

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1.

Задание для студентов

- 1. Внимательно прочитать теоретический материал и записать основные определения и формулы.
- 2. Разобрать примеры задач с решением.
- 3. Решить три задачи из варианта, соответствующего последней цифре номера в зачетной книжке (при наличии цифры 0 – следует решать вариант 10).

ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Лучистый теплообмен - форма распространения между телами в пространстве энергии. При этом происходит двойное превращение внутренней энергии: внутренняя энергия тела превращается в лучистую и передается в пространстве путем электромагнитных волн (излучением), в свою очередь, поток энергии электромагнитных волн (лучистая энергия) при поглощении их другим телом вновь превращается во внутреннюю энергию.

Лучистая энергия излучается материальными телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями – квантами света.

Большая часть твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает энергию во всем диапазоне длин волн. Некоторые тела (чистые металлы, газы и др.) излучают энергию только в определенных интервалах длин волн. Такое излучение называется *выборочным* или *селективным*.

Основные понятия и определения

Тепловое излучение - процесс распространения внутренней энергии излучающего тела в виде электромагнитных волн. Так называют электромагнитные возмущения, исходящие из излучаемого тела и распространяющиеся в вакууме со скоростью света $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ м/с}$.

Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные частицы, т. е. электроны и ионы, входящие в состав вещества. **Излучение в диапазоне длин волн $\lambda = 0,8 \dots 100 \text{ мкм}$ является тепловым.**

Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности, а для газов — еще от толщины слоя и давления.

С увеличением температуры тела его энергия излучения увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия вещества.

Лучистый поток, падающий на тело Q , частично им поглощается Q_A , частично отражается Q_R , частично проходит сквозь тело Q_D

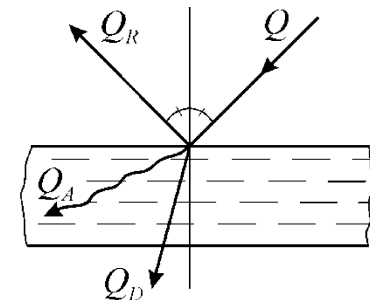
$$Q = Q_A + Q_R + Q_D.$$

Разделив обе части равенства на Q и обозначив

$Q_A/Q = A$; $Q_R/Q = R$, $Q_D/Q = D$ получим:

$$A + R + D = 1$$

Коэффициенты A , R , D характеризуют соответственно поглотательную, отражательную и пропускную (прозрачность) способности тела. Они называются коэффициентами поглощения, отражения и пропускания, соответственно, могут меняться от 0 до 1.



Тела, которые пропускают всю падающую на них энергию, называются прозрачными .

Тела, у которых $0 < D \leq 1$, называют полупрозрачными (стекло, кварц и т. п.).

Поверхность, поглощающая всю падающую на нее лучистую энергию ($A_s = 1$), называется абсолютно черной.

Поверхность, отражающая все падающие на нее лучи ($R = 1$), называется абсолютно белой.

Интегральный (во всем диапазоне волн) лучистый поток с единицы поверхности в полупространство в единицу времени называется излучательной способностью или плотностью интегрального излучения

тела E , Вт/м²:
$$E = \frac{dQ}{dF}$$

Интенсивность излучения I_λ , Вт/м³:
$$I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$$

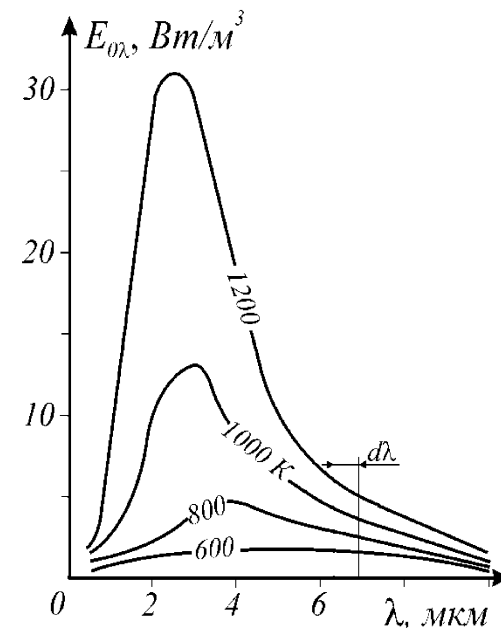
2. Основные законы теплового излучения

Интенсивность излучения абсолютно черного тела в вакуум определяется *законом Планка*:

$$I_{\lambda s} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

где $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К — первая и вторая постоянные Планка; λ - длина волны. **Закон Планка** устанавливает зависимость между спектральной интенсивностью излучения абсолютно черного тела и абсолютной температурой тела.

Длина волны λ_{ms} мм, соответствующая максимальному значению интенсивности монохроматического излучения, при данной температуре подчиняется **закону смещения Вина**: $\lambda_{ms} \cdot T = 2,9$.



Основные законы теплового излучения

Закон Стефана—Больцмана Плотность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени:

$$E_s = c_s \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

определяет интегральную плотность излучения абсолютно черного тела в вакуум, где $c_s = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Плотность интегрального излучения серого тела:

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

где $c = \varepsilon c_s$ — коэффициент излучения серого тела.

Закон Кирхгофа:

соотношение излучательной и поглощательной способностей серых тел при одинаковой температуре постоянно и равно излучательной способности при той же температуре абсолютно черного тела:

$$E/A = E_s \text{ или } E/E_s = c/c_s = \varepsilon = A.$$

Сопоставление плотностей излучения серого и абсолютно черного тел при одинаковой температуре приводит к характеристике, называемой степенью черноты ε ,

При $\varepsilon=0$ и 1 абсолютно белое и черное тело,

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0},$$

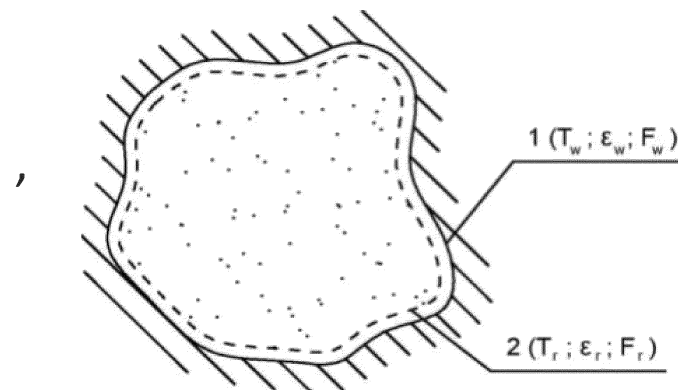
Соответственно.

3. Излучение газов

В инженерных расчетах газ, излучающий и поглощающий излучение, считают серым телом, а его объемное излучение заменяют излучением оболочки, в которую заключен этот газ.

Плотность теплового излучения между стенкой и проходящим около нее газом :

$$q = \varepsilon'_w c_s \left[\varepsilon_\Gamma \left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\Gamma_w} \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$



где $\varepsilon'_w = \frac{\varepsilon_w + 1}{2}$

— эффективная степень черноты стенок канала;

$\varepsilon_\Gamma = \frac{q_\Gamma}{q_s}$ — степень черноты газа, отношение количества энергии излучения газов и абсолютно черного тела

(ε_Γ — при температуре газа T_Γ ; ε_{Γ_w} — при температуре стенки T_w).

4. Излучение между твердыми телами

Плотность теплового излучения между параллельными поверхностями :

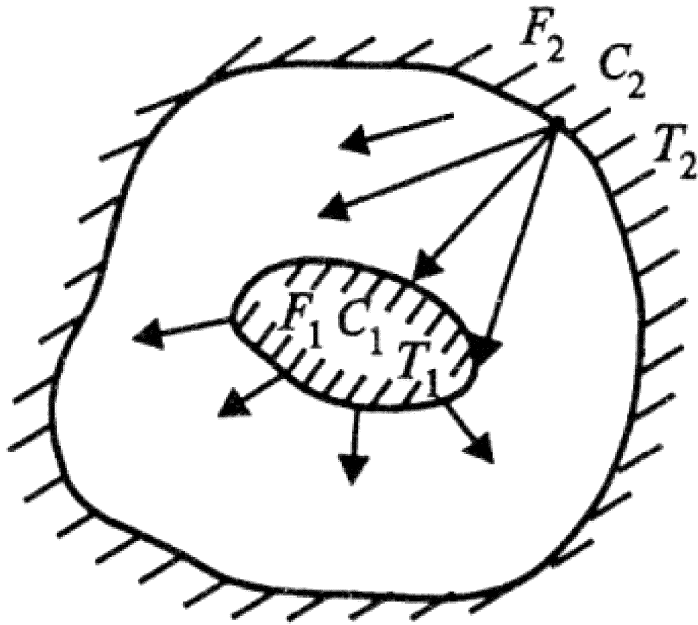
$$q = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где индексы 1 и 2 относятся к первой и второй поверхностям,

$c_{\text{пр}} = \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s} \right)^{-1}$ — приведенный коэффициент излучения,

c_1, c_2 — коэффициенты излучения 1 и 2 тела соответственно.

Взаимное тепловое облучение двух поверхностей



F – площадь поверхности теплообмена, m^2 ; T – температура поверхности теплообмена, K ;
 $c_{пр} = c_0 \varepsilon_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения в системе двух серых тел; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Такой случай еще называют теплообменом излучением между телом и его оболочкой; внутреннее тело всегда тело 1. Тепловой поток между двумя излучающими поверхностями

$$Q = c_{пр} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

где

$$c_{пр} = \left[\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s} \right) \right]^{-1}$$

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°С . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.

- Решение: Излучательную способность стенки летательного аппарата определяем по формуле:

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

- Длину волны, отвечающую максимуму интенсивности излучения, определяем из закона Вина

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

- 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 $F_1 = F_2 = 0,1 \text{ м}^2$.

- Количество лучистой энергии между параллельными поверхностями можно определить по формуле.

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

- Вначале вычислим приведенную степень черноты данной системы тел:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,02} - 1} = \frac{1}{99}$$

- 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

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

- 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

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

- Тепловой поток между пластинами определяем по формуле

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

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

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°С и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°С.

- 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

$$q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad \alpha_{\text{изл}} = \frac{q_{\text{изл}}}{T_{\text{г}} - T_{\text{ст}}}$$

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

- Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем. Параметры теплоносителя при определяющей температуре:

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

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

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

- Рассчитываем комплекс (Pr·Gr):

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

- 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

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

- Коэффициент лучисто-конвективного теплообмена

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

- Определяем потери теплоты с 1 м длины паропровода:

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

Задача 1. Определить собственную излучательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения ϵ , если температура поверхности стенки T . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.

Вариант	ϵ , Вт/(м ² · К ⁴)	T , °С	Вариант	ϵ , Вт/(м ² · К ⁴)	T , °С
1	4,50	1020	8	4,05	977
2	4,10	1009	9	3,77	936
3	3,87	1030	10	4,20	920
4	3,95	957	11	4,30	900
5	4,00	1015	12	3,56	1080
6	4,41	1000	13	3,68	1090
7	3,90	990	14	4,40	1100

Задача 2. Определить лучистый теплообмен между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки температура **t1**, а на внутренней поверхности наружной стенки **t2** . Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого равна ϵ ; площади поверхностей стенок **F1 = F2** .

Ва- риант	t1, °C	t2, °C	ϵ	F1, м2	F2, м2	Ва- риант	t1, °C	t2, °C	ϵ	F1, м2	F2, м2
1	-180	20	0,05	0,10	0,10	8	-120	25	0,06	0,40	0,40
2	-170	25	0,04	0,20	0,20	9	-130	20	0,02	0,15	0,15
3	-160	15	0,03	0,15	0,15	10	-165	10	0,03	0,20	0,20
4	-150	10	0,01	0,18	0,18	11	-145	18	0,04	0,30	0,30
5	-155	18	0,06	0,30	0,30	12	-175	15	0,01	0,25	0,25
6	-140	30	0,02	0,25	0,25	13	-115	30	0,05	0,25	0,25
7	-135	5	0,04	0,35	0,35	14	-110	35	0,03	0,30	0,30

Задача 3. Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков **t1** и **t2**; диски имеют одинаковые диаметры, равные **d**, расстояние между ними **h**. Степень черноты дисков ϵ .

Вариант	t1, °C	t2, °C	d, мм	h, мм	ϵ	Вариант	t1, °C	t2, °C	d, мм	h, мм	ϵ
1	250	100	200	300	0,36	1	300	50	270	450	0,18
2	200	100	100	400	0,40	2	250	50	360	250	0,34
3	350	100	400	200	0,28	3	150	50	400	350	0,51
4	400	100	150	500	0,50	4	400	50	180	400	0,42
5	250	100	250	300	0,45	5	100	50	330	300	0,26
6	300	200	350	400	0,20	6	350	50	430	250	0,37
7	400	200	180	200	0,55	7	200	50	240	350	0,52

Задача 4. Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром **d**, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны **t_{ст}** и **ε**, а температура окружающего воздуха **t**.

Ва- риант	d, мм	t _{ст} , °C	ε	t, °C	Ва- риант	d, мм	t _{ст} , °C	ε	t, °C
1	150	450	0,60	25	8	160	380	0,69	10
2	100	400	0,45	30	9	240	415	0,71	13
3	250	350	0,58	15	10	320	367	0,49	17
4	300	300	0,64	18	11	290	421	0,53	22
5	180	320	0,75	21	12	220	297	0,62	28
6	270	420	0,70	24	13	310	388	0,73	23
7	340	290	0,55	26	14	120	411	0,58	19