



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Практическое занятие № 14

ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

12 июня 2017 г.



Теплообмен *излучением* (*лучистый теплообмен*) свойственен всем телам, температура которых не равна абсолютному нулю.

Энергия, излучаемая всем телом по всем направлениям и длинам волн в единицу времени, называется *интегральным излучением*, обозначается Q^* и измеряется в ваттах.

Интегральное излучение, приходящееся *на единицу поверхности*, называется *плотностью* интегрального излучения, обозначается E и измеряется в ваттах на квадратный метр.



Интенсивность интегрального излучения – это отношение плотности интегрального излучения к длине волны, Вт/м³:

$$I = \frac{Q^*}{F\lambda} = \frac{E}{\lambda}. \quad (14.1)$$

Все тела не только излучают энергию, но и поглощают, отражают и пропускают через себя падающие лучи от другого тела:

$$A + R + D = 1, \quad (14.2)$$

где A – поглотительная способность тела, отношение энергии, поглощенной телом, ко всей падающей энергии, величину A называют коэффициентом поглощения;



R – отражательная способность тела, отношение энергии, отраженной телом, ко всей падающей энергии, величину R называют коэффициентом отражения;

D – коэффициент пропускания, характеризует способность тела пропускать энергию излучения.

Закон Планка: интенсивность излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависит от температуры и длины волны:

$$I_{s\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1},$$

(14.3)



Здесь

$I_{s\lambda}$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела,
Вт/м³;

C_1, C_2 – постоянные Планка;

λ – длина волны, м;

T – абсолютная температура, К;

e – основание натурального логарифма.

Длина волны λ в микрометрах, отвечающая
максимальному значению интенсивности излучения,
определяется законом смещения Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{2,9}{T},$$

(14.4)



Закон Стефана – Больцмана: плотность интенсивности излучения абсолютного черного тела (E_s) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_s = \sigma T^4, \quad (245)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана обычно записывают в виде

$$E_s = 5,67 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (14.5)$$



Закон Стефана – Больцмана для реальных тел имеет следующий вид:

$$E = 5,67\varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (14.6)$$

где

ε – степень черноты реального тела.

Закон Кирхгофа: отношение энергии излучения к коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и равно энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре.



Закон Ламберта: максимальное излучение E_n имеет место в направлении нормали к поверхности; количество энергии, излучаемой под углом φ к нормали, E_φ пропорционально косинусу угла φ :

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi. \quad (14.7)$$

При расчете лучистого теплообмена обычно рассматривается 2 случая: теплообмен между двумя параллельными поверхностями и теплообмен между телами, когда одно из них находится внутри другого.



Плотность лучистого потока между параллельными поверхностями, Вт/м²,

$$q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (14.8)$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент черноты системы тел:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (14.9)$$

где ε_1 , ε_2 – коэффициенты черноты 1-го, 2-го тел.



Тепловой поток между телами, когда одно из них (площадь поверхности F_1) находится внутри другого (площадь поверхности F_2), определяют по формуле

$$Q^* = \frac{5,67 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (14.10)$$

В этом случае приведенная степень черноты системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (14.11)$$



Если первая поверхность мала по сравнению со второй, то отношение F_1/F_2 приближается к нулю, а уравнение теплообмена принимает вид:

$$Q = 5,67 \varepsilon_1 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (14.12)$$

Теплообмен между двумя произвольно расположенными телами может быть рассчитан по формуле

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} F \varphi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (14.13)$$



где φ - коэффициент облученности тела, учитывающий долю излучения первого тела, воспринимаемая вторым; приводится в справочниках, а в ряде случаев может быть рассчитан. Например, для круглых пластин диаметром d , расположенных на расстоянии h

$$\varphi = \left[\frac{h}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right]^2. \quad (14.14)$$



В приближенных расчетах величину приведенного коэффициента степени черноты ($\epsilon_{\text{пр}}$) допустимо рассчитывать по формуле

$$\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon_1 \epsilon_2. \quad (14.15)$$

Для уменьшения передачи теплоты излучением используют установку *экранов*. Защитное действие экрана, установленного между двумя параллельными поверхностями (при условии, что площади и коэффициенты излучения поверхностей и экрана одинаковы), состоит в уменьшении передачи теплоты излучением в два раза.



Температуру экрана можно определить из выражения

$$\left(\frac{T_{\text{ЭК}}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]. \quad (14.16)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{q_{\text{изл}}}{T_{\text{Г}} - T_{\text{СТ}}}, \quad (14.17)$$

где $T_{\text{Г}}$ и $T_{\text{СТ}}$ – абсолютная температура газа и стенки, К.



При расчете сложного теплообмена, когда теплота передается двумя или даже всеми тремя способами одновременно, рассчитывают суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{изл}}. \quad (14.18)$$



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Практическое занятие № 14
Теплообмен излучением

Задачи



Задача 1.

Определить собственную излучательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения $C = 4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, если температура поверхности стенки 1027°C . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.



Решение:

Излучательную способность стенки летательного аппарата определяем по формуле (14.6):

$$E = 4,53 \cdot \left(\frac{1300}{100} \right)^4 = 1,256 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Длину волны, отвечающую максимуму интенсивности излучения, определяем из закона Вина (14.4):

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9}{T} = \frac{2,9}{1027 + 273} = 2,23 \text{ мкм.}$$



Решение:

Степень черноты определяем из равенства

$$C = 5,67\varepsilon,$$

Откуда

$$\varepsilon = \frac{C}{5,67} = \frac{4,53}{5,67} = 0,786.$$



Задача 2.

Определить лучистый теплообмен между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки температура $t_1 = -183^\circ\text{C}$, а на внутренней поверхности наружной стенки $t_2 = 17^\circ\text{C}$. Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого равна $\varepsilon = 0,02$; площади поверхностей стенок $F_1 = F_2 = 0,1 \text{ м}^2$.



Решение:

Количество лучистой энергии между параллельными поверхностями можно определить по формуле (14.8). Вначале вычислим приведенную степень черноты данной системы тел (14.9):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,02} - 1} = \frac{1}{99}.$$

Тогда количество лучистой энергии

$$Q^* = 0,1 \cdot \frac{1}{99} \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{290}{100} \right)^4 - \left(\frac{90}{100} \right)^4 \right] = 0,396 \text{ Вт.}$$



Задача 3.

Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 300 и 100°С; диски имеют одинаковые диаметры, равные 300 мм, расстояние между ними $h = 500$ мм. Степень черноты дисков 0,24.



Решение:

Определим коэффициент облученности (14.14):

$$\varphi_{1-2} = \left[\frac{0,5}{0,3} - \sqrt{1 - \left(\frac{0,5}{0,3} \right)^2} \right]^2 = 0,077.$$

Площадь поверхности пластины составляет:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2.$$

Определим приведенную степень черноты (14.9):

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,24} + \frac{1}{0,24} - 1} = 0,136.$$



Решение:

Тепловой поток между пластинами определяем по формуле (14.8):

$$Q = 5,67 \cdot 0,077 \cdot 0,136 \cdot \left[\left(\frac{573}{100} \right)^4 - \left(\frac{373}{100} \right)^4 \right] = 53,4 \text{ Вт.}$$



Задача 4.

Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром 200 мм, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны 467°C и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°C .



Решение:

Паропровод охлаждается за счет излучения и свободной конвекции, следовательно, тепловой поток с единицы площади паропровода определяется уравнением

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \alpha(t_{\text{ст}} - t),$$

где $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$ – коэффициент лучисто-конвективного теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем исходя из формул (14.8) и (14.17):

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{0,79 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{740}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right]}{467 - 20} = 30,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$



Решение:

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (13.26). Параметры теплоносителя при определяющей температуре:

$$t = 0,5(t_B + t_{CT}) = 0,5 \cdot (467 + 27) = 245^\circ\text{C};$$

$$\lambda = 4,23 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad \nu = 40,04 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr = 0,667; \quad \beta = \frac{1}{518}; \quad \Delta t = 440^\circ\text{C}.$$

Рассчитываем комплекс $(Pr \cdot Gr)$:

$$(Pr \cdot Gr) = 0,667 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,2^3 \cdot 440}{518 \cdot (40,04 \cdot 10^{-6})^2} = 2,78 \cdot 10^7.$$



Решение:

При таком значении комплекса $C = 0,135$ и $n = 0,33$.

Определяем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,135 \cdot (2,87 \cdot 10^7)^{1/3} = 40,9.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (13.4):

$$\alpha_K = \frac{40,9 \cdot 4,23 \cdot 10^{-2}}{0,2} = 8,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коэффициент лучисто-конвективного теплообмена

$$\alpha = 30,7 + 8,67 = 39,37 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$



Решение:

Определяем потери теплоты с 1 м длины паропровода:

$$q_l = \alpha \pi d l \Delta t = 39,37 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 440 = 10880 \text{ кВт/м}.$$