

Лекция 25. Законы теплового излучения

Наиболее простыми строгими законами описывается излучение абсолютно черного тела. Эти законы с соответствующими поправками используются для получения расчетных формул теплообмена излучением между реальными телами.

Закон Планка. Испускание энергии по длинам волн происходит неравномерно и зависит от температуры. Зависимость спектральной плотности потока излучения от длины волны и температуры устанавливается законом Планка (1900 г.)

$$E_{0\lambda} = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}, \quad (4.5)$$

где λ – длина волны, м; $c_1 = 5,944 \cdot 10^{-17}$ – первая константа излучения, Вт·м²; $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ – вторая константа излучения, м·К; T – температура тела, К; $E_{0\lambda}$ измеряется в Вт/м³.

Закон Планка получен теоретическим путем. Согласно этому закону каждой длине волны соответствует свое значение $E_{0\lambda}$ (рис. 4.3)

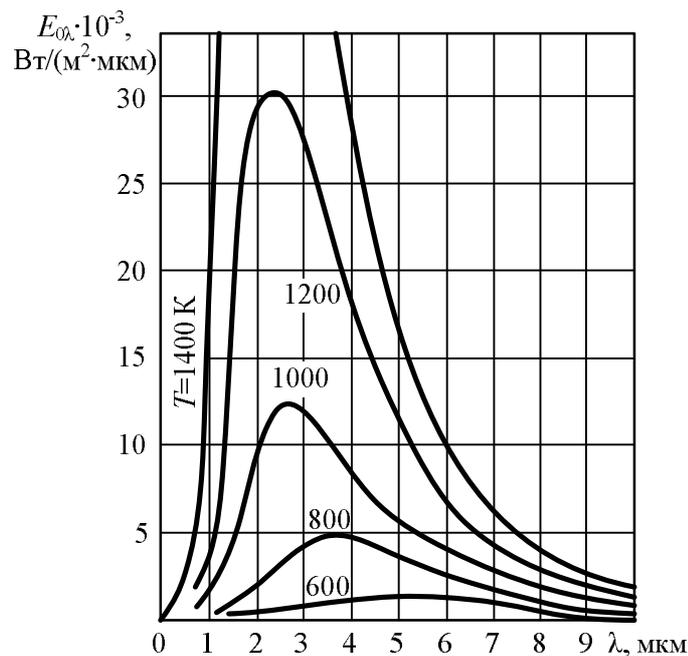


Рис. 4.3. Графическое представление закона Планка

Плотность потока излучения, характеризующаяся отдельными изотермами, проходит через максимум. При $\lambda \rightarrow 0$ и $\lambda \rightarrow \infty$ она стремится к нулю.

Поскольку закон Планка получен для абсолютно черного тела, то по отношению к нечерным телам он выражает максимально возможную плотность потока излучения.

Для нечерных тел спектральный состав излучения кроме длины волны зависит от их физических свойств и определяется экспериментально.

Закон Релея – Джинса. Закон Планка имеет два предельных случая. К одному из них относится случай, когда произведение λT велико по сравнению с постоянной c_2 . При этом можно ограничиться двумя слагаемыми разложения экспоненциальной функции (4.5) в ряд по степеням $c_2 / \lambda T$:

$$e^{\frac{c_2}{\lambda T}} = 1 + \frac{1}{1!} \left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{c_2}{\lambda T} \right)^2 + \dots$$

Пренебрегая членами ряда высшего порядка вместо (4.5) получаем соотношение, выражающее закон Релея – Джинса:

$$E_{0\lambda} = \frac{2c_1 \pi T}{c_2 \lambda^4}.$$

Закон смещения Вина. Второй предельный случай соответствует малому значению произведения λT по сравнению с постоянной c_2 . Тогда в зависимости (4.5) можно пренебречь единицей и она переходит в зависимость, выражающую закон Вина (1893 г.)

$$E_{0\lambda} = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}.$$

Положение максимумов излучения (рис. 4.3) можно получить из экстремального значения функции (4.5). Для этого находится производная функции по длине волны. Приравнивая производную нулю, получаем следующее трансцендентное уравнение:

$$e^{-\frac{c_2}{\lambda_{\max} T}} + \frac{c_2}{5\lambda_{\max} T} - 1 = 0.$$

Решение этого уравнения приводит к соотношению $c_2 / \lambda_{\max} T = 4,965$, откуда

$$\lambda_{\max} T = 2,8978 \cdot 10^{-3}, \quad (4.6)$$

где λ_{\max} – длина волны, которой соответствует максимальная плотность излучения; единица произведения $\lambda_{\max} T$ – м·К.

Зависимость (4.6) выражает закон Смещения Вина. Согласно этому закону максимальное значение спектральной плотности потока излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Значение максимальной плотности потока излучения черного тела может быть найдено из закона Планка (4.5), если положить $\lambda = \lambda_{\max}$ и использовать зависимость (4.6):

$$(E_{0\lambda})_{\max} = c_3 T^5, \quad (4.7)$$

где $c_3 = 1,307 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$.

Из (4.7) следует, что максимальная плотность излучения пропорциональна абсолютной температуре тела в пятой степени.

Закон Стефана – Больцмана. Закон Стефана – Больцмана устанавливает зависимость плотности потока излучения от температуры. Эта зависимость задолго до появления квантовой теории Планка впервые экспериментально (путем измерений собственного излучения модели черного тела) была установлена Стефаном (1879 г.). Позднее (1884 г.) она теоретически (исходя из законов термодинамики) была получена Больцманом. Поэтому закон получил объединенное название Стефана – Больцмана. Закон Стефана – Больцмана может быть получен и при использовании закона Планка. Закон Стефана – Больцмана для поверхностной плотности потока интегрального излучения E_0 , Вт/м², выражается следующим соотношением:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma_0 T^4,$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Для удобства практических расчетов последняя зависимость представляется в виде

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $c_0 = 5,6703 \approx 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – излучательная способность абсолютно черного тела.

Закон Стефана – Больцмана может быть применен к серым телам. В этом случае используется положение о том, что у серых тел, так же как у черных, собственное излучение пропорционально абсолютной температуре в четвертой степени, но энергия излучения меньше, чем энергия излучения черного тела при той же температуре. Тогда для серых тел этот закон принимает вид:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = c \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0} \quad (4.8)$$

представляет собой *коэффициент теплового излучения*; c – излучательная способность серого тела.

Таким образом, коэффициентом теплового излучения называют отношение поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения к его величине для абсолютно черного тела при той же температуре.

Коэффициент ε изменяется в пределах от 0 до 1 и для каждой длины волны λ характеризует долю, которую E данного тела составляет от E_0 абсолютно черного тела при одной и той же температуре. Из определения величины ε следует, что спектральная степень черноты абсолютно черного тела равна единице.

Спектральная степень черноты реального непрозрачного тела зависит от длины волны, природы тела, состояния его поверхности и температуры.

Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение ($A = 1$) и одновременно является идеальным излучателем у которого $\varepsilon = 1$. Данное обстоятельство наводит на мысль, что и у реальных тел между излучательной способностью E и его поглощательной способностью A существует однозначная связь. Эту связь установил немецкий физик Кирхгоф в 1859 году и поэтому ее называют законом Кирхгофа. Согласно закону Кирхгофа отношение спектральной плотности потока собственного излучения (спектральной лучеиспускательной способности) любого тела к его спектральной поглощательной способности есть величина постоянная и равная спектральной плотности потока АЧТ, имеющего ту же температуру:

$$\frac{E}{A} = E_0. \quad (4.9)$$

Сравнивая выражения (4.8) и (4.9), несложно сделать вывод о том, что спектральная поглощательная способность равна спектральной степени черноты:

$$A = \varepsilon.$$

Равенство (4.9) является следствием из закона Кирхгофа и строго справедливо при локальном термодинамическом равновесии между излучением и веществом, что на практике не выполняется. Однако допущение о локальном термодинамическом равновесии в расчетах радиационного теплообмена подтверждается результатами экспериментов.

Угловые коэффициенты излучения

В случае, если излучающая система состоит из нескольких тел, произвольно расположенных в пространстве, то только часть потока излучения от

одного тела попадает на другое. Доля потока излучения одного тела, попадающая на другое, зависит от формы, размеров тел, их взаимного расположения, расстояния между ними и т.д. Для учета той части потока излучения от поверхности одного тела, которая попадает на поверхность другого тела, используется понятие *углового коэффициента излучения* φ . Когда рассматривается поток излучения от элементарной площадки, находящейся на поверхности одного тела, на всю поверхность другого тела, угловой коэффициент излучения называется локальным, а когда – от всей поверхности одного тела на всю поверхность другого, угловой коэффициент излучения называется средним.

Угловые коэффициенты излучения характеризуют только геометрические особенности излучающей системы, т. е. ими учитывается только «прямое» попадание энергии излучения от одного тела на другое, а попадание посредством отражения от других тел никак не учитывается. Поэтому далее при выводе выражений для угловых коэффициентов излучения для простоты будем полагать, что тела, которые участвуют в теплообмене излучением, являются абсолютно черными.

Угловые коэффициенты излучения в системе, состоящей из двух поверхностей, удобно рассчитывать, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости: $\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1$;

б) свойство взаимности: $\varphi_{ik} \cdot F_i = \varphi_{ki} \cdot F_k$;

в) свойство невогнутости (для плоских и выпуклых поверхностей)
 $\varphi_{ik} = 0$.