

---

# Термодинамика и теплопередача

лектор

Зиякаев Григорий Ракитович

---

# Лекция 16

## Содержание

- Теплообмен излучением

# Основные понятия и определения

**Тепловое излучение** – это процесс распространения теплоты от излучающего тела с помощью электромагнитных волн.

Он обусловлен температурой и оптическими свойствами излучающего тела (твердых тел, трех- и многоатомных газов).

К тепловому излучению относят инфракрасное и видимое излучение, диапазон длин волн которых  $\lambda = 0,4 - 800$  мкм.

Твердые тела излучают энергию всех длин волн в данном диапазоне, т. е. имеют сплошной спектр излучения.

Твердые тела излучают и поглощают энергию поверхностным слоем, поэтому интенсивность их излучения (поглощения) зависит от температуры и состояния поверхности (гладкая, шероховатая, черная, белая и т. д.).

# Основные понятия и определения

Диатермичной называется среда, которая сама не излучает и не поглощает энергию излучения, но пропускает все лучи (прозрачна).

Диатермичными являются одно- и двухатомные газы. Трех- и многоатомные газы излучают и поглощают энергию. Так как в воздухе содержится таких газов пренебрежимо мало (состав воздуха:  $\approx 21\%$   $O_2$  и  $\approx 79\%$   $N_2$ ), то его считают диатермичной средой.

# Основные понятия и определения

Количество энергии излучения, переносимой за 1 с через произвольную поверхность  $F$ , называется потоком излучения и обозначается  $Q$ , Вт.

Поток излучения, соответствующий всему спектру излучения, называется **интегральным**.

Поверхностная плотность потока интегрального излучения обозначается  $q = Q/F$ , Вт/м<sup>2</sup>.

# Основные понятия и определения

Каждое тело не только излучает, но и поглощает лучистую энергию. Разность между поглощенной и собственной лучистой энергией называется результирующим излучением:

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{соб}}.$$

При  $Q_{\text{рез}} > 0$  температура тела увеличивается, и наоборот.

При  $Q_{\text{рез}} = 0$  температура тела не изменяется (состояние термического равновесия).

# Основные понятия и определения

Из всего количества падающей на тело лучистой энергии ( $Q_{\text{пад}}$ ) часть ее поглощается ( $Q_{\text{погл}}$ ), часть отражается ( $Q_{\text{отр}}$ ) и часть проходит сквозь тело ( $Q_{\text{проп}}$ ). Следовательно,

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}},$$

или

$$1 = \frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}},$$

где

$Q_{\text{погл}}/Q_{\text{пад}} = A$  – коэффициент поглощения;

$Q_{\text{отр}}/Q_{\text{пад}} = R$  – коэффициент отражения;

$Q_{\text{проп}}/Q_{\text{пад}} = D$  – коэффициент проницаемости.

# Основные понятия и определения

Тогда

$$A + R + D = 1;$$

- при  $A = 1, R = 0, D = 0$  тело называется абсолютно черным;
- при  $R = 1, A = 0, D = 0$  – абсолютно белым;
- при  $D = 1, A = 0, R = 0$  – диатермичным (прозрачным).

В природе таких тел не существует.

Для подавляющего большинства твердых тел справедливо равенство

$$A + R = 1.$$

# Закон Стефана-Больцмана

**Закон Стефана – Больцмана**, описывает связь плотности теплового потока и температуры абсолютно черного тела.

$$q_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \frac{Вт}{м^2}$$

где,  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

**Степень черноты.** Большинство реальных тел можно считать **серыми**. Степень черноты серых тел ( $\varepsilon$ ) – это отношение собственного излучения серого тела к излучению абсолютно черного тела при температуре серого тела:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{соб.}}}{Q_0}$$

# Закон Стефана-Больцмана

Степень черноты  $0 < \varepsilon < 1$  и зависит от температуры тела и его физических свойств. Значения  $\varepsilon$  для различных материалов приводятся в справочниках.

У металлов с увеличением температуры  $\varepsilon$  растет.

При шероховатой поверхности, загрязнении ее или окислении  $\varepsilon$  может увеличиваться в несколько раз. Так, для полированного алюминия  $\varepsilon = 0,04 \dots 0,06$ , при окислении поверхности она становится равной  $0,2 \dots 0,03$ .

Степень черноты теплоизоляционных материалов отличается сильной шероховатостью и находится в пределах  $0,7 \dots 0,95$ .

# Закон Стефана-Больцмана

Собственное излучение серых тел рассчитывается по формуле

$$q_{\text{соб}} = \varepsilon \cdot q_0 = \varepsilon \cdot c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$Q_{\text{соб}} = q_{\text{соб}} \cdot F, \text{Вт}$$

# Закон Кирхгофа

Согласно **закону Кирхгофа** отношение излучательной способности тела к поглотительной зависит только от температуры тела и не зависит от его свойств.

Излучательная и поглотительная способности тела прямо пропорциональны друг другу. Если тело не излучает, то оно и не поглощает (абсолютно белое тело).

$$A = \varepsilon.$$

Таким образом, из закона Кирхгофа следует, что коэффициент поглощения серых тел численно равен их степени черноты.

# СВЯЗЬ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ

Перечислим виды лучистых потоков:

- падающий ( $Q_{\text{пад}}$ ),
- отраженный ( $Q_{\text{отр}}$ ),
- поглощенный ( $Q_{\text{погл}}$ ),
- пропущенный ( $Q_{\text{проп}}$ ),
- собственный ( $Q_{\text{соб}}$ ),
- результирующий ( $Q_{\text{рез}}$ ).

Сумма собственного и отраженного излучения называется **эффективным** излучением тела:

$$Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}.$$

# СВЯЗЬ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ

Ранее было введено понятие результирующего излучения:

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{соб}}.$$

Получим связи лучистых потоков на примере:

пусть на тело с известными температурой ( $T$ ), степенью черноты ( $\epsilon$ ) и площадью поверхности ( $F$ ) падает поток излучения  $Q_{\text{пад}}$ .

Часть этого излучения поглощается ( $Q_{\text{погл}}$ ), часть отражается ( $Q_{\text{отр}}$ ). Сумма собственного ( $Q_{\text{соб}}$ ) и отраженного ( $Q_{\text{отр}}$ ) излучений дает вектор эффективного потока ( $Q_{\text{эф}}$ ).

Результирующее излучение:

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{пад}} - Q_{\text{эф}}.$$

# Теплообмен излучением между телами

Пусть имеем два тела, для которых даны площади излучающих поверхностей ( $F_1, F_2$ ), температуры ( $T_1, T_2$ , причем  $T_1 > T_2$ ), степени черноты ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ).

Излучение, посылаемое первым телом по всем направлениям полусферического пространства – эффективное излучение  $Q_{\text{эф1}}$ .

Часть этого излучения ( $Q_{F_1 \rightarrow F_2}$ ) попадает на второе тело.

Отношение

$$\frac{Q_{F_1 \rightarrow F_2}}{Q_{\text{эф1}}} = \varphi_{1-2}$$

называется коэффициентом облученности второго тела первым, или **угловым коэффициентом**. Угловым коэффициентом ( $0 \leq \varphi \leq 1$ ) не зависит от свойств и температуры тел, а определяется только геометрическими параметрами: формой, размерами тел, расстоянием между телами и взаимной ориентацией их.

Аналогично для второго тела  $\frac{Q_{F_2 \rightarrow F_1}}{Q_{\text{эф2}}} = \varphi_{2-1}$ .

# Теплообмен излучением между телами

Существуют аналитические, графические и экспериментальные методы определения угловых коэффициентов в различных системах тел.

Для наиболее распространенных систем излучающих тел в справочниках приводятся формулы для расчета угловых коэффициентов.

Лучистый поток, передаваемый от первого тела ко второму:

$$Q = c_0 \cdot \varepsilon_{np} \left[ F_1 \cdot \varphi_{1-2} \cdot \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - F_2 \cdot \varphi_{2-1} \cdot \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{1-2} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{2-1}}$$

**- приведенная степень  
черноты**

# Теплообмен излучением между пластинами

*Теплообмен излучением между двумя бесконечными параллельными пластинами*

Для двух параллельных неограниченных пластин площадью  $F$ , температурами  $T_1$  и  $T_2$  и степенями черноты ( $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) справедливы равенства

$$\varphi_{1-2} = \varphi_{2-1} = 1; F_1 = F_2 = F.$$

Тогда

$$Q = c_0 \cdot \varepsilon_{np} \cdot F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

# Теплообмен излучением между пластинами

Эффективным способом уменьшения теплообмена излучением между поверхностями является постановка между ними экранов (тонких пластин типа фольги с высокой отражательной способностью).

При наличии между пластинами  $n$  экранов со степенями черноты  $\varepsilon_{\varepsilon 1}$ ,  $\varepsilon_{\varepsilon 2}$ , ...,  $\varepsilon_{\varepsilon n}$  приведенная степень черноты рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{np1-2}} + \left( \sum_{i=1}^n \frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon i}} - 1 \right)}$$

# Теплообмен излучением между телами

*Теплообмен излучением между двумя телами, одно из которых расположено внутри другого*

Внутреннее тело 1 все свое излучение посылает на тело 2. Тело 2 часть своего излучения посылает на тело 1, а остальное – на себя. Угловые коэффициенты  $\varphi_{1-2} = 1$  и  $\varphi_{2-1} = F_1/F_2$ .

Получим расчетные формулы для потока излучения  $Q$  в виде

$$Q = c_0 \cdot \varepsilon_{np} \cdot F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

# Теплообмен излучением между телами

*Лучистый поток, передаваемый от любых нагретых тел в окружающую диатермичную среду.*

Если оболочка удалена от излучающего тела и имеет температуру, равную температуре окружающей среды ( $T_2 = T_{ж}$ ), то выражение можно записать в вид

$$Q = c_0 \cdot \varepsilon \cdot F \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right],$$

**Задача 2.3.** Труба с наружным диаметром  $d$  и длиной  $l$  имеет на поверхности температуру  $t_{\text{пов}}$ . Определить тепловой поток в процессе лучистого теплообмена между трубой и окружающей средой для двух случаев: 1) труба находится в большом помещении, стены которого имеют температуру  $t_c$ ; 2) труба находится в бетонном канале сечением  $300 \times 300$  мм при температуре стенок канала  $t_c$ . Данные для решения взять из таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Данные к задаче 2.3

Предпоследняя цифра шифра	Материал трубы	$d$ , мм	$l$ , м	Последняя цифра шифра	$t_{\text{пов}}$ , °С	$t_c$ , °С
0	Алюминий шероховатый	70	4	0	250	10
1	Латунь полированная	90	5	1	300	15
2	Сталь шероховатая	110	6	2	370	20
3	Чугун обточенный	130	7	3	300	25
4	Алюминий полированный	150	8	4	310	30
5	Никель окисленный	170	9	5	400	35
6	Хром	100	10	6	210	40
7	Медь окисленная	80	11	7	320	30
8	Алюминий полированный	120	12	8	270	20
9	Сталь полированная	140	15	9	350	10

### Коэффициент теплового излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	$\epsilon$	Материал и характер поверхности	$\epsilon$
Алюминий полированный	0,048	Хром	0,17
Алюминий шероховатый	0,055	Цинк окисленный	0,11
Алюминий окисленный	0,15	Асбестовый картон	0,96
Железо, свежеработанное наждаком	0,242	Алюминиевая краска	0,5
Железо окисленное	0,736	Бетон	0,8
Железо литое необработанное	0,91	Гипс	0,903
Сталь окисленная	0,80	Дуб строганный	0,895
Сталь окисленная шерохова- тая	0,95	Кварц плавленный шерохо- ватый	0,932
Сталь полированная	0,54	Кирпич диасовый шерохо- ватый неглазурованный	0,8
Чугун обточенный	0,65	Кирпич диасовый шерохо- ватый глазурованный	0,85
Чугун шероховатый окислен- ный	0,96	Кирпич красный шерохова- тый	0,93
Латунь окисленная	0,6	Кирпич шамотный глазури- рованный	0,75
Латунь полированная	0,03	Кирпич огнеупорный	0,85
Латунь прокатанная	0,20	Масляная краска	0,94
Медь окисленная	0,62	Резина мягкая серая шерохо- ватая	0,589
Медь полированная	0,02	Стекло гладкое	0,937
Нихромовая проволока	0,96	Ламповая сажа 0,075 мм и больше	0,95
Никель окисленный	0,4	Фарфор глазурованный	0,924
Серебро полированное	0,02	Штукатурка шероховатая из- вестковая	0,91