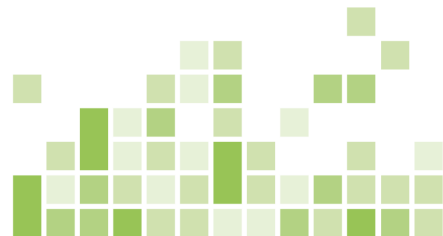




**Физико-технический  
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Практическое занятие № 18

# ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

26 мая 2019 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/м<sup>3</sup>:

$$I = \frac{Q^*}{F\lambda} = \frac{E}{\lambda}. \quad (18.1)$$

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

$$A + R + D = 1, \quad (18.2)$$

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:

$$I_{s\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (18.3)$$



Здесь

$I_{s\lambda}$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела,  
Вт/м<sup>3</sup>;

$C_1, C_2$  – постоянные Планка;

$\lambda$  – длина волны, м;

$T$  – абсолютная температура, К;

$e$  – основание натурального логарифма.

Длина волны  $\lambda$  в миллиметрах, отвечающая  
максимальному значению интенсивности излучения,  
определяется законом смещения Вина:

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

(18.4)



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

$$E_s = \sigma T^4, \quad (18.5)$$

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

$$E_s = 5,67 \left( \frac{T}{100} \right)^4. \quad (18.5a)$$



Закон Стефана – Больцмана для реальных тел имеет следующий вид:

$$E = 5,67\varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (18.6)$$

где

$\varepsilon$  – 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  $\varphi$  к нормали,  $E_\varphi$  пропорционально косинусу угла  $\varphi$ :

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi. \quad (18.7)$$

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





Плотность лучистого потока между параллельными поверхностями, Вт/м<sup>2</sup>,

$$q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (18.8)$$

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

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (18.9)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – 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

$$Q^* = \frac{5,67F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (18.10)$$

В этом случае приведенная степень черноты системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (18.11)$$



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

$$Q = 5,67 \varepsilon_1 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (18.12)$$

Теплообмен между двумя произвольно расположенными телами может быть рассчитан по формуле

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} F \varphi \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (18.13)$$



где  $\varphi$  - 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  $h$

$$\varphi = \left[ \frac{h}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right]^2. \quad (18.14)$$



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

$$\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon_1 \epsilon_2. \quad (18.15)$$

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

$$\left(\frac{T_{\text{ЭК}}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]. \quad (18.16)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{q_{\text{изл}}}{T_{\text{Г}} - T_{\text{СТ}}}, \quad (18.17)$$

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:

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{изл}}. \quad (18.18)$$



**Физико-технический  
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## Практическое занятие № 18 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  $1027^\circ\text{С}$ . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.



## Решение:

Излучательную способность стенки летательного аппарата определяем по формуле (18.6):

$$E = 4,53 \cdot \left( \frac{1300}{100} \right)^4 = 1,294 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Длину волны, отвечающую максимуму интенсивности излучения, определяем из закона Вина (18.4):

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



## Решение:

Степень черноты определяем из равенства

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

Откуда

$$\varepsilon = \frac{C}{5,67} = \frac{4,53}{5,67} = 0,799.$$



## 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 (18.8). Вначале вычислим приведенную степень черноты данной системы тел (18.9):

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

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 (18.14):

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

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 (18.9):

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



## Решение:

Тепловой поток между пластинами определяем по формуле (18.8):

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





## 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  $467^{\circ}\text{C}$  и 0,79, а температура окружающего воздуха  $27^{\circ}\text{C}$ .



## 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 (18.8) и (18.17):

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



## Решение:

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (14.26). 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 (14.4):

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

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:

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