

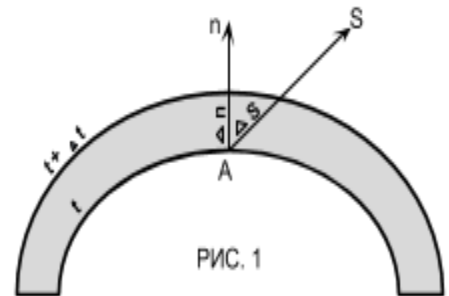
1 ГЛАВА

§1. Теплопроводность. Особенности теплопроводности газов.

В термодинамически неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые явлениями переноса, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, импульса. Явление, обусловленные переносом энергии, называется теплопроводностью; переносом массы - диффузией; импульса - внутренним трением.¹

Рассмотрим две поверхности, каждая точка которых имеет одинаковую температуру (рис. 1). Такие поверхности называются изотермными. Пусть одна поверхность имеет температуру t , а другая $t + \Delta t$

. Перемещаясь из какой-либо точки А, можно обнаружить, что изменение температуры по различным направлениям неодинаково: если перемещаться по изотермной поверхности, то изменения температуры мы не обнаружим; если же перемещаться вдоль какого-либо направления S , то будет наблюдаться изменение температуры. Наибольшую разность температур на единицу длины мы будем наблюдать в направлении нормали к изотермной поверхности. Предел отношения изменения температуры Δt к



расстоянию между изотермами по нормали Δn , когда Δn стремится к нулю, называют градиентом температуры, имеющим размерность [градус/метр].² Стоит отметить, что перенос энергии при теплопроводности происходит в сторону скорейшего убывания температуры, что следует из второго закона термодинамики.

Если в одной области газа температура выше, чем в другой, то можно говорить о том, что средняя кинетическая энергия молекул в этой области больше. С течением времени, вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, то есть, иными словами, процесс выравнивания температур.

¹ Явления переноса в термодинамике [электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.terver.ru/Javlenie_perenosa_v_termodinamike.php, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

² Тепломассообмен: градиент температуры [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://bog5.in.ua/zadachi/teplomassoobmen/teplomassoobm%20kr1%20v1.html>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

Теплопроводность - это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым частям или телам, осуществляемый хаотически движущимися частицами тела.³

Точный подсчёт явлений теплопроводности делается на основе следующего закона Фурье: поток теплоты q , проходящий через взятую внутри тела площадку S , нормальную к той линии l , вдоль которой течёт поток энергии пропорционален площадке S и температурному градиенту $\frac{dT}{dx}$. Если буквой k назвать коэффициент пропорциональности, то получим такую формулу:

$$q = -k \frac{dT}{dx} S \quad (1)$$

Коэффициент k , зависящий от свойств среды, называют коэффициентом теплопроводности. Единицей q служит Вт(ватт), следовательно k измеряется в ваттах на метр-кельвин. Знак минус в правой части уравнения показывает то обстоятельство, что энергия переносится в сторону убывания температуры, о чём было сказано выше.⁴

Тепловым потоком q в формуле является количество теплоты Q , проходящее через площадку S , за некоторое время t . Таким образом, формула для вычисления количества теплоты, проходящего через площадку за определённое время будет носить такой вид:

$$Q = qt \quad (2)$$

Стоит отметить, что данная формула является справедливой только в случае стационарного процесса. То есть вызвавшая перенос энергии разница температур должна оставаться неизменной с течением времени.

§2. Коэффициент теплопроводности идеального газа.

Рассмотрим процесс теплопроводности на примере модели идеального газа.

Если идеальный газ вывести из состояния равновесия, изменив в какой-либо части объёма температуру молекул, то прекращение внешнего

³ Энциклопедия на Академикe: теплопроводность, толкование [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/8691>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

⁴ Явления переноса в термодинамике [электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.terver.ru/Javlenie_perenosa_v_termodinamike.php, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

воздействия повлечёт за собой стремление системы вернуться в равновесное состояние, при котором распределение температур будет равномерным.

Рассмотрим некоторый объём идеального газа, заключённый между двумя параллельными плоскими поверхностями, обладающими различной температурой T_1 и T_2 . В случае постоянства этих температур в исследуемом объёме газа установится стационарный поток теплоты.⁵

Молекулярно-кинетическая теория даёт формулу для потока тепла идеального газа:

$$q = - \frac{1}{3} n m \bar{v} \lambda c_v \frac{dT}{dX} \quad (3)$$

где q - поток тепла, n - концентрация молекул, m - масса молекулы, λ - средняя длина свободного пробега молекул, \bar{v} - средняя квадратичная скорость молекул, c_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме, $\frac{dT}{dX}$ - градиент температуры.

Представив плотность газа ρ как произведение массы газа и концентрации молекул, и сравнив формулу (3) с формулой (1), можем найти значение коэффициента теплопроводности идеального газа:

$$k = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \lambda c_v$$

где ρ - плотность газа, \bar{v} - средняя квадратичная скорость молекул, λ - средняя длина свободного пробега молекул, C_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме.⁶

§3. Среднее значение скорости молекул.

В формуле для коэффициента теплопроводности присутствует величина, называемая средней квадратичной скоростью молекул. Вычислить её несложно; для начала напишем уравнение состояния идеального газа:

$$PV = \nu RT$$

где ν - количество вещества, P - давление газа, V - объём, занимаемый газом, R - универсальная газовая постоянная, T - температура.

⁵ Исаков А. Я. Молекулярная физика и термодинамика. Петропавловск-Камчатский, 2007. - С. 118.

⁶ Савельев И.В. Курс общей физики, т.1. Механика. Молекулярная физика: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - С. 387

Для более лёгких вычислений возьмём количество вещества, равное 1 моль. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории для одного моля вещества:

$$PV = \frac{2}{3}N_A E_k$$

где P - давление, V - объём, занимаемый газом, N_A - число Авогадро, E_k - средняя кинетическая энергия молекул.

Однако в механике существует другая формула для нахождения E_k :

$$E_k = \frac{1}{2}N_A m \bar{v}^2$$

где m - масса молекулы, \bar{v} - средняя квадратичная скорость.

Подставив значение E_k и приравняв уравнения, получим:

$$RT = \frac{1}{3}N_A m \bar{v}^2$$

Учитывая, что $R = \kappa N_A$, уравнение принимает вид

$$\kappa T = \frac{1}{3}N_A m \bar{v}^2$$

Произведение $N_A m$ можно записать как μ (молярная масса). Отсюда скорость \bar{v} будет равна

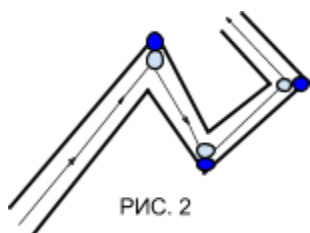
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3\kappa T}{\mu}}$$

Из приведенной формулы следует вывод, что средняя квадратичная скорость молекул, а следовательно и коэффициент теплопроводности газа должны зависеть от температуры.⁷

$$k \sim \sqrt{T} \quad (4)$$

⁷ Средняя квадратичная скорость молекул [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://frutmrut.ru/srednyaya-kvadratichnaya-skorost-molekul>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015

§4. Свободный пробег молекул.



Важным условием для проведения эксперимента является независимость коэффициента теплопроводности от давления. Как уже было сказано ранее, λ - это средняя длина свободного пробега молекул. Под средней длиной свободного пробега понимают среднее расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными соударениями. С увеличением давления газа увеличивается и его плотность, соответственно увеличивается и число молекул, переносящих энергию. Однако молекулы начинают сталкиваться между собой чаще - расстояние свободного пробега уменьшается.

$$\lambda \sim \frac{1}{p}$$

Поэтому в области нормальных давлений изменение давления не влечёт за собой заметного изменения коэффициента теплопроводности.

В достаточно разреженных газах, когда плотность молекул невелика, то длина свободного пробега молекул будет определяться столкновениями молекул не друг с другом, а со стенками сосуда. Такое состояние газа называют высоким вакуумом. Длина свободного пробега молекул в высоком вакууме постоянна и не зависит от давления. Тогда коэффициент теплопроводности зависит от давления так же, как и плотность, то есть прямо пропорционально.⁸

Наш эксперимент будет проводиться при атмосферном давлении, следовательно увеличение давления за счёт нагревания газа не повлечёт за собой каких-либо изменений коэффициента теплопроводности.

⁸ Средняя длина свободного пробега молекул [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://frutmrut.ru/srednyaya-kvadratichnaya-skorost-molekul>, свободный. - Ссылка действительна на 25.05.2015.

Вывод из 1 главы.

Итак, в газах возникают явления переноса. При осуществлении переноса энергии происходит процесс теплопроводности. Формула для расчета потока тепла, проходящего через площадку при переносе, при стационарном процессе определяется законом Фурье.

Молекулярно-кинетическая теория даёт формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа. Эта величина зависит от плотности, средней длины свободного пробега, средней квадратичной скорости молекул и молярной теплоёмкости газа. Средняя квадратичная скорость молекул определяется с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона и зависит от температуры молекул. При существенном нагревании газа будет заметно увеличение его коэффициента теплопроводности. Так как плотность газа зависит от давления прямо пропорционально, а средняя длина свободного пробега - обратно пропорционально, то в области атмосферного давления изменение давления не влечет за собой изменения коэффициента теплопроводности газа.

