

секунд. В этих единицах постоянная Стефана равна:

$$\sigma = \frac{1,355 \cdot 10^{-12}}{1000} \cdot 100^2 \cdot 60 \cdot 60 = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ ккал/м}^2 \text{ час} \cdot \text{град}^4.$$

Формулу для вычисления стационарной потери энергии на излучение обычно записывают для удобства так:

$$Q \approx A \cdot 4,9 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] St \text{ ккал} \quad (5)$$

(здесь t — число часов и S выражено в м^2).

Стефано-Больцманов закон охлаждения может быть упрощен, если разность $T - T_0$ равняется небольшому числу ΔT градусов. Тогда

$$\begin{aligned} \delta Q &= A\sigma [(T_0 + \Delta T)^4 - T_0^4] S dt = \\ &= A\sigma [4T_0^3 \cdot \Delta T + 6T_0^2 \cdot (\Delta T)^2 + 4T_0 \cdot (\Delta T)^3 + (\Delta T)^4] S dt. \end{aligned}$$

Так как внутри скобок каждый следующий член значительно меньше предыдущего, то приближенно можем записать:

$$\delta Q = A \cdot 4\sigma T_0^3 (T - T_0) S dt. \quad (6)$$

Это — *ньютонів закон охлаждения тел*. Он гласит, что при небольшой разности температур между телом и окружающей средой секундный расход энергии тела пропорционален разности температур. Исходя из этого закона, путем интегрирования можно вывести зависимость между температурой тела и временем. Эта зависимость выражается так:

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) e^{-at}, \quad (7)$$

где T_1 — начальная температура тела, t — время, протекшее от начала охлаждения тела, a — постоянная величина.

§ 91. Теплопроводность (закон Фурье)

Рассмотрим процесс передачи внутренней энергии от тела к телу, например от пламенных газов топки к воде парового котла. Внутренняя энергия пламенных газов, омывающих железный котел, передается стенкам котла главным образом посредством лучистой энергии. Но отчасти передача энергии происходит здесь еще иным путем. Обладающие в среднем очень большой кинетической энергией молекулы газов, сталкиваясь с молекулами стенок котла, передают им часть своей энергии. Таким образом, молекулы, лежащие в наружном слое стенок, получают большую против прежнего энергию: с одной стороны, за счет поглощаемых ими квантов, с другой — за счет механической передачи кинетической энергии. Обоими этими способами, и теперь уже преимущественно вторым из них, будет передаваться энергия и дальше, все к более и более глубоким слоям

стенок. В самом деле, атом железа, поглотивший квант, через некоторое (очень короткое) время наверное отдаст его некоторому другому атому. Кроме того, возможны и столкновения одних атомов с другими, в результате чего атомы более быстрые будут вообще терять энергию, а атомы более медленные — приобретать ее. И так как наружная поверхность стенок находится при более высокой температуре, чем внутренняя, то мы все время будем иметь внутри стенок поток энергии, передающейся по тому направлению, вдоль которого имеет место постепенное снижение температуры. В данном случае это направление будет совпадать с направлением нормали к стенкам.

Такой процесс постепенного перемещения энергии благодаря разности температур на двух поверхностях тела может происходить как в твердом веществе, так и в жидком и в газообразном. Описанный процесс принято называть *теплопроводностью*. Точный подсчет явлений теплопроводности делается на основе следующего закона Фурье: количество энергии (обычно называемое «количеством тепла») δQ , проходящее за элемент времени dt через взятую внутри тела площадку dS , нормальную к той линии l , вдоль которой течет поток энергии, пропорционально времени dt , площадке dS и температурному «градиенту» $\frac{dT}{dl}$, где T — температура. Если буквой k назовем коэффициент пропорциональности, то закон теплопроводности выразится такой формулой¹⁾:

$$\delta Q = k \frac{dT}{dl} dS dt. \quad (8)$$

Множитель k называют *коэффициентом теплопроводности*. Из приведенной формулы видно, что коэффициент теплопроводности в абсолютной системе единиц измеряется числом калорий, которое «протекает» в рассматриваемом веществе за 1 сек. через площадку площадью в 1 см^2 (нормально к потоку энергии) при температурном градиенте, равном 1° на 1 см .

В технических расчетах пользуются обычно другой системой единиц и записывают закон теплопроводности для стационарного потока энергии (при неизменяющемся во времени градиенте температуры) в виде такой формулы:

$$Q = K \frac{T_2 - T_1}{l} S t \text{ ккал.} \quad (9)$$

Здесь Q означает количество теплоты (выраженное в ккал), протекающее в течение t часов через стену площадью $S \text{ м}^2$

¹⁾ О понятии градиента см. примечание на стр. 139. Следует обратить внимание на формальную аналогию между законом теплопроводности и законом Ома: $q = k \frac{V}{l} S t$, где q — количество электричества, протекшее за время t под действием разности потенциалов V по проводнику, имеющему длину l , поперечное сечение S и электропроводность k .

и толщиной l м при разности температур на противоположных поверхностях стены $T_2 - T_1$.

Нетрудно сообразить, что если в формуле (8) δQ выражено в калориях, температурный градиент измерен в градусах на 1 см, площадь dS измерена в кв. сантиметрах и время dt — в секундах, то коэффициент k в этой формуле будет связан с коэффициентом K в формуле (9) таким соотношением:

$$k = \frac{K}{360}.$$

Коэффициенты теплопроводности

	K (в ккал/м·час·град)	κ (в кал/см·сек·град)
Железо	40—60	0,11—0,17
Медь	260—340	0,7 —0,95
Кирпич	0,3—0,4	—
Дерево	0,1—0,4	—
Пробка, опилки	0,05	—
Вода, стекло	0,5	0,0014
Газы	0,02—0,04	$5 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-4}

Одним из лучших теплоизоляционных материалов является стеклянный войлок. При одинаковых условиях теплопередача через стеклянный войлок в $3\frac{1}{2}$ раза меньше, чем через асбест, и в 20 раз меньше, чем через кирпичную кладку.

В примере, упомянутом в начале параграфа, мы встречаемся еще с одним способом распространения внутренней энергии.

Энергию, переданную сквозь стенки котла, получает вода. Главную роль в передаче теплоты от более нагретых стенок котла к менее нагретой воде играют столкновения молекул. Понятно, что прежде всего увеличится запас внутренней энергии, а следовательно, повысится температура тех слоев воды, которые непосредственно прилегают к стенкам; повышение температуры повлечет за собой расширение этих частей воды и подъем их кверху; их место заполнят пришедшие сверху более холодные части воды. Будет иметь место круговорот воды, содействующий выравниванию ее температуры. Мы видим, что здесь перенос внутренней энергии происходит вместе с переносом тех частей жидкого вещества, которые обогатились внутренней энергией по сравнению с другими частями. Такой способ распространения внутренней энергии называют *конвекцией*.

Понятно, что конвекция внутренней энергии возможна только в телах жидких и газообразных. Понятно также, что роль конвекции является существенной лишь в том случае, если нагревание происходит снизу, а охлаждение — сверху (исключение — вода ниже 4°C).

В примере воды, нагреваемой в котле, некоторое количество внутренней энергии передается через воду путем теплопроводности воды, но это количество крайне незначительно в сравнении с тем количеством энергии, перенос которого производится путем конвекции.

В отличие от всех остальных жидкостей жидкий гелий, так называемый «жидкий гелий II», при крайне низких температурах (ниже $2,19^{\circ}\text{K}$) обладает аномально большой теплопроводностью, равной $190 \text{ кал} \cdot \text{град}^{-1} \text{ см}^{-1} \text{ сек}^{-1}$. Измерения П. Л. Капицы (в 1938 г.) показали, что жидкий гелий II обладает также чрезвычайно малой вязкостью (вязкость жидкого гелия II в миллион раз меньше вязкости газообразного водорода). Аномально большую теплопроводность жидкого гелия II можно объяснить тем, что благодаря малой вязкости (*сверхтекучести*) в жидком гелии II чрезвычайно легко образуются конвекционные потоки, которые и осуществляют перенос тепла.

§ 92. Диффузия (закон Фика)

В предыдущих параграфах были рассмотрены характерные черты молекулярно-теплового движения, тепловое равновесие и процессы, происходящие, когда тепловое равновесие нарушено (излучение, теплопроводность и конвекция). Все это еще не дает, однако, полного представления о молекулярно-тепловом движении. Мы должны обратиться к явлению диффузии — к явлению, которое обязывает нас перейти от понятия теплового равновесия к понятию термодинамического равновесия.

Диффузией называется обусловленный хаотическим движением молекул процесс постепенного взаимного проникновения двух веществ, граничащих друг с другом. Один из первых опытов по исследованию диффузии был сделан немецким физиком Лошмидтом. Он взял две стеклянные трубки, закрытые с одного конца, имевшие в длину около полметра, в диаметре $2,5 \text{ см}$; одну трубку он наполнил углекислым газом, а другую — водородом и поместил их в вертикальном положении так, что открытые концы трубок соприкасались. При этом трубка с углекислым газом была внизу (последнее было необходимо для того, чтобы смешение обоих газов происходило лишь вследствие молекулярных движений, а не вследствие различной тяжести этих газов). Содержимое трубок было исследовано через полчаса; оказалось, что в верхнюю трубку проникло из нижней 37% углекислого газа.

Если бы молекулы газа вообще не сталкивались, то благодаря своим большим скоростям они уже за малую часть секунды пробежали бы значительные расстояния по прямой линии. Поэтому процесс смешения двух газов, соприкасающихся друг с другом, шел бы чрезвычайно быстро. Опыт Лошмидта показывает, что в действительности диффузия газа происходит не особенно быстро. Это видно уже из обыденных явлений: например, если в одном углу комнаты