

Перенос лучистой энергии в поглощающей среде

Ранее рассматривались вещества, которые не пропускали лучистую энергию ($D = 0$). Они только поглощали и отражали энергию падающего от внешнего источника излучения и являлись, следовательно, непрозрачными средами.

Кроме того, среда может иметь собственное излучение. **Вследствие этого интенсивность излучения I_l вдоль какого-либо направления l будет изменяться.**

Уравнение, определяющее изменение интенсивности луча за счет поглощения, излучения и рассеивания среды, называется *уравнением переноса лучистой энергии*.

Рассмотрим первоначально случай, когда среда является только поглощающей и в ней происходит одномерный перенос энергии излучения внешнего источника; собственное излучение пренебрежимо мало по сравнению с излучением внешнего источника. Интенсивность излучения внешнего источника по мере прохождения через среду от границы до данной точки будет постепенно уменьшаться за счёт поглощения.

На граничной поверхности интенсивность излучения внешнего источника $I_{l,l=0}$ сплошного спектра является заданной величиной.

Требуется определить закон изменения интенсивности излучения по толщине слоя поглощающей среды.

Примем, что интенсивность излучения по отдельным длинам волн при прохождении в направлении l через слой поглощающей среды толщиной dl уменьшается пропорционально этой интенсивности и бесконечно малому пути луча dl :

$$dI_{1,l} = -a_l I_{1,l} dl \quad (1)$$

где a_l – спектральная поглощательная способность среды (аналог коэффициента абсорбции). Она характеризует относительное изменение интенсивности излучения на единицу длины луча.

Выражение (1) является основным законом переноса энергии в поглощающей среде. Его можно представить в виде

$$\int_{I_{1,l=0}}^{I_{1,l}} \frac{dI_{1,l}}{I_{1,l}} = -\int_0^l a_1 dl \quad (2)$$

Полагая, что при $l = 0$ $I_{1,l} = I_{1,l=0}$ (заданная величина), после интегрирования последнего уравнения получаем:

$$I_{1,l} = I_{1,l=0} \exp \left\{ -\int_0^l a_1 dl \right\} \quad (3)$$

Зависимость (3) позволяет найти *спектральную яркость излучения* в каждой точке направления θ для отдельных длин волн.

Интегральная яркость излучения для отдельных полос излучения среды или для всего спектра определяется интегрированием в пределах соответствующих длин волн.

Уравнение переноса лучистой энергии в поглощающей среде позволяет найти ее оптические свойства. По закону поглощения коэффициент поглощения среды для данной длины волны определяется по отношению лучистой энергии, поглощенной (падающая «минус» пропущенная) в слое толщиной l , к энергии, падающей на границу этого слоя:

$$A_l = \frac{I_{l,l=0} - I_{l,l}}{I_{l,l=0}} = 1 - \exp \left\{ - \int_0^l a_l dl \right\} \quad (4)$$

Введем оптическую толщину среды

$$L_l = \int_0^l a_l dl$$

Если спектральная поглощательная способность a_l имеет постоянное значение по длине луча, то оптическая толщина среды будет равна:

$$L_l = a_l l \quad (5)$$

где l – полная толщина слоя среды.

Тогда зависимость (3), выражающая ослабление интенсивности излучения в поглощающей среде, принимает вид:

$$I_{l,l} = I_{l,l=0} \exp\{-L_l\} \quad (6)$$

Уравнение (6) носит название закона Бугера.

Коэффициент поглощения среды в этом случае представится вместо (4) соотношением

$$A_l = 1 - \exp\{-L_l\} \quad (7)$$

В условиях термодинамического равновесия на основании закона Кирхгофа спектральный коэффициент поглощения вещества равен коэффициенту теплового излучения и, следовательно,

$$e_l = A_l = 1 - \exp\{-L_l\} \quad (8)$$

Уравнение переноса энергии в поглощающей и излучающей среде

При прохождении тепловых лучей в поглощающей среде поглощенная энергия переходит в теплоту и снова излучается средой. Выше принималось, что среда лишь поглощает лучистую энергию. **В общем случае интенсивность излучения вдоль луча будет уменьшаться вследствие поглощения, но и увеличиваться за счет собственного излучения.** Тогда вместо зависимости (1) уравнение переноса принимает вид:

$$dI_{1,l} = -a_1 I_{1,l} dl + a_1 I_{s1} dl = (I_{s1} - I_{1,l}) a_1 dl \quad (9)$$

Эту зависимость можно получить из теплового баланса. Лучистая энергия, поглощенная средой в слое толщиной dl как и ранее, равна $a_1 I_{1,l} dl$. Интенсивность собственного излучения можно выразить через интенсивность абсолютно черного тела и спектральную поглощательную способность a_1 как $a_1 I_{s1} dl$.

В частном случае постоянных температур и оптических свойств среды зависимость (9) записывается в виде:

$$I_{l,l} = I_{l,l=0} \exp\{-L\} + I_{sl} (1 - \exp\{-L\}) \quad (10)$$

Или, учитывая $A_l = 1 - \exp\{-L_l\}$,

$$I_{l,l} = I_{l,l=0} (1 - A_l) + I_{sl} A_l \quad (11)$$