле есть нагретая область (в ней температура больше, чем во всем теле) или область с большой концентрацией растворенных частиц, то постепенно тепло (температура) и/или частицы будут распространяться по всему телу. Из-за того что это – случайный процесс (каждое единичное перемещение происходит в случайном направлении на величину порядка l), диффузия, как и теплопроводность, – медленный процесс. Особенно медленно диффузия происходит в твердом теле, где для перемещения из одной позиции в другую частица должна преодолеть потенциальный барьер.

Раз уравнения, описывающие теплопроводность и диффузию, одинаковы, то должны быть (и есть) общие черты у этих явлений. Например, оба эти явления обладают любопытным (и очень важным) свойством *подобия*, которое мы сформулируем на примере теплопроводности. Пусть разные части тела с характерным размером L находятся в начальном моменте при различных температурах. Как оценить характерное время τ , за которое температуры практически выровняются (разность темпе-