

Термодинамика

- Лучистый теплообмен

Общие понятия лучистого теплообмена

Лучистый теплообмен имеет место в ракетной технике, ядерной энергетике, металлургии, гелиотехнике и др.

Тепловое излучение – это передача внутренней энергии излучающего тела посредством электромагнитных волн, которые характеризуются длиной волны λ .

Но не все электромагнитные волны относятся к тепловому излучению.

Тепловые лучи

Тепловыми лучами являются те из них, которые при попадании на поверхность превращаются в теплоту.

Таковыми являются:

видимое излучение (свет) с длиной волны $\lambda=0,4-0,8$ мкм

и инфракрасное с $\lambda=0,8-40$ мкм.

Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения, то есть они испускают энергию всех длин волн от нуля до бесконечности.

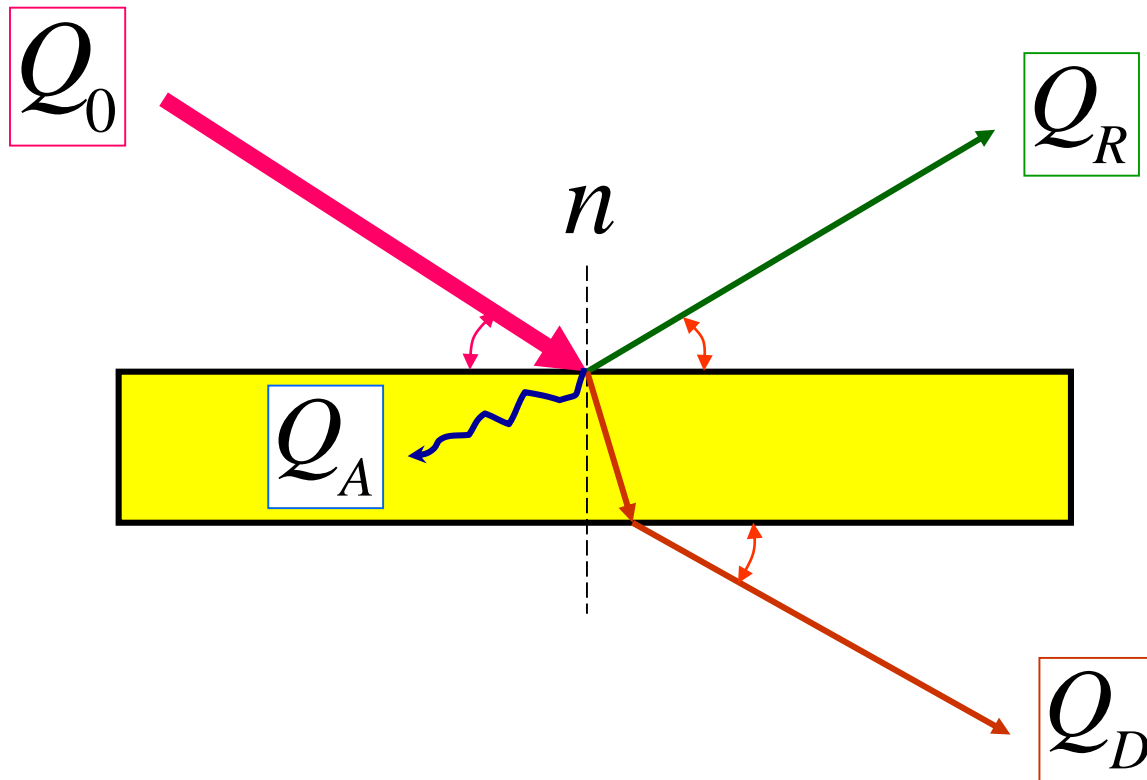
Особенности лучистого теплообмена в разных средах

Но чистые металлы и газы обладают **выборочным (селективным) излучением**, то есть испускают энергию с прерывистым спектром.

В твердых и жидких телах лучистый теплообмен имеет **поверхностный характер**, то есть в лучистом теплообмене участвуют лишь поверхностные слои.

Газы же имеют **объемный характер** лучистого теплообмена, то есть в нем участвуют все частицы газа в объеме.

Тепловой баланс лучистого теплообмена



Тепловой баланс лучистого теплообмена в абсолютных единицах

Видимое излучение (свет) относится к тепловым лучам, поэтому они подчиняются законам оптики (угол падения равен углу отражения).

Тепловой баланс лучистого теплообмена, Вт:

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0, \quad (1)$$

где лучистые тепловые потоки:

- Q_0 – падающий на поверхность;
- Q_A – поглощенный поверхностью;
- Q_R – отраженный от поверхности;
- Q_D – прошедший через нее.

Тепловой баланс лучистого теплообмена в относительных единицах

Если все составляющие уравнения (1) поделить на величину падающей лучистой энергии, получится **тепловой баланс в относительных единицах**:

$$A+R+D=1, \quad (2)$$

где

$A=Q_A/Q_0$ – поглощательная способность тела;

$R=Q_R/Q_0$ – отражательная способность тела;

$D=Q_D/Q_0$ – пропускательная способность тела.

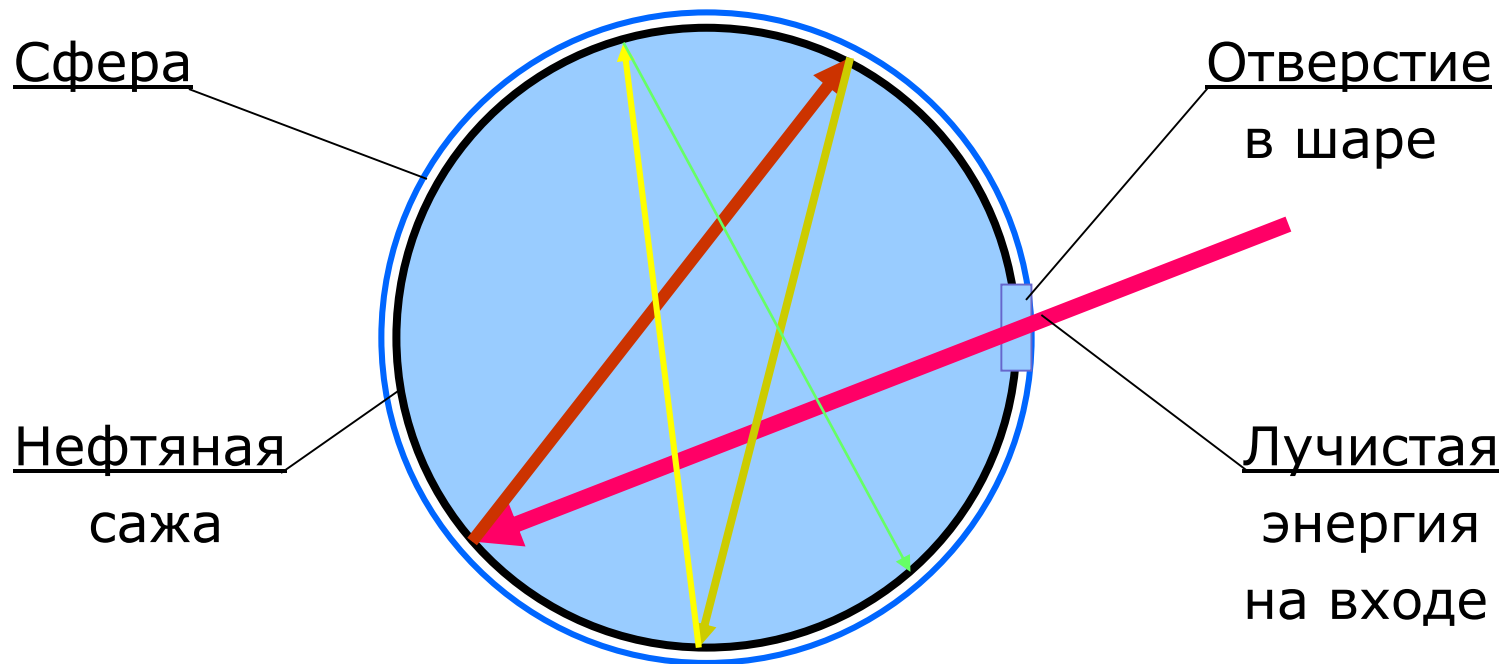
Абсолютно черное тело

При $A=1$; $R=D=0$ – абсолютно черное тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию.

В природе и технике нет абсолютно черных тел. Все реальные тела – «серые».

Моделью абсолютно черного тела является отверстие в полом шаре, внутренняя поверхность которого покрыта нефтяной сажей, что дает поглотительную способность $A=0,95$ при каждом падении луча (см. следующий слайд).

Модель абсолютно черного тела



Абсолютно белое и прозрачное тела

При $R=1$; $A=D=0$:

- абсолютно белое (зеркальное) тело,

которое отражает всю падающую на него лучистую энергию.

В природе и технике нет абсолютно белых тел.

При $D=1$; $A=R=0$:

- абсолютно прозрачное (диатермичное) тело.

Диатермичными являются одно- и двухатомные газы.

Излучательная способность тела

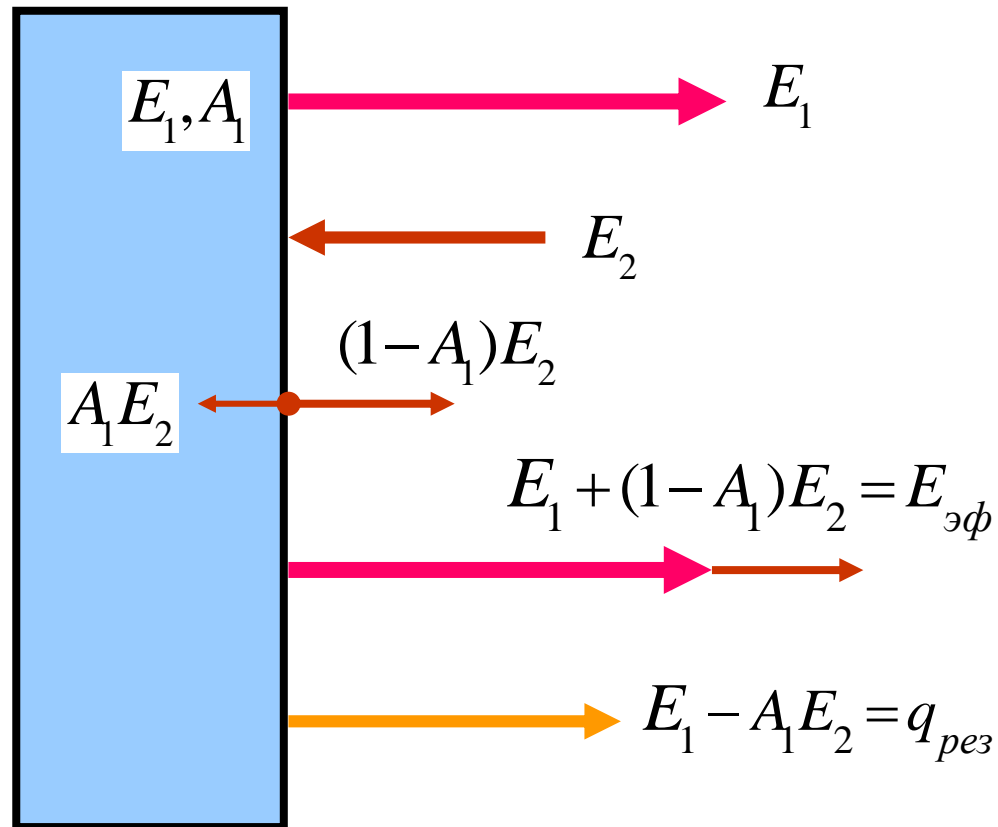
Для твердых и жидких тел $D=0$, тогда уравнение теплового баланса для них:

$$A+R=1. \quad (3)$$

Лучистый теплообмен – это совокупность процессов излучения, поглощения и пропускания лучистой энергии.

Удельный тепловой поток собственного излучения тела называется его собственной **излучательной способностью** E , Вт/м².

Эффективное и результирующее излучения



Основные обозначения лучистого теплообмена

E_1, A_1 – излучательная и поглощательная способности тела;

E_2 – падающая лучистая энергия;

$A_1 E_2$ – поглощенная телом энергия;

$(1-A_1)E_2$ – отраженная телом энергия;

$E_1 + (1-A_1)E_2 = E_{\text{эф}}$ – **эффективное излучение**, которое мы измеряем приборами и ощущаем своими органами чувств;

$E_1 - A_1 E_2 = q_{\text{рез}}$ – **резльтирующий тепловой поток**, который может быть положительным, отрицательным и нулевым.

Закон Планка

Закон Планка является одним из основных законов лучистого теплообмена.

Он устанавливает **зависимость излучательной способности абсолютно черного тела** от температуры и длины волны, Вт/м²:

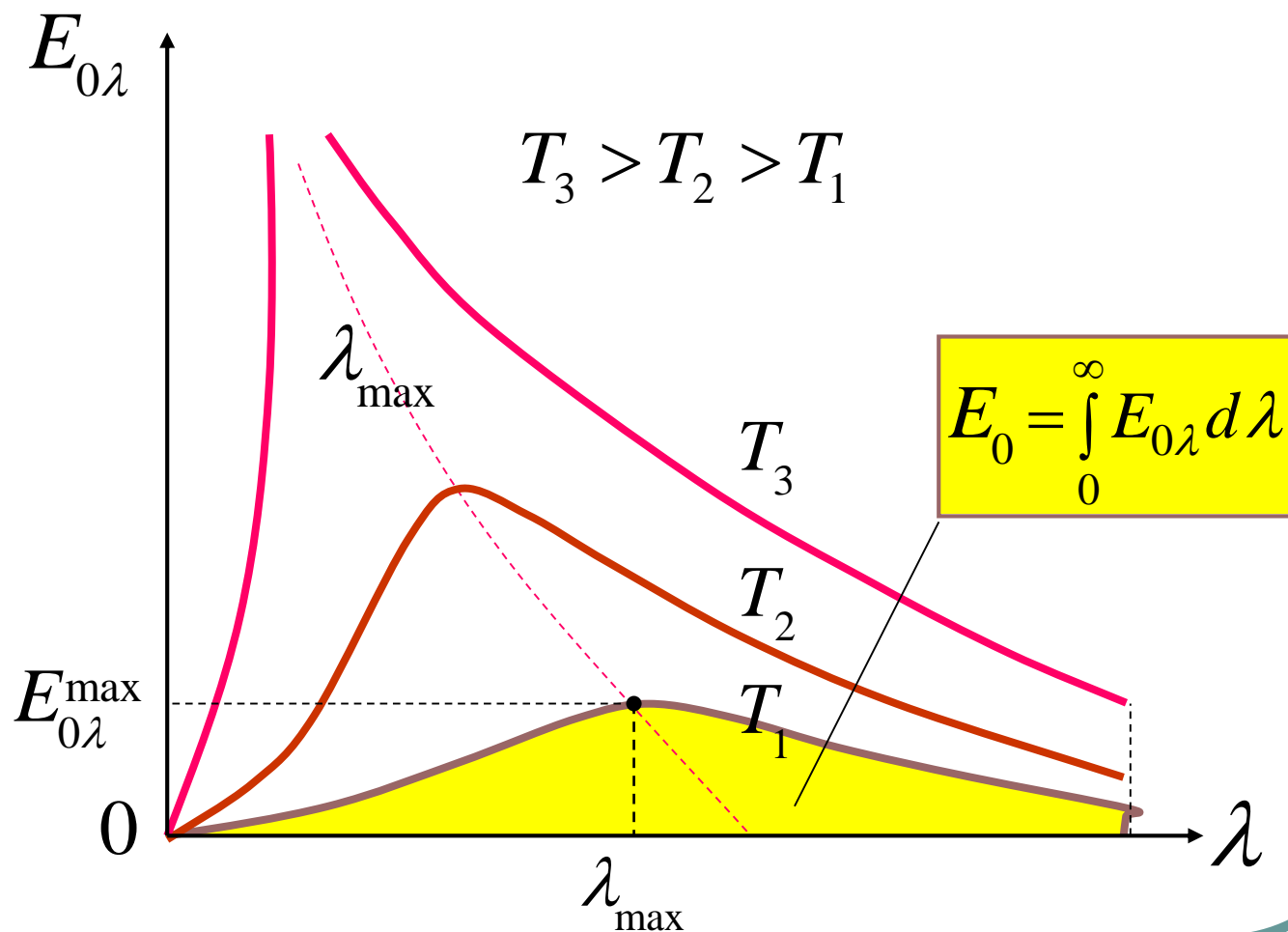
$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (4)$$

где c_1, c_2 – константы Планка; λ – длина волны, м;

T – температура тела, К;

Индекс «0» относится к абсолютно черному телу.

Графическая интерпретация закона Планка



Теплотехника 16

- Законы лучистого теплообмена

Закон смещения Вина

Закон смещения Вина получен путем исследования закона Планка на максимум.

Он говорит о том, что с увеличением температуры максимум излучения смещается в сторону меньших длин волн:

$$\lambda_{max}T = Const. \quad (5)$$

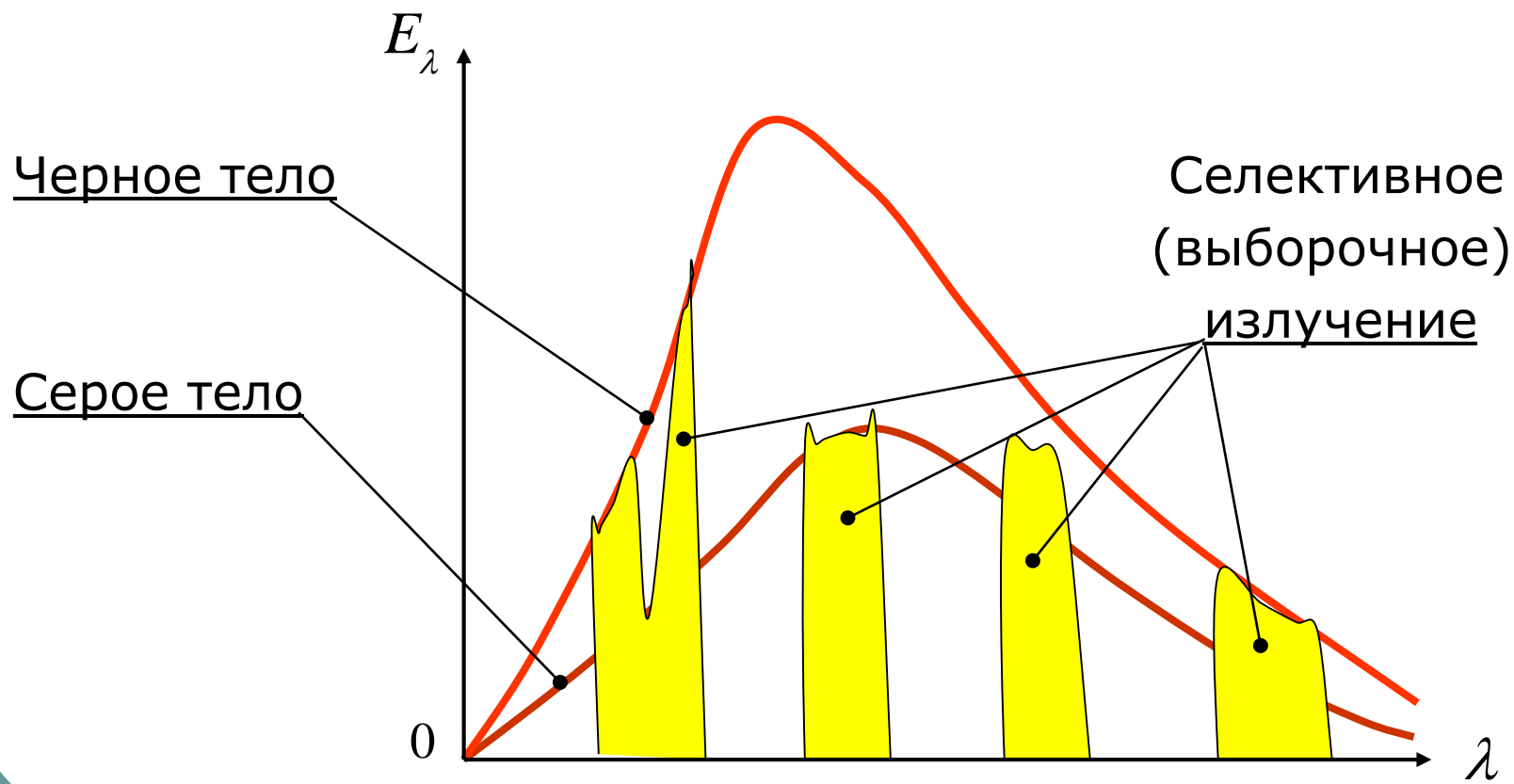
Солнечный лучистый тепловой поток

При температурах на поверхности Солнца порядка 5000-6000 К максимум излучения приходится на длину волн видимого излучения (света) $\lambda=0,4-0,8$ мкм.

Поэтому, несмотря на узкий диапазон длин волн, до Земли доходит значительная доля теплоты в световом диапазоне [площадь под изотермой ($T \approx 5500$ К)=Const].

Смотрите слайд «Графическая интерпретация закона Планка».

Селективное (выборочное) излучение ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ, ГАЗОВ



Закон Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость плотности интегрального полусферического излучения от температуры:

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (6)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ – константа излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана

Стефан нашел эту зависимость опытным путем, а Больцман проинтегрировал выражение закона Планка в диапазоне $\lambda=0-\infty$.

Для удобства практических расчетов выражение (6) закона Стефана-Больцмана представляется в виде, Вт/м²:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (7)$$

Здесь $c_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴) – константа излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана для серых тел

Считается, что закон Стефана-Больцмана применим и для серых (реальных) тел.

При этом предполагается, что излучение серых тел также пропорционально 4-й степени абсолютной температуры:

$$E = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (8)$$

где ε – степень черноты тела.

Степень черноты тела

Поделив (8) на (7), получим:

$$\varepsilon = E/E_0, \quad (9)$$

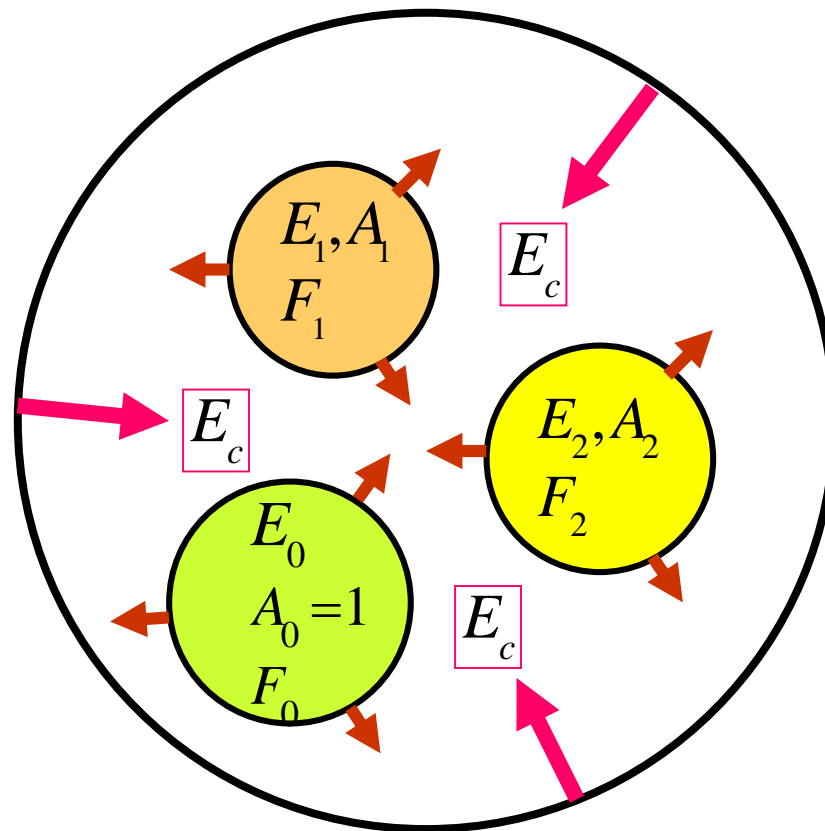
то есть **степень черноты тела** – это отношение излучательных способностей серого и абсолютно черного тел при одинаковой температуре.

Степень черноты тела зависит от его физических свойств, температуры и состояния поверхности ($\varepsilon_{\text{шер}} > \varepsilon_{\text{гл}}$).

$\varepsilon=0$ – абсолютно белое (зеркальное) тело;

$\varepsilon=1$ – абсолютно черное тело.

Лучистый теплообмен в замкнутой системе (к закону Кирхгофа)



Тепловой баланс (к закону Кирхгофа)

Закон Кирхгофа устанавливает зависимость между энергиями излучения и поглощения серых и абсолютно черного тел.

Его можно получить из теплового баланса теплоизолированной системы, внутри которой отсутствуют теплопроводность и конвекция.

Тело	Излучает	Поглощает
Первое	$E_1 F_1$	$E_c A_1 F_1$
Второе	$E_2 F_2$	$E_c A_2 F_2$
Третье	$E_0 F_0$	$E_c A_0 F_0 = E_c F_0$

Закон Кирхгофа и следствие из него

При тепловом равновесии с учетом того, что поглощательная способность абсолютно черного тела $A_0=1$:

$$E_1 F_1 = E_c A_1 F_1; \quad E_2 F_2 = E_c A_2 F_2; \quad E_0 F_0 = E_c A_0 F_1 = E_c F_1; \quad (10)$$

Из (10) получаем **выражение закона Кирхгофа**:

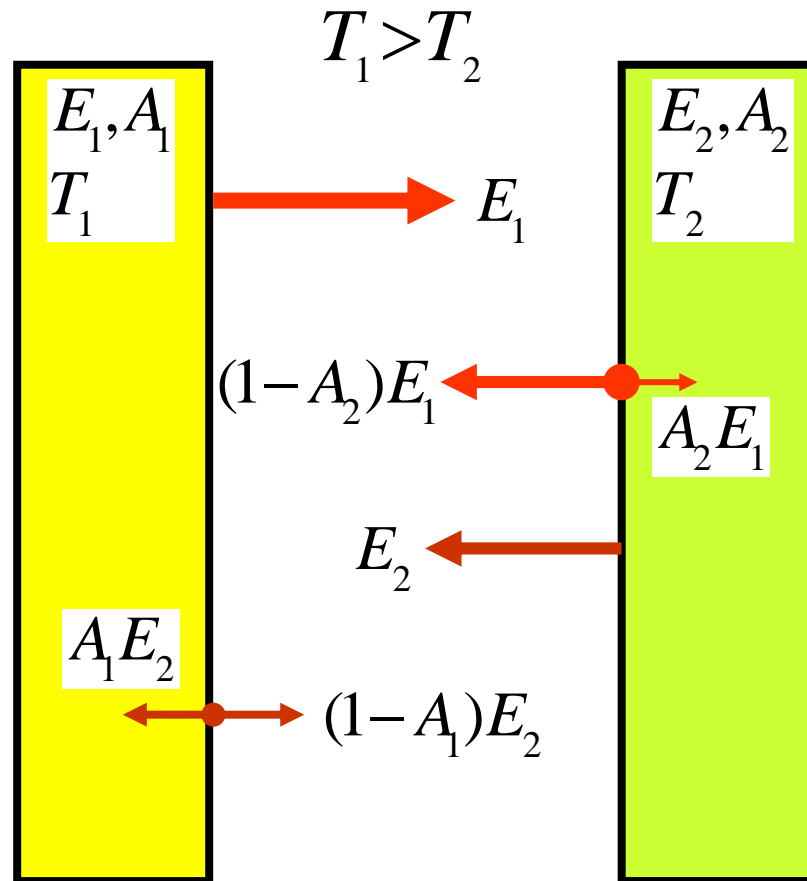
$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = E_c = E_0 = f(T). \quad (11)$$

Из уравнения (11) – **следствие из закона Кирхгофа**:

$$A_1 = \frac{E_1}{E_0} = \varepsilon_1; \quad A_2 = \frac{E_2}{E_0} = \varepsilon_2; \quad A = \frac{E}{E_0} = \varepsilon, \quad (12)$$

то есть поглощательные способности тел и их степени черноты равны между собой.

Лучистый теплообмен между параллельными поверхностями



Допущения

Допущения: высота и ширина поверхностей много больше расстояния между ними, теплопроводность и конвекция отсутствуют.

На предыдущем слайде показаны только первые отражения поверхностями лучистых потоков.

Отраженные потоки попадают на противоположные поверхности и снова частично поглощаются и отражаются, и так до бесконечности (до полного поглощения).

Обозначения

На предыдущем слайде обозначены соответственно:

E_1, F_1, T_1 – излучательная, поглощательная способности и температура левой поверхности;

E_2, F_2, T_2 – то же для правой поверхности;

A_1E_2, A_2E_1 – лучистая энергия, поглощенная левой и правой поверхностями;

$(1-A_1)E_2, (1-A_2)E_1$ – лучистая энергия, отраженная левой и правой поверхностями.

Эффективные излучения поверхностей

С учетом многочисленных переотражений эффективные излучения поверхностей будут:

$$q_1 = E_1 + (1 - A_1)q_2; \quad (1)$$

$$q_2 = E_2 + (1 - A_2)q_1. \quad (2)$$

После подстановки

(2) в (1) имеем: $q_1 = E_1 + (1 - A_1)E_2 + (1 - A_1)(1 - A_2)q_1,$

откуда: $q_1 = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$

Аналогично после подстановки (1) в (2):

$$q_2 = \frac{E_2 + E_1 - A_2 E_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} = \frac{E_1 + E_2 - A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$$


Лучистый тепловой поток

Результирующий лучистый тепловой поток между поверхностями:

$$q = q_1 - q_2 = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2 - E_1 - E_2 + A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$$

После сокращения E_1 , E_2 с разными знаками и замены поглощательных способностей поверхностей A_1 , A_2 на равные им степени черноты ε_1 , ε_2 (по следствию из закона Кирхгофа) имеем:

$$q = \frac{\varepsilon_2 E_1 - \varepsilon_1 E_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}. \quad (3)$$

Поделив числитель и знаменатель на ε_1 , ε_2 , получим: 

$$q = \frac{\frac{E_1}{\varepsilon_1} - \frac{E_2}{\varepsilon_2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (4)$$

Приведенная степень черноты

Вводим обозначение
приведенной степени
черноты поверхностей:

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

После подстановки в (4) выражений закона
Стефана-Больцмана для поверхностей

$$E_1 = \varepsilon_1 c_0 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4; E_2 = \varepsilon_2 c_0 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4,$$

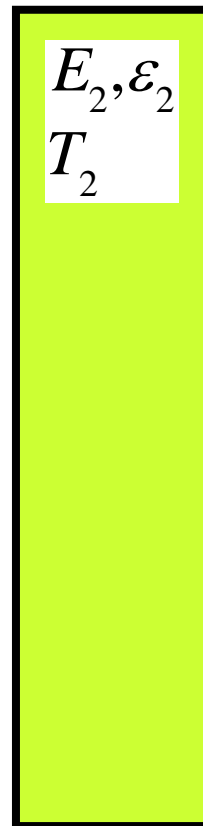
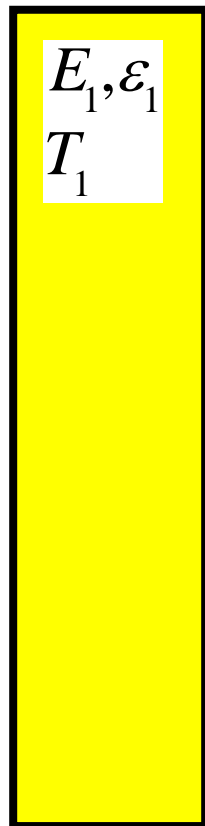
получим **удельный лучистый тепловой поток** между
параллельными поверхностями Вт/м²:

$$q = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right].$$

(5)

Тепловые экраны

$$T_1 > T_2$$



Требования к тепловым экранам

Лучистый теплообмен в излучающих системах может быть уменьшен за счет применения тепловых экранов, которые устанавливаются перпендикулярно к направлению излучения и выполняются из материалов с малой поглощательной и высокой отражательной способностями (алюминиевая фольга).

В результате переизлучения экранами в направлении, обратном направлению распространения теплоты, величина результирующего теплового потока соответственно уменьшается.

Рассмотрим параллельные поверхности и установим между ними тепловой экран.

Лучистый теплообмен при наличии экранов

Для простоты предположим, что степени черноты поверхностей и экрана одинаковы, тогда при стационарном режиме, пренебрегая термическим сопротивлением тонкого экрана (алюминиевая фольга), лучистый тепловой поток от левой поверхности к экрану и от экрана к правой поверхности, Вт/м²:

$$q_{1-\varepsilon} = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\varepsilon}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

$$q_{\varepsilon-2} = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_\varepsilon}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

При $q_{1-\varepsilon} = q_{\varepsilon-2}$ из (6) и (7) найдем температуру экрана:

$$\left(\frac{T_\varepsilon}{100} \right)^4 = 0,5 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (8)$$

Эффективность тепловых экранов

Подставив (8) в (6), получим лучистый тепловой поток от левой поверхности к экрану:

$$q_{1-э} = 0,5 \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{q_{1-2}}{2}, \quad (9)$$

то есть при наличии одного экрана лучистый тепловой поток сокращается в 2 раза, аналогично можно доказать, что при « n » экранах тепловой поток уменьшится в $(n+1)$ раз.

Выше рассматривалась «альфолевая» изоляция, в которой установлены « n » экранов на расстоянии 5-10 мм друг от друга.

Они минимизировали свободную конвекцию воздуха в узких щелях между листами алюминиевой фольги (теплота передавалась теплопроводностью и излучением).