

- *Теплообмен излучением не требует непосредственного контакта тел*
- *Излучение* - это процесс распространения электромагнитных волн, испускаемых телом при преобразовании внутренней энергии тела в результате внутримолекулярных и внутриатомных возмущений в лучистую энергию.
- *Лучистой тепловой энергией* называют энергию колебаний непрерывного электромагнитного поля в интервале длин волн λ от 0,4....0,8 мкм (видимое излучение) до 0,8 мкм...0,8 мм - невидимое излучение (инфракрасное или тепловое, самая большая часть) .

Спектр длин волн электромагнитных излучений

- – γ -излучение ($0,5 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-3}$ ангстрем и менее);
- – рентгеновское излучение ($0,5 \cdot 10^{-1} \dots 15$ ангстрем);
- – ультрафиолетовое излучение ($0,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,4$ мкм);
- – видимое излучение ($0,40 \dots 0,76$ мкм);
- – инфракрасное излучение ($0,77 \dots 340$ мкм);
- – радиоволновое излучение (от 340 и до нескольких тысяч метров).

- **Лучеиспускание** - процесс превращения внутренней энергии тела в лучистую энергию
- Лучеиспускание может быть непрерывным или селективным (отдельные участки спектра для некоторых газов и паров).
- Лучеиспускание может быть диффузным (энергия излучается равномерно по всем направлениям) или направленным.
- **Перенос лучистой энергии** - процесс ее распространения, определяемый физическими свойствами среды и спектральным составом излучения.
- **Поглощение** - процесс превращения части лучистой энергии во внутреннюю энергию тела.
- **Отражение** лучистой энергии от поверхности тела может быть диффузным (равномерным во всех направлениях-как у солнца) и зеркальным (по законам геометрической оптики).

- Совокупность процессов испускания, переноса, поглощения, отражения и пропускания теплового излучения называют *лучистым теплообменом*.
- Лучистый теплообмен между телами одинаковой температуры называют *равновесным*, а такое равновесие - *динамическим*.
- Для большинства твердых и жидких тел спектр излучения непрерывный. Это значит, что эти тела излучают (и поглощают) лучи всех длин волн.
- Распространение энергии в спектре излучающего тела определяется его температурой.

- Общее количество лучистой энергии, испускаемой телом в единицу времени, называется лучистым потоком Q , Вт.
- Поток излучения Q , проходящий через единицу поверхности A в пределах телесного угла 2π , называется поверхностной плотностью потока излучения $E = dQ/dA$ Вт/м².
- Излучение в достаточно узком интервале длин волн называют монохроматическим излучением Q_λ
- Отношение плотности потока монохроматического излучения $E_\lambda = dQ_\lambda/dA$ в малом интервале длин волн λ к этому интервалу есть интенсивность или спектральная плотность потока излучения, J_λ , $J_\lambda = dE_\lambda/d\lambda$, Вт/(м²·м).
- Интегральное (в диапазоне длин волн $\lambda = (0 \dots \infty)$) и монохроматическое излучение связаны соотношениями

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda;$$

$$Q = \int_0^{\infty} Q_{\lambda} d\lambda$$

- Излучение, которое зависит только от свойств и температуры тела, называют собственным.
- Излучение, которое тело получает от внешнего источника, называют падающим.

$E_{\text{пад}}$ - излучение падающее на поверхность тела;

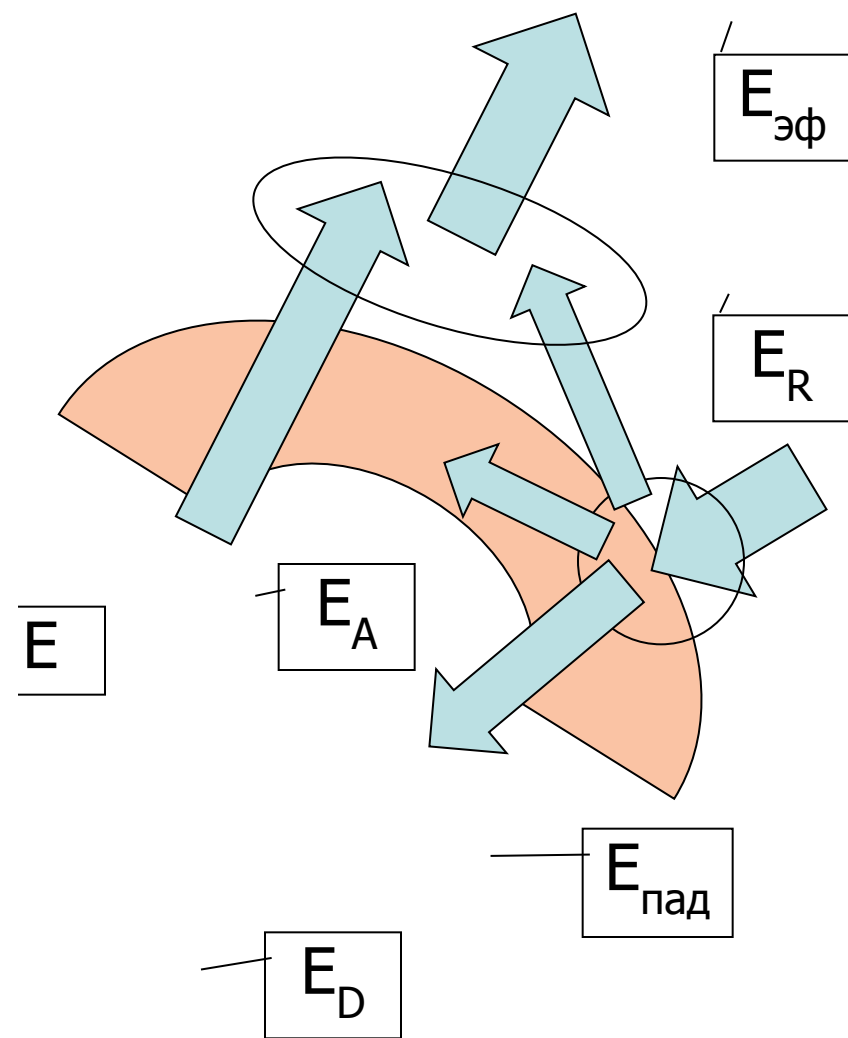
E_A - поглощаемый лучистый поток;

E_R - отражаемый лучистый поток;

E_D - лучистый поток проходящий сквозь тело;

E – собственное излучение;

$E_{\text{эф}} = E + E_R$ – эффективное излучение тела



Закон сохранения энергии для плотности падающего потока излучения $E_{\text{пад}}$

$$E_{\text{пад}} = E_A + E_R + E_D$$

- Поделив соотношение $E_{\text{пад}} = E_A + E_R + E_D$ на величину $E_{\text{пад}}$ получим коэффициенты

$$A + R + D = 1,$$

где A - коэффициент поглощения, $A = E_A / E_{\text{пад}}$;

R - коэффициент отражения, $R = E_R / E_{\text{пад}}$;

D - коэффициент пропускания, $D = E_D / E_{\text{пад}}$.

- Эти коэффициенты являются безразмерными величинами, которые характеризуют способность тела поглощать, отражать или пропускать тепловое излучение

В предельном случае:

- $R = 0$; $A = 0$; $D = 1$
(абсолютно прозрачное тело);
- $R = 1$; $A = 0$; $D = 0$
(абсолютно белое тело);
- $R = 0$; $A = 1$; $D = 0$
(абсолютно черное тело).
- Абсолютно черных, белых и прозрачных тел не существует.
- Для реальных тел коэффициенты A , R и D заключены в диапазонах $0 < A < 1$; $0 < R < 1$ и $0 < D < 1$

- Наиболее близки к абсолютно черному телу сажа, снег, и бархат ($A=0,97 \dots 0,98$),
- При небольших температурах источника излучения цвет поверхности не определяет ее поглощательную способность и белые тела так же хорошо поглощают энергию излучения, как и темные, поэтому, для инфракрасного излучения у снега поглощательная способность $A = 0,985$.
- к абсолютно белому телу – полированные металлы ($R=0,97$).
- Одно- и двухатомные газы практически непрозрачны для теплового излучения (диатермичные), $A+D \approx 1$.

СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ

- Жидкие и твердые тела отражающие часть падающего излучения ($A < 1$) не являются абсолютно черными телами.
- Серым называют непрозрачное тело, коэффициент поглощения которого $0 < A < 1$ не зависит ни от направления падающего излучения, ни от его спектрального состава. Большинство твердых тел можно рассматривать, как серые тела.
- Степенью черноты ε называют отношение плотности собственного излучения E тела к плотности собственного излучения E_0 абсолютно черного тела при одной и той же температуре: $\varepsilon = E/E_0$.
- Это справедливо и для монохроматического излучения $\varepsilon = E_\lambda / E_{0\lambda}$

- Степень черноты зависит от природы тела, температуры, шероховатости поверхности, а для металлов и от степени окисления поверхности.
- Проводники отражают большую часть теплового излучения, их поглощательная (излучательная) способность мала и увеличивается с повышением температуры.
- Для проводников установлена пропорциональная связь между степенью черноты ε , температурой T , К, и удельным электрическим сопротивлением $\rho_{\text{эл}}$; Ом·см,

$$\varepsilon(\lambda, T) = 0,576 \sqrt{\rho_{\text{эл}} T}$$

Коэффициент излучения различных поверхностей

Таблица 1.3.2-1

Коэффициент излучения ϵ различных поверхностей при температуре от 0 до 200°C (для абсолютно черного тела $C = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$)

Металлы и сплавы	C_1 Вт/(м ² ·К ⁴)	Покрyтия для металлов	C , Вт/(м ² ·К ⁴)
Алюминий необработанный	0,41	Бронза алюминиевая	2,0...2,5
Алюминий полированный	0,30	Краска для излучателей	5,2
Железо, сталь матовые луженые	0,50	Краска малярная	5,12...5,58
Железо, сталь матовые никелированные	0,64	Лак алюминиевый	2,30
Железо, сталь оцинкованные	1,31	Лак спиртовой, черный блестящий	4,75
Железо, сталь оцинкованные серые	1,59	Лак черный блестящий	5,06
Железо, сталь, полированные наждаком	1,40	Лак эмалевый белый	5,23
Железо, сталь полированные, никелированные	0,31...0,35	Эмаль белая	5,23
Железо, сталь, полностью покрытые ржавчиной	3,93	Другие вещества	Вт/(м ² ·К ⁴)
Железо, сталь, прокат	3,79	Бетон	5,3...5,4
Железо, сталь с окисленным слоем, блестящие	4,72	Бумага	5,37
Железо, сталь с окисленным слоем, сильно шероховатые	4,63	Вода	3,72
Латунь полированная	0,26...0,33	Гипс	5,21
Латунь, полированная наждаком	1,19	Дуб строганный	5,16
Медь лакированная	0,54	Иней (по Sammerer)	5,68
Медь окисленная	4,49	Картон, покрытый битумом, дерево, бумага	5,26
Медь полированная	0,23	Кирпич красный, шероховатый	5,36
Медь, прокат	3,61	Лед гладкий (по Sammerer)	5,23
Медь травленая	4,28	Масло	4,85
Самец окисленный серый	1,62	Мрамор серый, полированный	5,37
Чугун, литая пленка гладкая	4,63	Резина мягкая	4,95
Чугун, литая пленка шероховатая	4,72	Сажа	5,54
Чугун, свежее литье	2,51	Стекло гладкое	5,41
		Фарфор глазурованный	5,33
		Фаянс (белый)	5,0
		Шамот силикатный (1000°C)	3,5...4,1
		Эбонит гладкий, черный	5,45

- Диэлектрики поглощают большую часть падающего излучения и, соответственно, больше излучают (степень черноты при комнатных температурах 0,8 и больше);
- При этом их поглотительная (излучательная) способность падает с повышением температуры. Указанные положения справедливы в диапазоне температур излучающих поверхностей, пока спектр излучения лежит в инфракрасной области.

- Простые газы, такие, как кислород, азот, водород, сухой воздух и т.д., в основном пропускают излучение, и их собственное излучение очень слабое.
- Напротив, водяной пар, окись углерода и углекислый газ при высокой температуре излучают значительное количество тепла на определенных длинах волн. Теплообмен зависит в большой степени от толщины слоя газа.
- *Излучение* газов происходит последовательно за счет изменения энергии вращения молекул, вибрации атомов в молекуле, изменения орбит электронов, изменения орбит ядер.
- При этом энергия излучения, соответственно, увеличивается, а интервал длин волн уменьшается.
- Так, при $T = 3000 \text{ K}$ излучение связано с изменением движения молекул,
- а при $T = 6000 \text{ K}$ - с изменением орбит электронов, в результате чего излучение смещается в видимую часть спектра.

Теплоотдача при тепловом излучении

Тепловое излучение твердых тел

- Количество теплоты, переходящей от более нагретого тела к менее нагретому посредством лучеиспускания, определяется по уравнению:

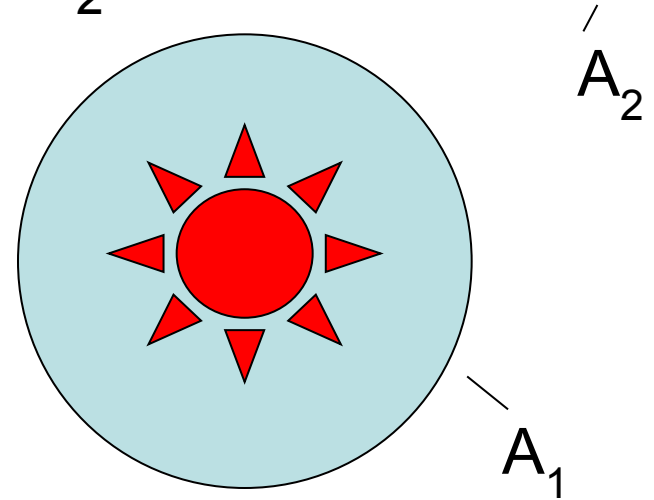
$$Q_{\text{л}} = C_{1-2} \cdot \varphi \cdot A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

- где $Q_{\text{л}}$ — количество теплоты, передаваемой лучеиспусканием в единицу времени, Вт;
- A — площадь поверхности излучения, м^2 ;
- C_{1-2} — коэффициент излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;
- T_1 — температура поверхности более нагретого тела, К;
- T_2 — температура поверхности менее нагретого тела, К;
- φ — угловой коэффициент, безразмерный.

Коэффициент излучения C_{1-2} зависит от взаимного расположения и степени черноты ε излучающих поверхностей, имеющих температуры T_1 и T_2 .

Случай а)

- Если одно тело, площадь поверхности излучения которого равна A_1 расположено внутри полого тела с площадью поверхности излучения A_2 , то $A=A_1/A_2$; угловой коэффициент $\phi = 1$



$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_{\text{ч}}} \right)}$$

- $C_1 = \varepsilon_1 C_{\text{ч}}$ — коэффициент лучеиспускания меньшего тела;
- $C_2 = \varepsilon_2 C_{\text{ч}}$ — коэффициент лучеиспускания большего (охватывающего) тела;
- $C_{\text{ч}} = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела;
- ε_1 и ε_2 - степени черноты поверхности меньшего и большего тела.

Значения ε для некоторых материалов:

Алюминий	0,05—0,07	Краска масляная	 0,78—0,96
Асбест	0,96	Лак	0,8—0,98
Вода	0,93	Медь	0,57—0,87
Гипс	0,78—0,9	Свинец	0,28
Дерево строганное	0,9	Стекло	0,94
Железо (сталь) окисленное	0,74—0,96	Чугун шероховатый окис-	
		ленный	0,96
Кладка кирпичная	0,93	Штукатурка	0,93

Случай б)

- Если площадь A_2 очень велика по сравнению с A_1 (например, аппарат в цехе), т. е. отношение A_1/A_2 близко к нулю, то коэффициент излучения $C_{1-2} = C_1$.

Случай в)

- Если $A_1 = A_2$ (две параллельные бесконечно большие поверхности), то

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_{\text{ч}}} \right)}$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$$

- $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией, определяемый по соответствующим формулам для свободного или вынужденного движения

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{(T_1 - T_2)A} = \frac{C_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{(T_1 - T_2)}$$

- Для расчета тепловых потерь аппаратов, находящихся в закрытых помещениях, при температуре поверхности аппарата до 150 °С можно пользоваться приближенной формулой

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t$$

- где α — суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м²К);

Δt — разность температур поверхности аппарата и окружающего воздуха, К.