

ГЛАВА XV

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, ДИФФУЗИЯ И ВЯЗКОСТЬ. ВАКУУМ

§ 90. Тепловое излучение (законы Стефана и Ньютона)

Тепловое равновесие тела наблюдается, когда температура во всех точках тела одинакова. Если это условие не выполнено или если имеется причина, изменяющая температуру хотя бы на поверхности тела, то равновесия не будет, и происходит передача энергии от мест с более высокой температурой к местам более холодным.

Рассмотрим конкретный случай. Пусть железный котел содержит внутри холодную воду, а снаружи омывается пламенными газами топки. Часть внутренней энергии этих газов будет передаваться железным стенкам котла, часть внутренней энергии железных стенок в свою очередь будет передаваться воде; наконец, в воде возникнет интенсивная передача энергии от одних мест к другим, сопровождаемая движением частей самой воды.

Мы встречаемся здесь с несколькими способами передачи энергии: 1) путем «излучения» (так главным образом происходит нагрев стенок котла пламенем); 2) путем «теплопроводности» (так происходит передача энергии через толщу стенок котла); 3) путем конвекции (без конвекции нагревание воды стенками котла протекало бы крайне медленно). Эти три способа передачи энергии объединяют в одном понятии — *передача энергии в форме тепла*.

При высоких температурах атомы всех тел обладают способностью сильно излучать, т. е. испускать в форме так называемых квантов значительное количество энергии — *лучистой энергии*. Каждый *квант* представляет собой систему волн, характеризующуюся определенной частотой; однако распространение в пространстве этой системы волн и взаимодействие этой системы волн с атомами происходит так, как если бы квант представлял собой материальную частицу, обладающую известной массой. Такая двойственность (дуализм) природы кванта является его характерной особенностью. Имея в виду те свойства, которые присущи кванту как материальной частице, квант излучения, т. е. световую частицу, называют *фотоном*¹⁾.

¹⁾ От греческого phos (photos) — свет.

Фотоны летят (в пространстве, не содержащем молекул или содержащем лишь малое количество их, например в слабо сжатом газе) по прямым линиям со скоростью $c=3 \cdot 10^{10}$ см/сек («скорость света»); путь фотона есть то, что в оптике называется лучом. Количество энергии одного кванта всегда выражается формулой

$$\epsilon = h\nu, \quad (1)$$

где ν — частота, свойственная кванту, h — так называемая *постоянная Планка*. Если ϵ выражать в эргах, ν — в герцах (т. е. числа колебаний в 1 сек.), то h будет иметь размерность произведения эргов на секунды (величины, имеющие размерность произведения энергии на время, носят название *действия*):

$$h = 6,625 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

Попадая на поверхность какого-нибудь тела, квант может отразиться от нее, но если эта поверхность не является «зеркальной», то вероятнее всего квант будет поглощен каким-нибудь из поверхностных атомов тела, и его энергия пойдет на увеличение запаса внутренней энергии тела. Обычно поглощение телом большого числа квантов вызывает повышение температуры тела.

Всякий раз, когда имеются тела различной температуры, разделенные большим или малым расстоянием, между ними происходит передача энергии путем излучения; более нагретое тело теряет энергию, менее нагретое приобретает ее. Не нужно, однако, думать, что тело более нагретое только теряет энергию, а тело менее нагретое только приобретает ее. Процесс этот на самом деле — взаимный; тело менее нагретое также излучает; излучаемые им кванты, попадая на тело более нагретое, поглощаются им. Но в общем итоге более горячее тело испытывает потерю энергии, тогда как энергия более холодного тела возрастает.

Существует весьма важный закон, выведенный теоретически и подтвержденный экспериментально, который позволяет подсчитывать количество энергии, излучаемой телом. Этот закон выражается формулой

$$\mathcal{E} = \sigma T^4, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура излучающего тела, \mathcal{E} — количество лучистой энергии (в эргах), испускаемое 1 см² поверхности тела в 1 сек., σ — постоянная величина (*постоянная Стефана*):

$$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/см}^2 \text{сек} \cdot \text{град}^4.$$

Если излученную энергию \mathcal{E} измерять не в эргах, а в калориях, то

$$\sigma = 1,355 \cdot 10^{-12} \text{ кал/см}^2 \text{сек} \cdot \text{град}^4.$$

Согласно формуле (2) *интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры*; это — закон Стефана — Больцмана.

Закон Стефана — Больцмана (1884 г.) является точным законом природы лишь в том случае, если причиной излучения является нагретость тела, а не какое-либо иное обстоятельство (например, не электрический разряд), и если излучающее тело — *абсолютно черное* (т. е. если оно обладает способностью поглощать всю лучистую энергию, падающую на него извне, ничего не отражая и ничего не пропускающая сквозь себя).

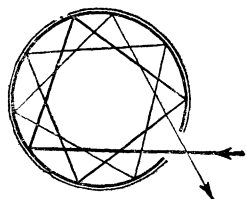


Рис. 193. Модель абсолютно черного тела.

Практическим осуществлением абсолютно черного тела является вычерненная полость внутри твердой оболочки, имеющей небольшое отверстие (рис. 193). Луч света, вошедший через небольшое отверстие в вычерненную изнутри полость, раньше чем он выйдет наружу, должен будет многократно отразиться от стенок полости, и так как каждый раз будет отражена только часть энергии луча, а другая часть будет поглощена стенкой, то в результате почти вся энергия луча окажется поглощенной стенками¹⁾ (вспомним обыденный

факт: глядя издали днем через открытое окно внутрь комнаты, имеющей лишь одно это окно, мы видим внутреннее пространство комнаты темным, почти черным).

Закон Стефана можно применить также и для вычисления энергии, излучаемой любым (а не абсолютно черным) телом. Однако в этом случае уравнение (2) нужно умножить на так называемый *коэффициент теплопоглощения A*, различный для разных тел и (что важно помнить) *зависящий от температуры*:

$$E = A \cdot \sigma T^4; \quad (3)$$

здесь E — энергия, испускаемая 1 см^2 поверхности тела в 1 сек., когда коэффициент теплопоглощения тела равен A (для абсолютно черного тела $A = 1$ и $E = \sigma$; для всех остальных тел A меньше единицы).

В технике часто пользуются некоторыми средними значениями коэффициента теплопоглощения A . Мы приводим таблицу, в которой даны для некоторых тел приближенные значения коэффициента теплопоглощения, пригодные к применению в области температур от 0 до 200°C . Для металлов коэффициент теплопоглощения мал при свежей поверхности металла (при невысоких температурах —

¹⁾ Закопченное тело отражает менее 10% света, падающего на него; следовательно при последовательном пятикратном отражении поглощается более 99,999% энергии луча.

несколько сотых) и значителен при окисленной поверхности; в таблице приведены значения A для окисленных поверхностей металлов, так как на практике только с такими поверхностями и приходится иметь дело.

Металлы при окисленной поверхности	A	Различные вещества	A	Строительные материалы	A
Железо ¹⁾	0,9	Сажа	0,95	Дерево гладкое .	0,8
Сталь	0,8	Стекло	0,90	Камни гладкие .	0,4—0,7
Чугун	0,6	Вода	0,67	Каменная кладка	0,9
Медь ²⁾	0,5	Лед	0,64		
Цинк	0,2	Бумага	0,80	Песок	0,75
Латунь	0,6	Шерсть, шелк . .	0,76	Штукатурка . . .	0,8
Свинец	0,6	Хлопчатобумажная ткань	0,73	Мел	0,85
Алюминий	0,1				
Никель	0,4				

Представим себе две поверхности, каждая с площадью S , противопоставленные друг другу. Одна из них, более нагретая, имеет абсолютную температуру T ; другая, менее нагретая, — абсолютную температуру T_0 . По предыдущему первая поверхность за время dt излучит $A\sigma T^4 S dt$ эрг, но так как от второй поверхности она за то же время получит примерно ³⁾ $A\sigma T_0^4 S dt$ эрг, то в итоге расход энергии первой поверхности за время dt составит:

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

Той же формулой выразится расход внутренней энергии с поверхности тела, имеющего абсолютную температуру T и окруженного воздушной средой, находящейся при температуре T_0 . Эта формула носит название *стефано-больцманова закона охлаждения тел*.

В случае стационарного потока излучаемой энергии (что имеет место при неизменном во времени значении температур T и T_0) формулу (4) можно отнести к конечному промежутку времени t . В технических расчетах выражают обычно расход энергии в *ккал*, площадь S измеряют в m^2 а под t подразумевают число часов, а не

¹⁾ Для железа при блестящей полированной поверхности $A = 0,3$.

²⁾ Для меди при блестящей полированной поверхности $A = 0,13$.

³⁾ При более точном расчете надо учесть коэффициент теплопоглощения второй поверхности, так как от него зависит количество излучаемой ею энергии; если расстояние между поверхностями значительно или площади их неодинаковы, то надо учесть еще какая часть энергии, излученной второй поверхностью, попадет на первую поверхность.

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 — *ньютон*ов 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