

ратур уменьшится в несколько раз)? Оказывается, это время зависит от L и от коэффициента температуропроводности $\chi = \lambda/C$:

$$\tau = \frac{L^2}{\chi}. \quad (4)$$

Аналогично, для процесса диффузии

$$\tau = \frac{L^2}{D}. \quad (4')$$

В самом деле, плотность потока оценивается как $q_x \sim \Delta T/L$, для градиента получаем оценку $\Delta q_x/\Delta x \sim q_x/L \sim \Delta T/L^2$, а скорость изменения температуры оцениваем как $\Delta T/\Delta t \sim \Delta T/\tau$. Из уравнения (1) получаем

$$C \frac{\Delta T}{\tau} \sim \frac{\Delta T}{L^2}, \text{ и } \tau \sim \frac{L^2}{\chi}.$$

Оказывается, если перейти к безразмерным координатам и времени, сделав замену $t' = t/\tau$ и $x' = x/L$, то в уравнениях теплопроводности и диффузии исчезают коэффициенты χ и D (если τ и L связаны соотношениями (4) или (4')), и эти уравнения приобретают абсолютно одинаковый вид! При этом если увеличить в b раз пространственный масштаб, то временной масштаб надо увеличить в b^2 раз – в этом и заключается подобие.

Теперь – задача Капицы. За столом достаточно большого кабинета сидит профессор. Дверь открыта. В дверь заходит студентка для сдачи экзамена. Стоящий рядом с ней непременно уловил бы запах духов, которыми она пользуется. Увидев, что профессор что-то читает, студентка смущенно останавливается и стоит в ожидании того, что профессор поднимет голову и пригласит ее к столу. Спрашивается, через какое время профессор поднимет голову, почувствовав запах духов? Вот и все.

П.Л.Капица, давая задачи, разрешал пользоваться чем угодно: в распоряжении экзаменуемого была библиотека Института физических проблем. Даже советоваться можно было с кем угодно, кроме своего будущего руководителя (по-видимому, П.Л. считал, что будущий аспирант должен показать умение получать информацию, находить ее, а у своего руководителя получить консультацию легче легкого).

Эта задача – с подвохом. Многим кажется, что речь идет о диффузии. И сдающий экзамен пытался разыскать значение коэффициента диффузии в воздухе тяжелых молекул (именно они ответственны за аромат). В действительности, время, которое нужно тяжелым молекулам, чтобы обнаружить себя около профессора, определяется движением воздуха в кабинете – *конвективными потоками*. И правильное решение задачи начинается с выяснения условий в кабинете: открыты ли окна – если дело происходит летом, включены ли батареи – если зимой. Иными словами, надо выяснить, какова причина движения воздуха, оценить скорость движения, а время уже определяется тривиально: зная эту скорость и расстояние от стола до двери.

Думаю, что сказанное раньше (правда, о переносе тепла, а не о диффузии) объясняет, почему нужно в этом случае решать задачу не о диффузии, а о движении воздуха (на ученом языке – задачу газодинамики): диффузия тоже медленный процесс – как и теплопроводность.

Теперь, похоже, можно переходить к нагретой пластине в космосе. Итак, в космическом пространстве, вне воздействия источников тепла (Солнца, например) оказалась пластина, нагретая до температуры T_0 . Как будет происходить ее охлаждение?

Первое, что заставляет задуматься, это отсутствие передающей среды вокруг пластины, т.е. среды, которая могла бы унести тепло от пластины. То, что мы обсуждали раньше, сводилось к растеканию тепла, т.е. к вовлечению в тепловое движение «новых» участков тела (твердого, жидкого или газообразного). Но ведь теперь вокруг пластины нет ничего. О каком тепле можно говорить? Вопрос правильный, и ответ на него есть: *охлаждение нагретой пластины происходит за счет излучения ею электромагнитных волн*.

Откуда электромагнитные волны? Ведь нет, вроде, никакого источника электромагнитного поля. Последнее – неверно. Атомы и молекулы состоят из заряженных частиц. Возбуждаясь за счет теплового движения, они имеют возможность, переходя в более низкое энергетическое состояние, испустить фотоны – из-

лучить электромагнитные волны. При любой температуре в теле есть фотоны. Их вклад в тепловую энергию тела (в тепло) пренебрежимо мал по сравнению с вкладом, например, фононов; настолько мал, что не следует его учитывать при вычислении теплоемкости тела. Но только фотоны могут унести энергию тела, если оно находится в пустоте. Именно излучение фотонов определяет здесь поток тепла. Количество излученного из тела тепла очень резко зависит от температуры:

$$q_x = \sigma T^4,$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, коэффициент, носящий имя двух физиков, сформулировавших закон излучения (Йозеф Стефан, 1835 – 1893; Людвиг Больцман, 1844 – 1906; первый – экспериментатор, второй – теоретик). Ее значение порядка $6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Смысл этой величины выяснил Макс Планк (ему принадлежит введение постоянной $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, знаменующее начало квантовой революции). Согласно Планку,

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 (2\pi\hbar)^3},$$

где c – скорость света.³ Конечно, раздумывая об остывающей пластине, я знал формулу Планка. Одно из обстоятельств, которое привело меня, в конечном итоге, к желанию написать эту статью, «пересечение» квантового и классического подходов. Уравнение теплопроводности может быть выведено без привлечения квантовой механики и в него входят величины, имеющие прозрачный классический (неквантовый) смысл, а граничное условие – в случае остывания в пустоте – нельзя сформулировать, не привлекая кван-

³ Строго говоря, коэффициент σ описывает излучение абсолютно черного тела, хорошей моделью которого является небольшое отверстие, связывающее полость в теле с внешним миром. Отверстие все поглощает, ничего не отражая. Это – определяющее свойство абсолютно черного тела. Для реальных тел в коэффициент σ надо ввести множитель, который называют коэффициентом серости. При уровне точности наших оценок его можно не учитывать. В наше время термин «коэффициент серости» часто использовался для шуток, не всегда безобидных.