

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС

В

ЯДЕРНО-

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ

УСТАНОВКАХ

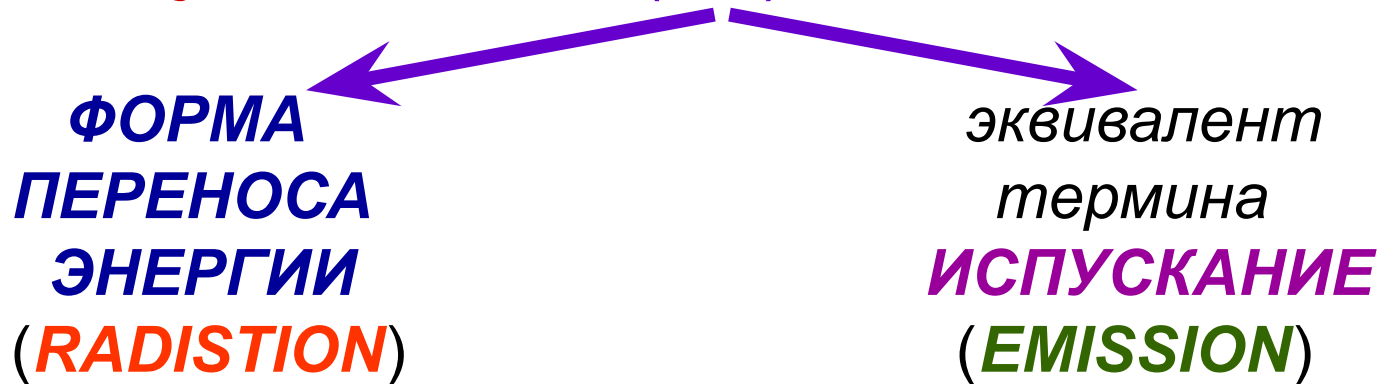
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Тема № 4

**ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ
(РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН).
СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН**

Под термином **ИЗЛУЧЕНИЕ** в теории теплообмена понимают совокупность электромагнитных волн и фотонов различной частоты, распространяющихся в физических средах и способных взаимодействовать с веществом в различных его формах.

Термин **излучение** имеет 2(два) смысловых значения:



**ФОРМА
ПЕРЕНОСА
ЭНЕРГИИ
(**RADISTION**)**

эквивалент
термина
**ИСПУСКАНИЕ
(**EMISSION**)**

В зависимости от физического процесса взаимодействия излучения и вещества **потоки излучения** подразделяются на

• **ИСХОДЯЩИЙ** • **СОБСТВЕННЫЙ** • **ПОГЛАЩЁННЫЙ**

• **ПАДАЮЩИЙ** • **ОТРАЖЁННЫЙ** • **РАССЕЯННЫЙ**

• **ОСЛАБЛЕННЫЙ** • **ПРОПУЩЕННЫЙ** • **РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ**

ИСХОДЯЩИЙ (исх.) – сумма собственного, отражённого и пропущенного потоков.

ПАДАЮЩИЙ (пад.) – приходящий на поверхность тела со всех направлений.

ОСЛАБЛЕННЫЙ (осл.) – 1) сумма поглощённого и рассеянного потоков; 2) разность падающего и пропущенного. Выражает общую потерю энергии.

СОБСТВЕННЫЙ (СОБ.) – излучённый телом во всех направлениях.

ОТРАЖЁННЫЙ (ОТР.) – отражаемый (обратно) телом во всех направлениях.

ПРОПУЩЕННЫЙ (ПР.) – прошедший сквозь тело во всех направлениях.

ПОГЛАЩЁННЫЙ (ПОГЛ.) – поток (энергии), перешедший из формы излучения в форму теплового движения структурных элементов (атомов и молекул) поглощающего тела.

РАССЕЯННЫЙ (РАС.) – часть падающего потока, изменившего в теле направление распространения, как бы «перераспределённого» между частями.

РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ (РЕЗ.) – разность собственного и поглощённого потоков, то есть поток энергии, переданной телу («оставшейся в нём») и пошедшей на изменение внутренней энергии тела в следствие испускания и поглощения.

ИСХОДЯЩИЙ = **СОБСТВЕННЫЙ** + **ОТРАЖЁННЫЙ**

ПАДАЮЩИЙ = **ПОГЛОЩЁННЫЙ** + **ОТРАЖЁННЫЙ** + **ПРОПУЩЕННЫЙ**

ОСЛАБЛЕННЫЙ = **РАССЕЯННЫЙ** + **ПОГЛОЩЁННЫЙ**

Распределение падающего излучения

Отражённое излучение

Q_R

Падающее излучение

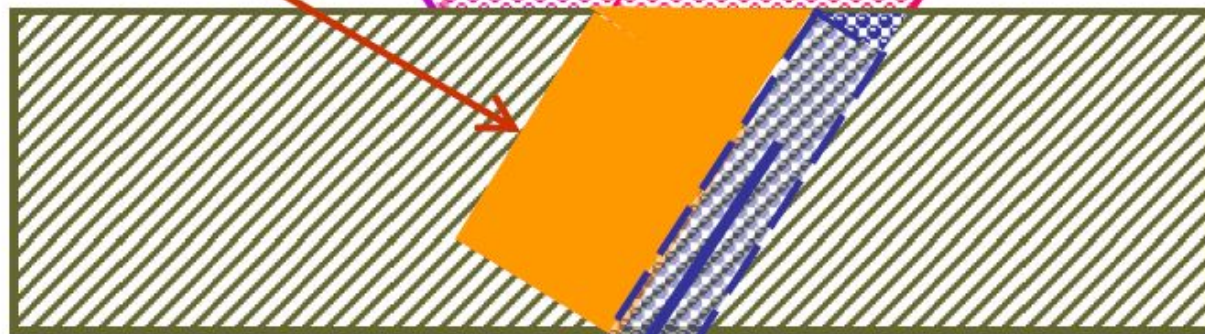
Q

Поглащённое излучение

Q_A

Проедшее излучение

Q_D



Интегральное излучение (Полный поток энергии излучения), Q [Вт] – энергия, излучаемая телом во всех направлениях в единицу времени. 10

Излучательная способность (Плотность потока интегрального излучения), E [Вт/м²] – поток интегрального излучения с поверхности единичной площади:

$$E = \frac{dQ}{dS} \quad .$$

Спектральная излучательная способность (Спектральная плотность потока излучения), J_λ [Вт/м³] – излучательная способность в бесконечно малом диапазоне длин волн, отнесённая к этому диапазону:

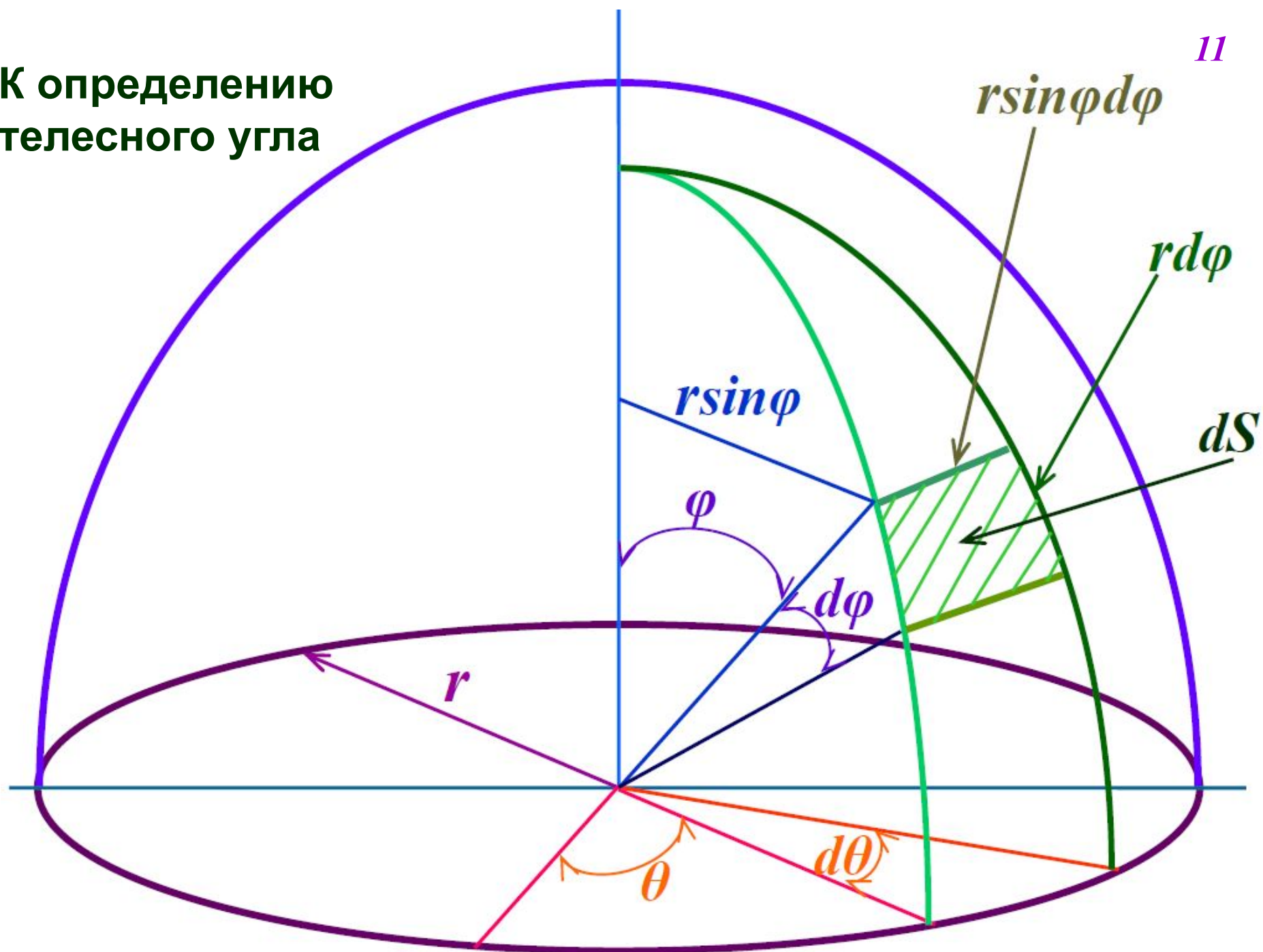
$$J_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad .$$

Яркость (Интенсивность) излучения, I [Вт/(м²·ср)] – количество энергии, излучаемой в единицу времени в направлении угла φ элементарной площадкой поверхности dS , отнесённое к единице телесного угла и единице площади проекции этой площадки на плоскость перпендикулярную направлению излучения:

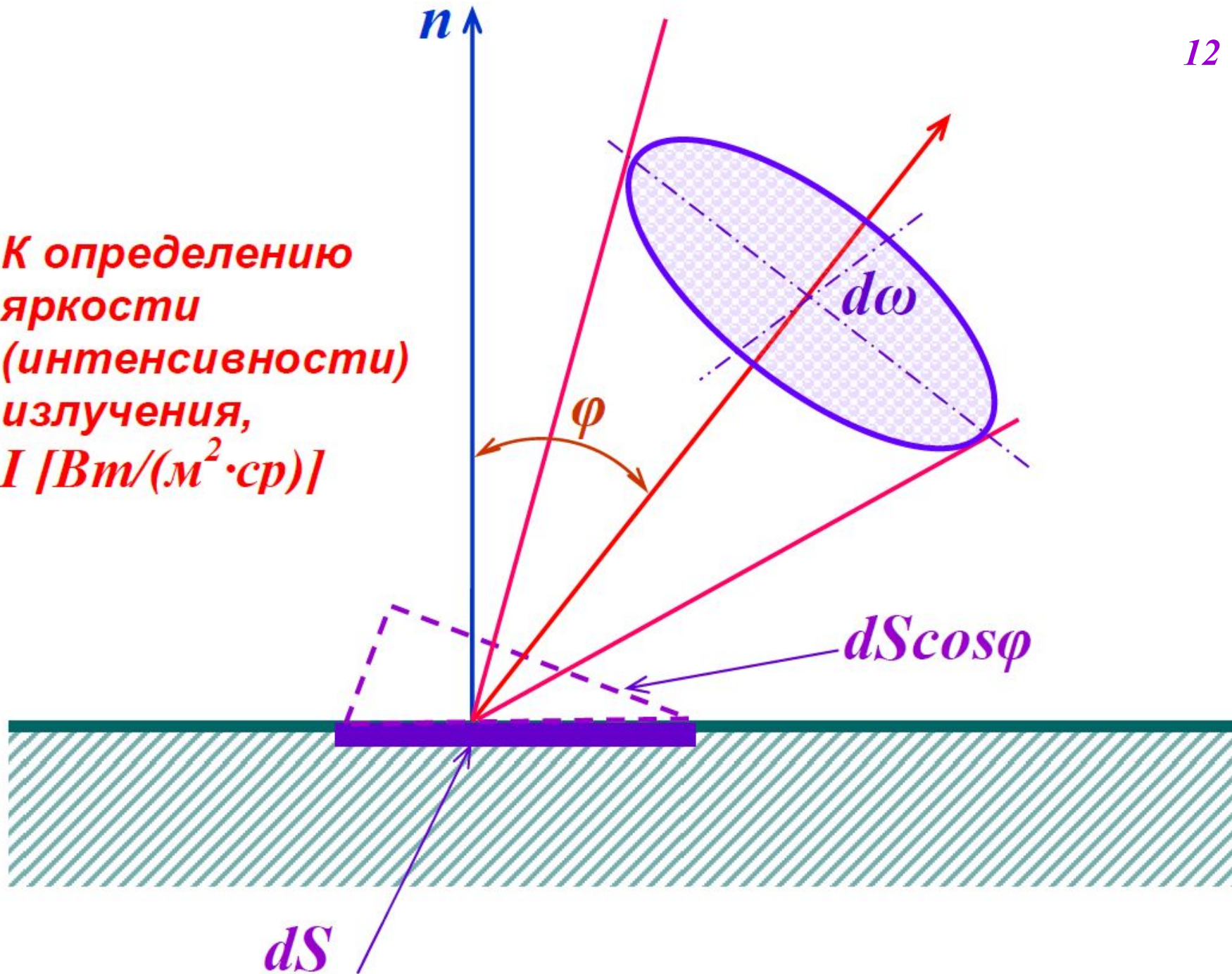
$$I = \frac{d^2 Q}{d\omega dS \cos \varphi} = \frac{dE}{d\omega \cos \varphi} \quad .$$

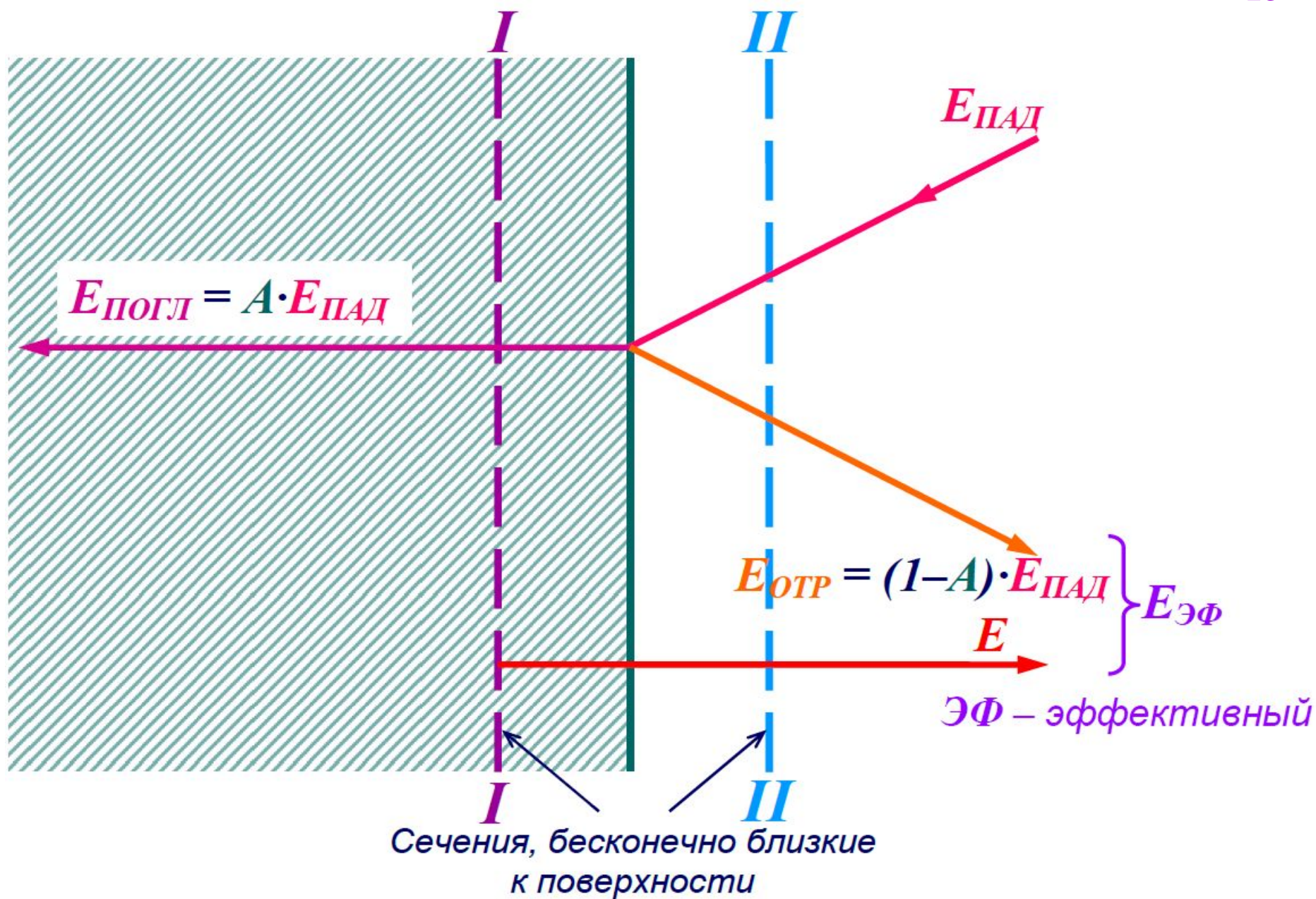
Спектральная яркость излучения [Вт/(м³·ср)]: $I_\lambda \equiv \frac{dI}{d\lambda} \quad .$

К определению
телесного угла



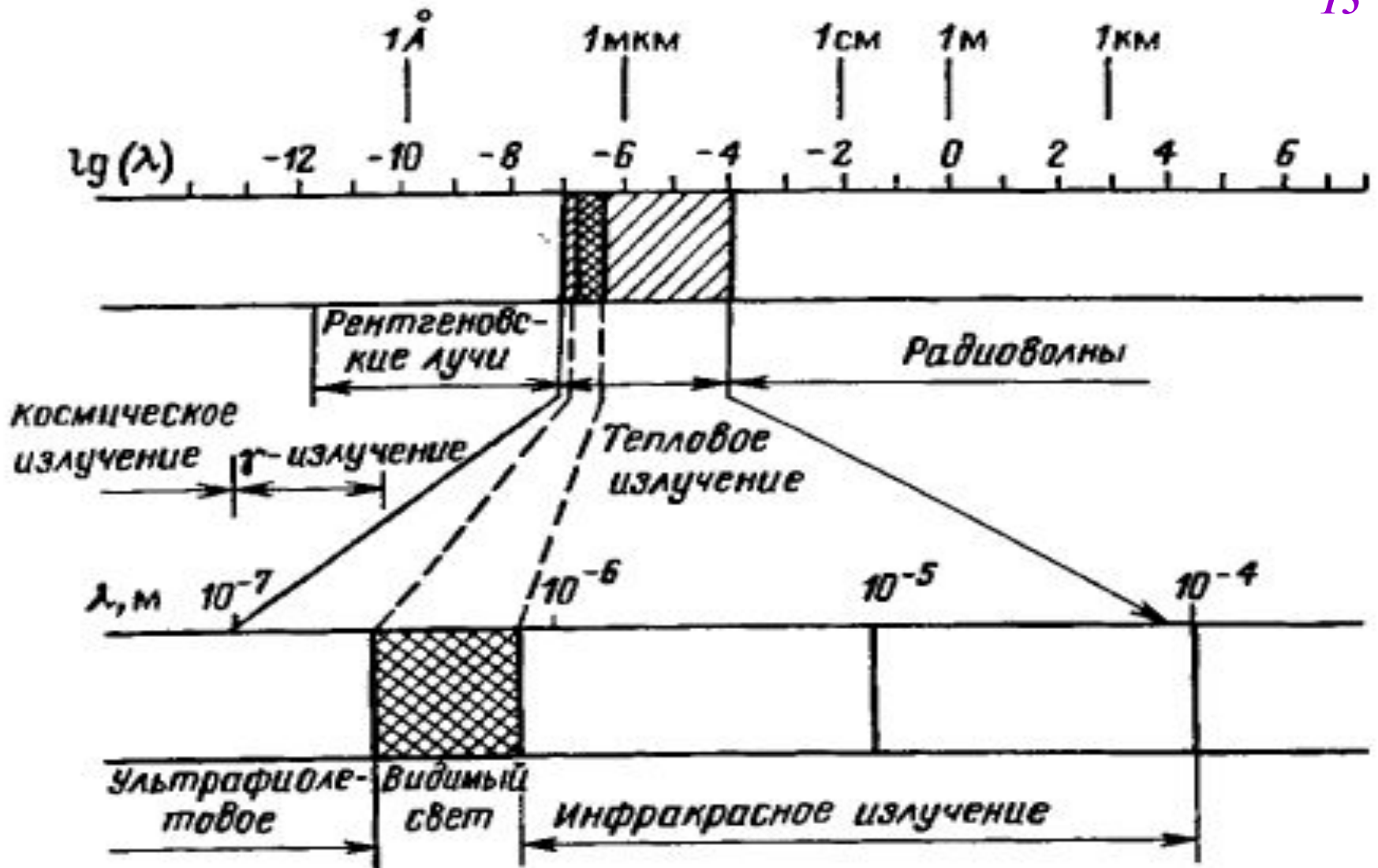
К определению
яркости
(интенсивности)
излучения,
 $I [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})]$





Тепловое излучение – электромагнитное излучение, энергия которого получена за счёт возбуждения теплового движения возбуждения тепловым движением атомов, молекул и других частиц вещества.

Энергия теплового излучения – энергия, переносимая электромагнитным излучением, полученным за счёт возбуждения тепловым движением частиц вещества.



Область теплового излучения в электромагнитном спектре

Процесс *теплового излучения* связан с
последовательным превращением кинетической энергии
частиц вещества в энергию их возбуждённого состояния и
затем в энергию электромагнитного излучения.

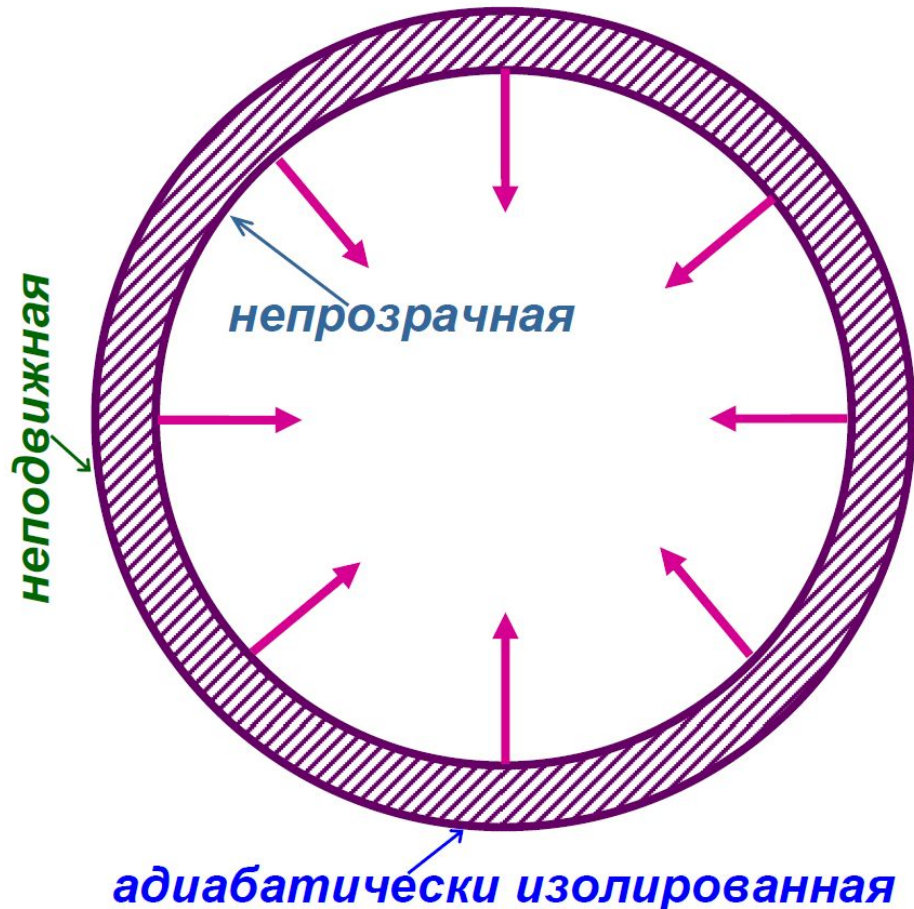
Из рассмотрения исключаются:

- случаи, когда процессы взаимодействия излучения и вещества вызывают какие-либо изменения в телах (ионизация, изменение свойств, химические реакции и др.);
- неравновесные процессы излучения (люми-несценция, хемилюминесценция; рекомбинационное, ударное и когерентное испускание);
- различные формы взаимодействия фаз излучения.

Поток теплового излучения – количество энергии теплового излучения, переносимое за единицу времени через произвольную поверхность.

Плотность потока теплового излучения
(Излучательная способность теплового излучения),
 h [Вт/м²] – поток излучения через поверхность (с поверхности) единичной площади.

Термодинамическое равновесие – состояние системы, адиабатически изолированной от окружающей среды, при котором объёмная плотность энергии для любой точки системы не меняется во времени, а термодинамические параметры, определяющие состояние любых её элементов, равны.



Равновесное (термодинамически равновесное) излучение – излучение, которое находится в состоянии термодинамического равновесия с испускающей его системой молекул стенки (внутренней поверхности) замкнутой полости.

Свойства равновесного излучения

$$E_{\text{погл}} = E_{\text{изл}}$$

1. Если во всех точках поверхности плотность потока излучения одинакова, то во всех точках полости равновесное значение объёмной плотности излучения одинаково.
2. Если процессы испускания происходят с одинаковой вероятностью по всем направлениям, то в каждой точке полости излучение изотропно.
3. Температура в каждой произвольной точке поля излучения одинакова и равна температуре полости в состоянии термодинамического равновесия.

В условиях термодинамического равновесия спектральная излучательная способность равна поглощательной способности при той же длине волны и температуре:

$$a_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{изл}} = a_{\text{тело}, \lambda} h_{\text{АЧТ}, \lambda}^{\text{изл}}(\lambda, T) \quad .$$

$$h_{\text{АЧТ}} \equiv h_0 \quad .$$

$$h_{, \lambda}^{\text{изл}} = a_{, \lambda} h_0(\lambda, T) \quad .$$

Абсолютно чёрное тело (АЧТ) – условное тело (физическая абстракция), которое полностью поглощает всё падающее на него излучение, независимо от направления распространения, спектрального состава и состояния поляризации излучения.

Фундаментальные законы теплового излучения, характеризующие свойства равновесного излучения, формулируются как законы излучения **абсолютно чёрного тела**.

$h_{,\lambda}^{\text{изл}}$ ***[Вт/м³]***, – **спектральный поток (спектральная излучательная способность) теплового излучения** – отношение спектрального поверхностного потока в бесконечно малом спектральном интервале к величине этого интервала в одной из спектральных шкал:

$$h_{,\lambda}^{\text{изл}} \equiv \frac{dh^{\text{изл}}}{d\lambda} \quad ; \quad h^{\text{изл}} = \int_{\lambda} h_{,\lambda}^{\text{изл}} d\lambda \quad .$$

$a_{,\lambda}$ – **спектральная поглощательная способность теплового излучения** – отношение спектральной интенсивности (спектральной яркости) поглощённого теплового излучения к интенсивности падающего теплового излучения:

$$a_{,\lambda} \equiv \frac{I_{,\lambda}^{\text{пад}} - I_{,\lambda}^{\text{пр}}}{I_{,\lambda}^{\text{пад}}} \quad .$$

Закон Кирхгофа

В условиях термодинамического равновесия отношение спектральной плотности испускаемого потока излучения к спектральной поглощающей способности тела является одинаковым для всех тел и равным спектральной плотности потока излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре.

$$\frac{h_{1,\lambda}^{\text{изл}}}{a_{1,\lambda}} = \frac{h_{2,\lambda}^{\text{изл}}}{a_{2,\lambda}} = \dots = \frac{h_{n,\lambda}^{\text{изл}}}{a_{n,\lambda}} = h_{\text{АЧТ},\lambda}^{\text{изл}}(\lambda, T)$$

Излучательная способность тела, $\varepsilon_{\text{тело},\lambda}$ – отношение спектральной плотности потока излучения тела к спектральной плотности излучения абсолютно чёрного тела:

$$\varepsilon_{\text{тело},\lambda} \equiv \frac{h_{\text{тело},\lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{h_{\text{АЧТ},\lambda}^{\text{ИЗЛ}}} .$$

1-е следствие закона Кирхгофа: «В условиях термодинамического равновесия отношение излучательной способности тела к его спектральной поглощательной способности равно единице, то есть в условиях термодинамического равновесия излучательная и поглощательная способность тела равны»:

$$\frac{\varepsilon_{\text{тело},\lambda}}{a_{\text{тело},\lambda}} = 1 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\varepsilon_{1,\lambda}}{a_{1,\lambda}} = \frac{\varepsilon_{2,\lambda}}{a_{2,\lambda}} = \dots = \frac{\varepsilon_{n,\lambda}}{a_{n,\lambda}} = 1 .$$

Удостоверимся в справедливости 1-го следствия:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} \varepsilon_{\text{тело}, \lambda} = \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{h_{\text{АЧТ}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}} & \Leftrightarrow h_{\text{АЧТ}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}} = \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{\varepsilon_{\text{тело}, \lambda}} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \\
 & \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{a_{\text{тело}, \lambda}} = h_{\text{АЧТ}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}} \Leftrightarrow h_{\text{АЧТ}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}} = \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{a_{\text{тело}, \lambda}} . \\
 & \Leftrightarrow \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{\varepsilon_{\text{тело}, \lambda}} = \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{a_{\text{тело}, \lambda}} \Leftrightarrow \frac{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}}{h_{\text{тело}, \lambda}^{\text{ИЗЛ}}} = \frac{\varepsilon_{\text{тело}, \lambda}}{a_{\text{тело}, \lambda}} \Rightarrow \frac{\varepsilon_{\text{тело}, \lambda}}{a_{\text{тело}, \lambda}} = 1 .
 \end{aligned}$$

2-е следствие закона Кирхгофа: «Так как у абсолютно чёрного тела $a_{0,\lambda}=1$, а у остальных тел $a_{\text{тело},\lambda}<1$, то из всех тел при одной и той же температуре максимальным спектральным излучением для всех длин волн обладает абсолютно чёрное тело».

26

3-е следствие закона Кирхгофа: «Если в замкнутой полости вещество и излучение находятся в состоянии термодинамического равновесия, то распределение по спектру объёмной плотности энергии излучения определяется только температурой замкнутой полости и не зависит от величин, характеризующих вещество стен полости. Следовательно, можно приписать понятие температуры не только полости, но и отдельным спектральным составляющим объёмной плотности энергии излучения $q_v^{\text{изл}}$, $[q_v^{\text{изл}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ ».

В результате задача расчёта излучения реальных тел сводится к отысканию независящей от свойств вещества функции объёмной плотности излучения $q_{v, \text{АЧТ}, \lambda}^{\text{изл}} = f(\lambda, T)$ ».

Закон Стефана-Больцмана

Установлен экспериментально Стефаном в 1879 году и обоснован теоретически Больцманом в 1884 году и Планком в 1901 г.

Закон Стефана-Больцмана устанавливает для равновесных условий связь интегрального полусферического потока излучения элемента поверхности абсолютно чёрного тела с его абсолютной температурой:

«Плотность (поверхностная) потока равновесного излучения элемента поверхности абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры:

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана: $\sigma_0 \approx 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

$$h_0^{\text{изл}} = \sigma_0 T^4$$

Закон Стефана-Больцмана – теоретическая основа для вычисления потока энергии, излучаемой всяким нагретым телом, если известны его (тела) температура и радиационные характеристики.

Определим: **интенсивность объёмного излучения j [Вт/(м³·ср)]**

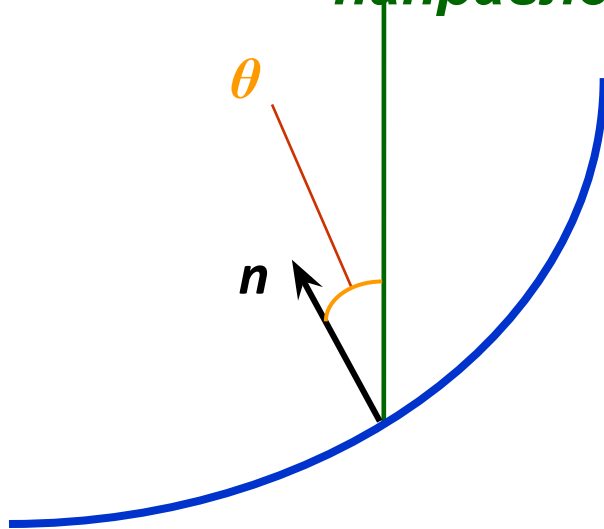
– мощность излучения в единице объёма в единичном телесном угле:

$$j_{\text{АЧТ}} \equiv \frac{dq_{\text{АЧТ}}}{d\omega} \quad .$$

Закон Ламберта

«Интенсивность равновесного излучения на поверхности абсолютно чёрного тела не зависит от угла и направления, то есть интенсивность излучения абсолютно чёрного тела изотропна»

**выбранное
направление**



Закон Ламберта, сформулированный для интенсивности имеет вид:

$$I_{\theta} = I_N \cos \theta = B \cos \theta \quad .$$

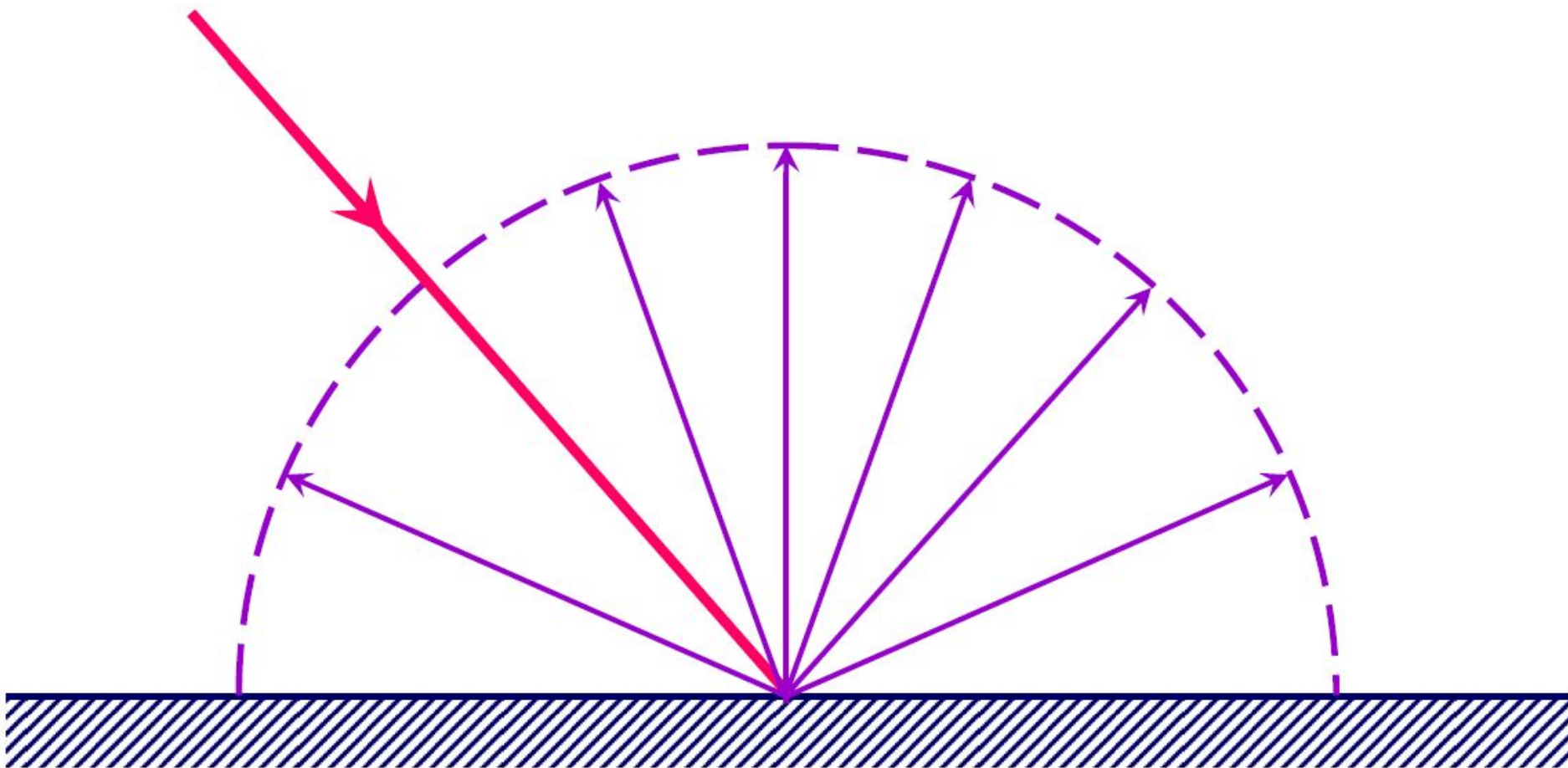
I_{θ} – интенсивность в направлении θ ;

I_N – интенсивность в направлении нормали;

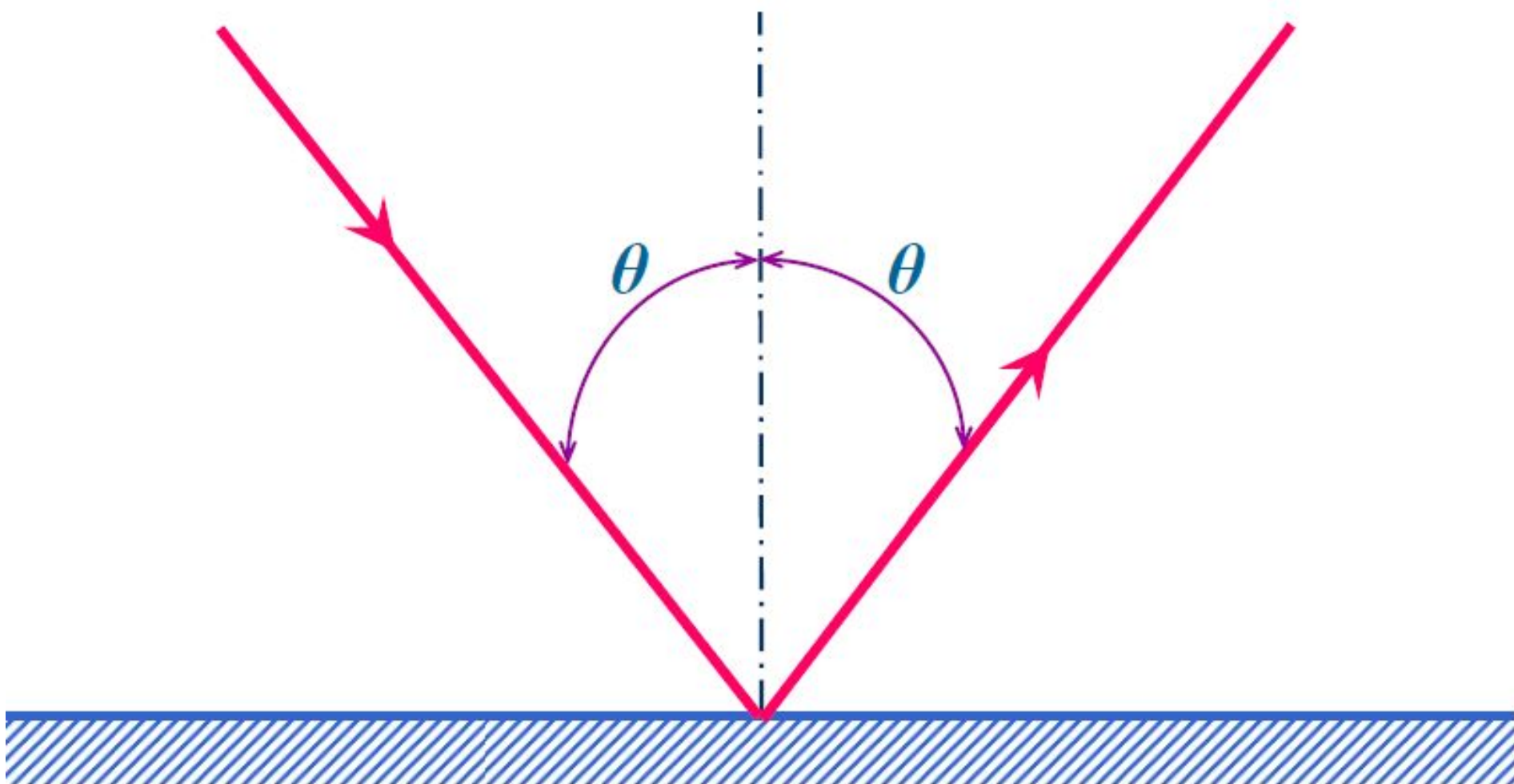
B – энергетическая яркость.

Диффузное излучение – излучение, подчиняющееся закону Ламберта.

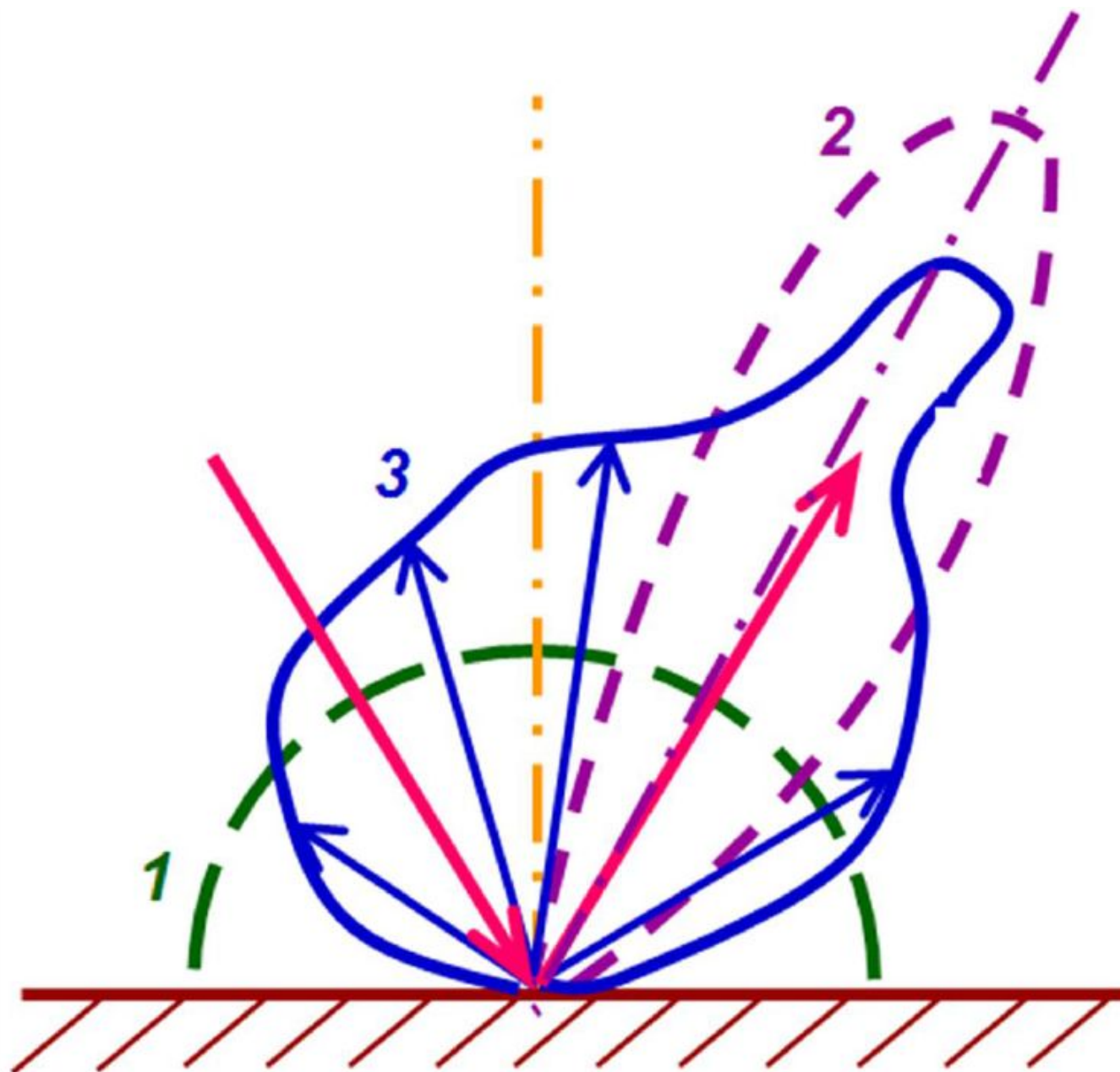
Серая поверхность излучения – излучающая поверхность, удовлетворяющая двум условиям: · эффективное излучение – диффузное; · на изотермических участках поверхности плотность излучения постоянна.



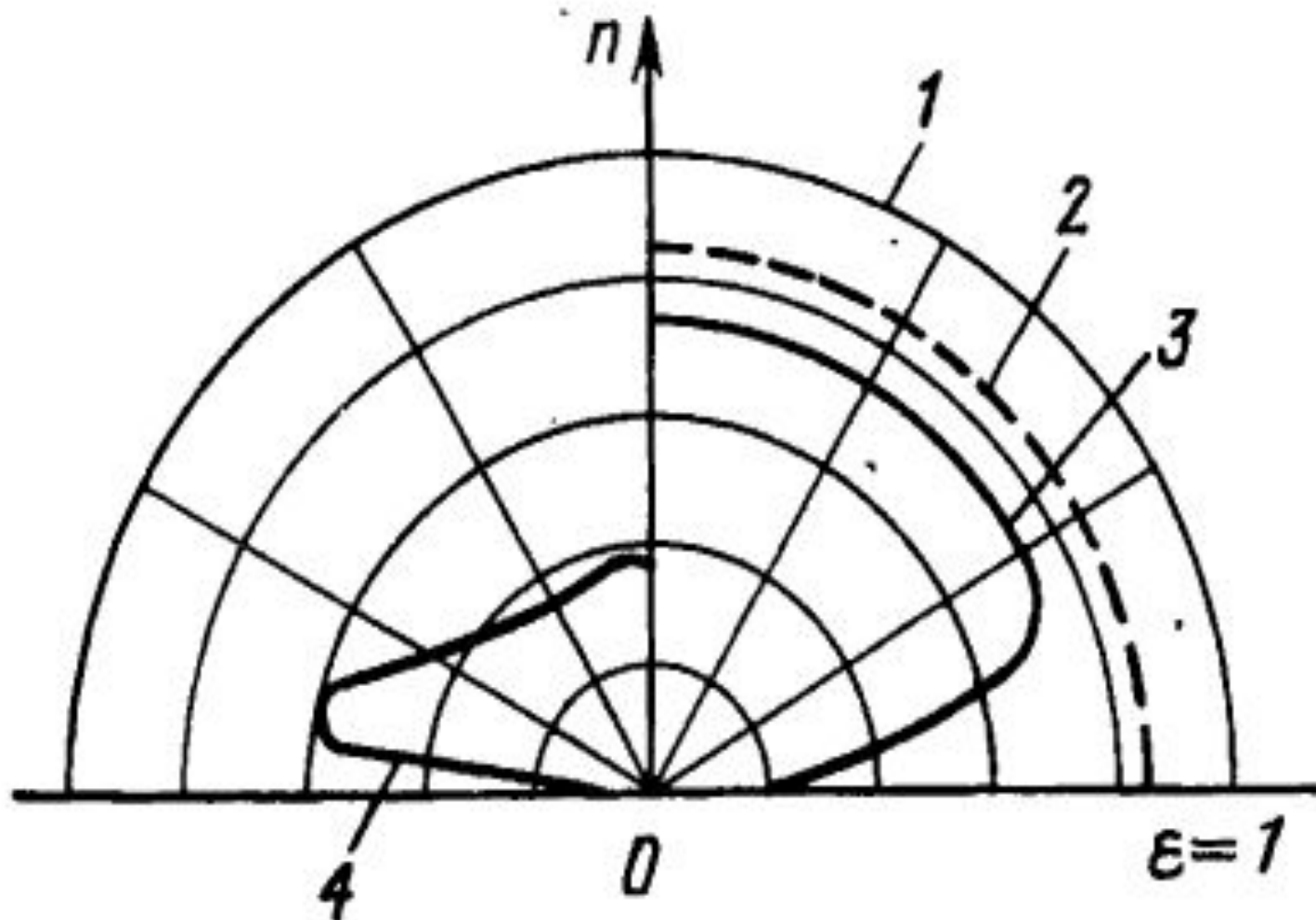
Типы отражательных поверхностей: **ДИФФУЗНАЯ**



Типы отражательных поверхностей: **ЗЕРКАЛЬНАЯ**



Типы отражательных поверхностей: **3 – РЕАЛЬНАЯ**



Распределение относительной излучательной способности различных тел
в зависимости от направления:

- 1 – абсолютно чёрное тело;
- 2 – серое тело;
- 3 – окисленные металлы, диэлектрики, дерево, бумага;
- 4 – полированные металлы.

Радиационные характеристики реальных тел

Относительная излучательная способность – ε –

отношение энергии излучения реальной поверхности к энергии излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре и прочих равных условиях.

Поглощательная способность – A – отношение энергии, поглощённой данной поверхностью, к энергии, поглощённой поверхностью абсолютно чёрного тела при облучении их одним и тем же потоком падающего излучения.

Отражательная способность – R – отношение энергии отражённой реальной поверхностью, к энергии, отражённой зеркальной (идеально отражающей) поверхностью при облучении их одним и тем же потоком падающего излучения.

Пропускная способность (прозрачность) – D – отношение энергии, прошедшей через вещество тела, к энергии падающего излучения. (!Прозрачность – характеристика вещества (материала тела), а не поверхности).

$$A + R + D = 1$$

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} + D_{\lambda} = 1$$

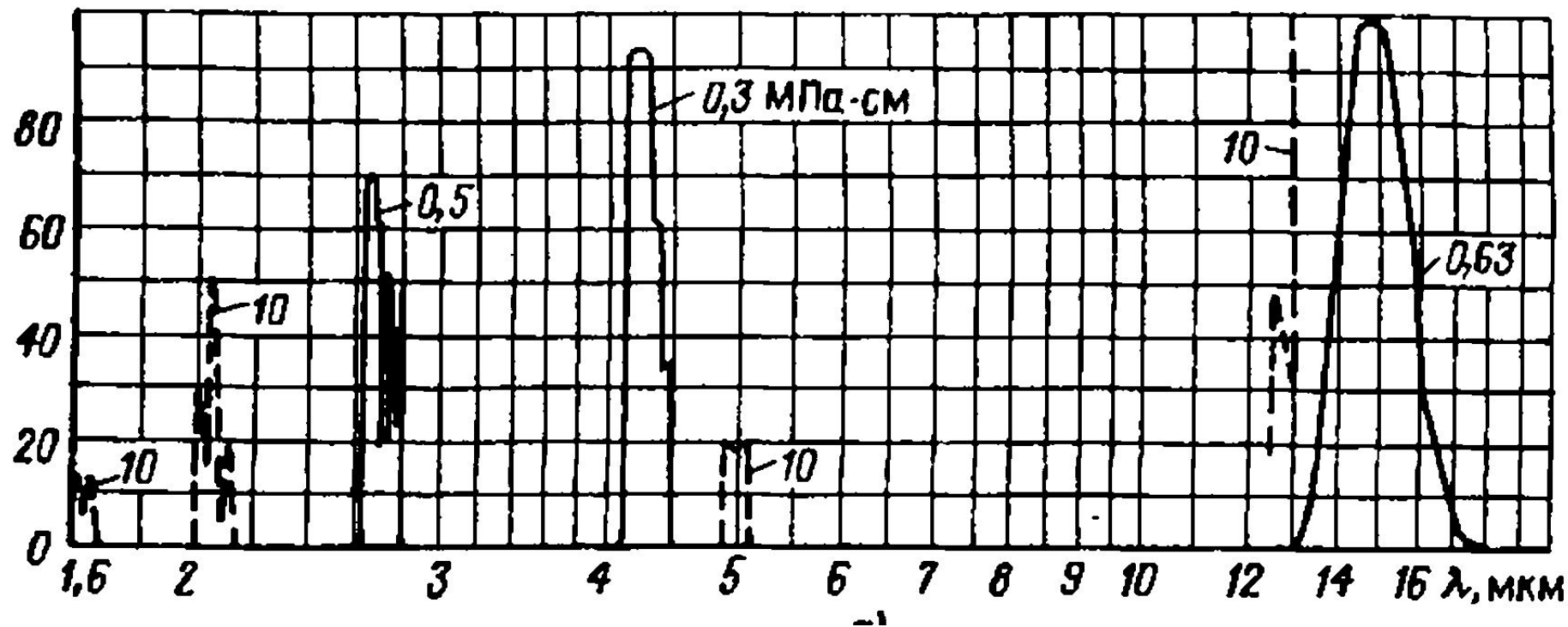
$$A_v + R_v + D_v = 1$$

$A=1$ $R=0$ $D=0$ – абсолютно чёрное тело

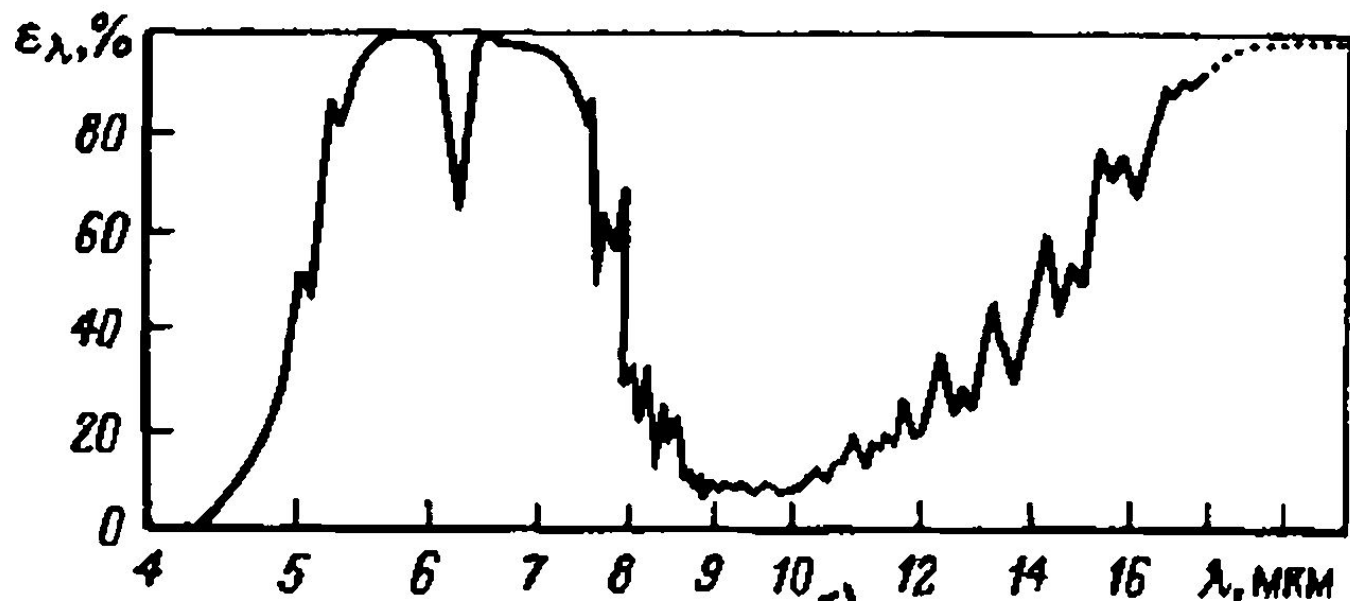
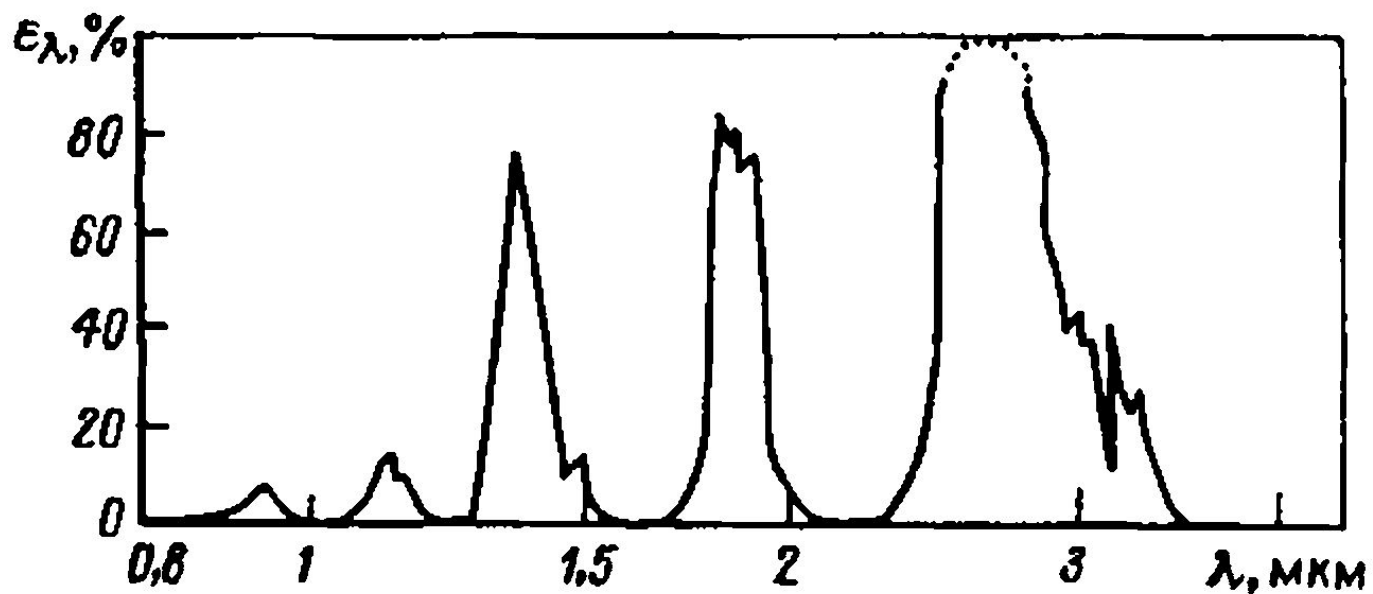
$A=0$ $R=1$ $D=0$ – зеркальная поверхность

$A=0$ $R=0$ $D=1$ – диатерическая среда

сухой воздух $D \approx 1$

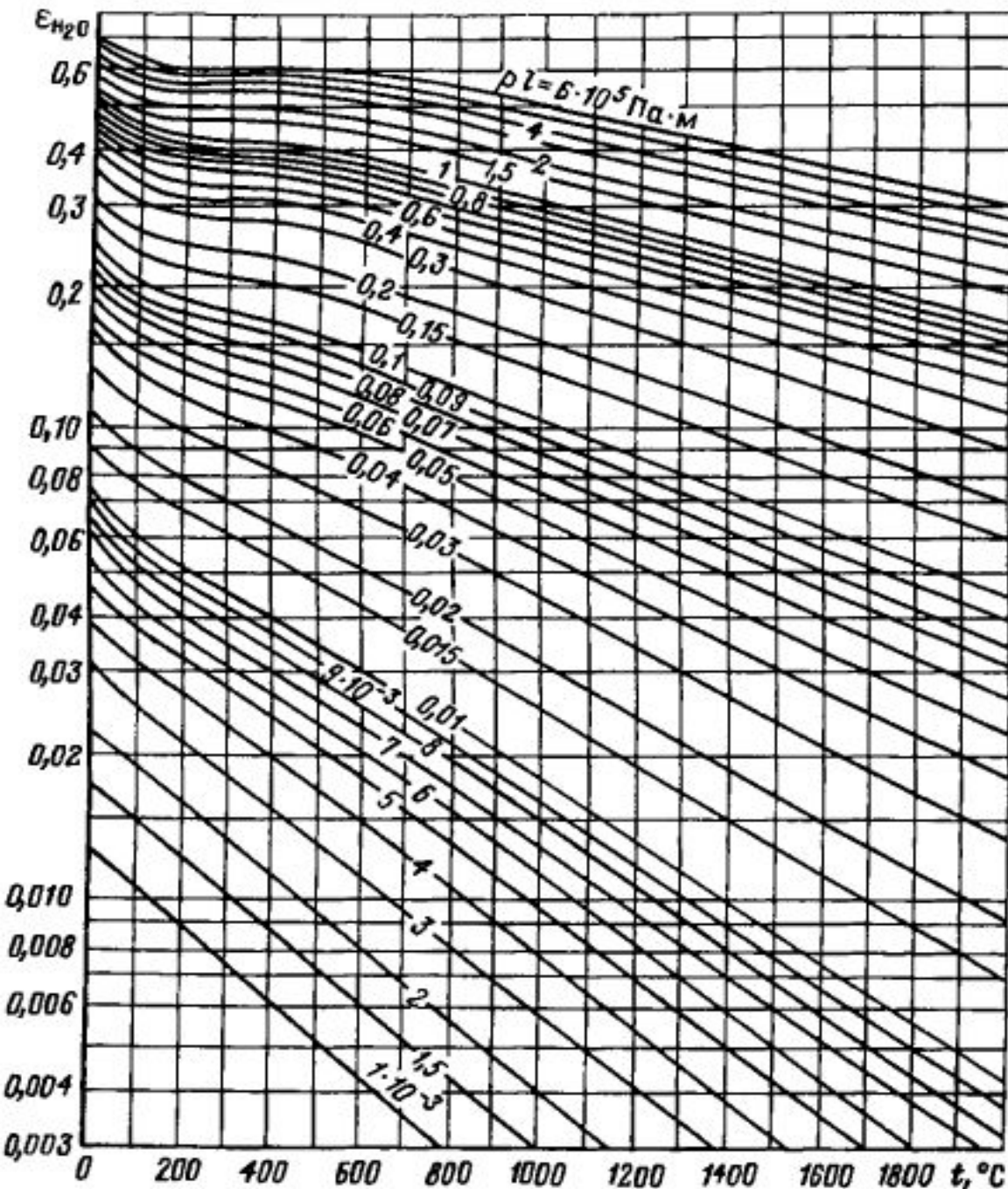
$A_{\lambda}, \%$ 

Спектр поглощения углекислого газа
[1]



Спектр поглощения водяного пара

[1]



Зависимость

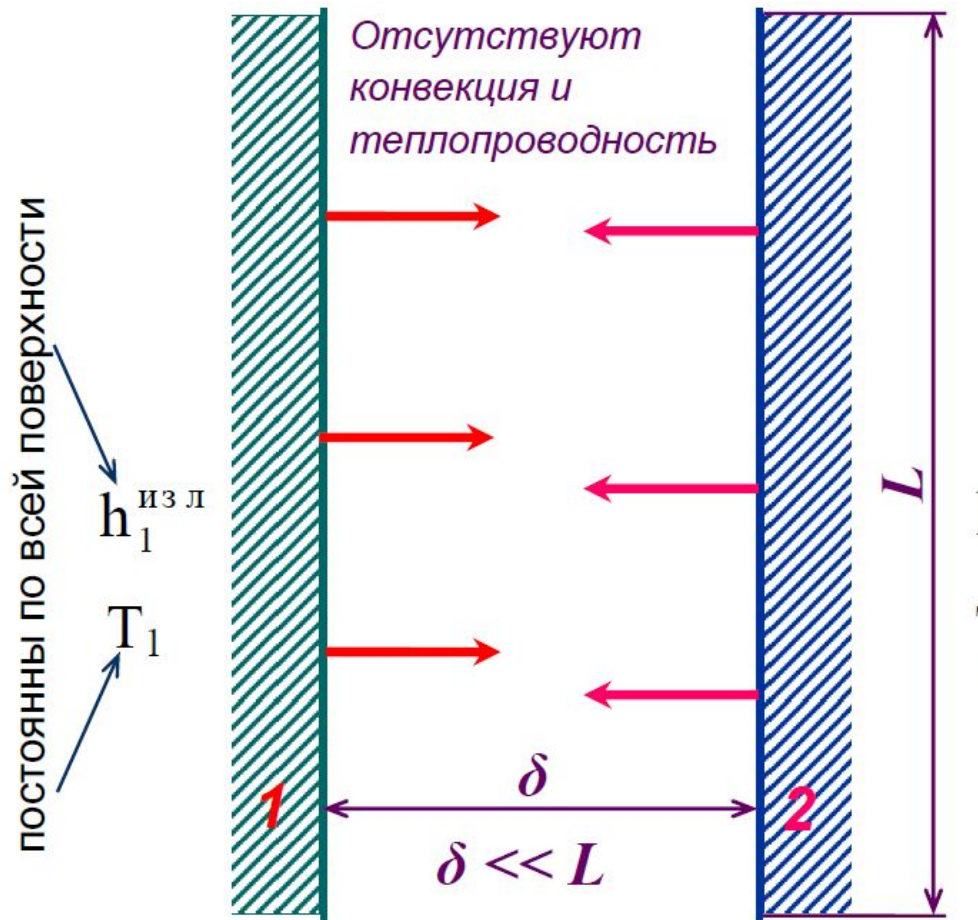
$$\epsilon = f(t, pl)$$

для **водяного пара**:

t – температура газа (водяного пара), $^\circ C$;

p – давление газа (водяного пара), **Па**;

l – толщина слоя газа (водяного пара), **м**; [1].



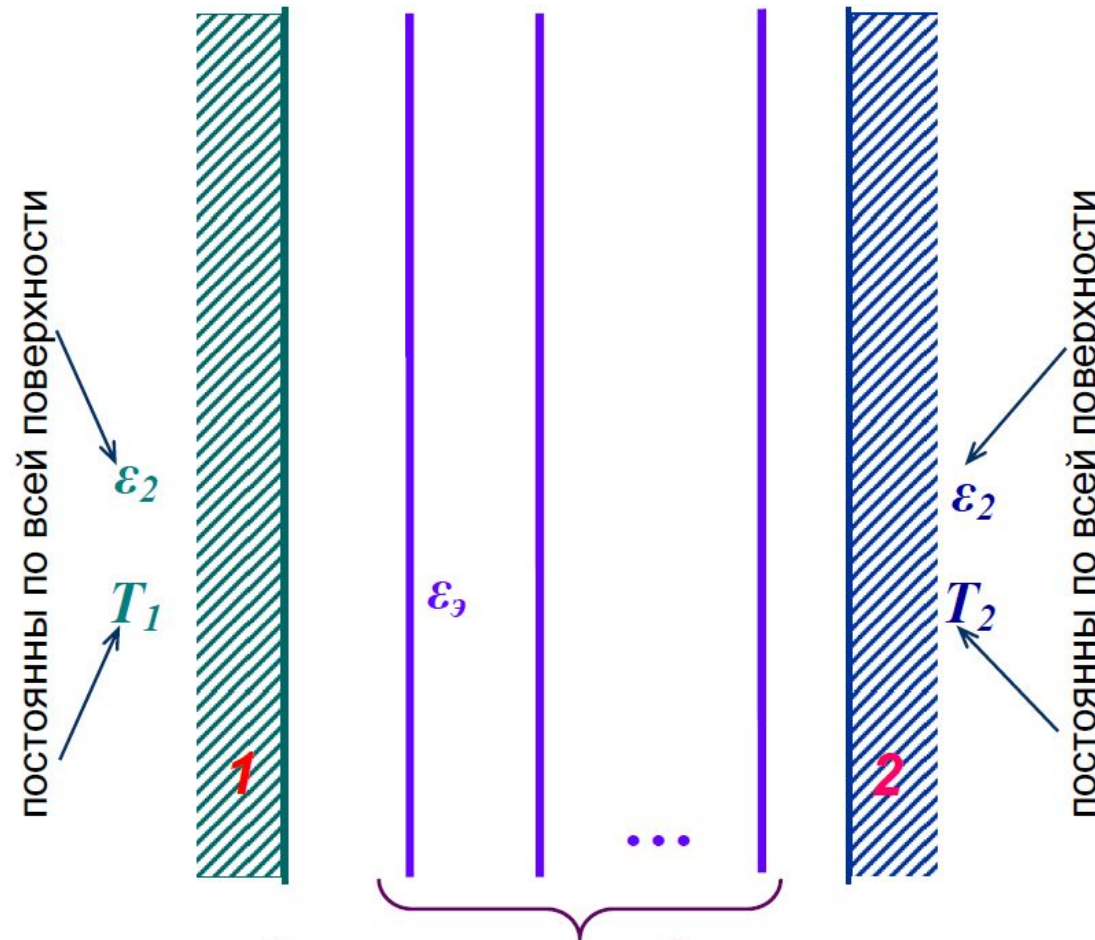
поверхности 1 и 2 – непрозрачные, плоские

Плотность результирующего потока энергии, передаваемой от поверхности плоскости «1» к поверхности плоскости «2» равна

$$h_{1,2}^{\text{рез}} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) ,$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная излучательная способность рассматриваемой системы рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} .$$



В предположении, что термическое сопротивление экрана мало:

$$h_{1,2}^{\text{пэз}} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) ,$$

где

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right)} .$$

Если $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$, то

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пр } l=2=n\text{Э}} &= \frac{1}{\frac{2(1+n)}{\varepsilon} - 1 - n} = \\ &= \frac{1}{\frac{2(1+n)}{\varepsilon} - (1+n)} = \\ &= \frac{1}{(1+n)} \cdot \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1} = \frac{1}{(1+n)} \cdot \varepsilon_{\text{пр } l=2} . \end{aligned}$$

Таким образом, n одинаковых экранов уменьшают результирующий тепловой поток в $(n-1)$ раз.

Один экран уменьшает – в 2 раза.

Угловой коэффициент – ϕ_{ij} – определяет долю диффузно распределённой энергии излучения, которая передаётся с поверхности i на поверхность j .

Для двух поверхностей справедливы соотношения

$$Q_{12} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) S_1 \phi_{12} \quad ;$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[1 + \phi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \phi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right] \quad .$$

Угловые коэффициенты обладают следующими свойствами: 1) $\phi_{ij} > 0$; 2) $\phi_{ij} < 1$; 3) отражают лишь взаимное расположение тел.

Для системы из N тел имеет место свойство замыкания:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{1-1} + \varphi_{1-2} + \boxed{} + \varphi_{1-N} = 1 \quad ; \\ \varphi_{21-1} + \varphi_{2-2} + \boxed{} + \varphi_{2-N} = 1 \quad ; \\ \phantom{\varphi_{N-1} + \varphi_{N-2} + } \boxed{} \phantom{+ \varphi_{N-1-N}} \\ \varphi_{N-1} + \varphi_{N-2} + \boxed{} + \varphi_{N1-N} = 1 \quad . \end{array} \right.$$

То есть для любого тела k

$$\sum_{l=1}^N \varphi_{k-l} = 1 \quad .$$

оболочка «2»

 $S_2 \quad T_2$

тело «1»

 $S_1 \quad T_1$

Общее количество энергии

$$Q_{12} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) S_1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{S_1}{S_2}} .$$

Если $S_1 \ll S_2$ или $\varepsilon_2 = 1$, то

$$Q_{12} = \sigma_0 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) S_1 .$$

Если $S_1 \approx S_2$, то

$$Q_{12} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) S_1 .$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{— как для плоских параллельных поверхностей.}$$

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

$$\alpha_i = \sum_j \frac{q_{ij}}{\Delta T_{ij}}$$

$$i=1 \quad j=2 \quad N=2$$

$$\alpha = \frac{\sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12}}{T_1 - T_2} \equiv \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} \frac{T_1^4 - T_2^4}{\Delta T_{12}}$$

$$\alpha = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

$$T_1 \approx T_2$$

$$\overline{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$\alpha \approx \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} \left[(\overline{T})^2 + (\overline{T})^2 \right] \cdot 2 \overline{T}$$

$$\alpha \approx 4 \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} (\overline{T})^3$$

[2] Блох, А.Г. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

[3] Рубцов, Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах / Н.А. Рубцов. – Новосибирск: СО Наука, 1984.

СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

ВИДЫ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА И МЕТОДЫ РАСЧЁТА

На практике два или более механизмов теплообмена часто действуют одновременно – теплопроводность и излучение, конвекция и излучение, или даже все три вместе. Обычный технический приём расчётов сложного теплообмена заключается в суммировании тепловых потоков каждого механизма теплообмена.

[4] Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен: пер. с англ. / М.Н. Оцисик. – М.: Мир, 1976.

Вопросы, выносимые на зачёт

1. Тепловое излучение. Поток излучения: классификация.
2. Спектральный поток теплового излучения.
Спектральная поглощательная способность.
3. Равновесное излучение. Его основные свойства.
Диффузная поверхность. Серое тело.
4. Абсолютно чёрное тело. Закон Кирхгофа.
5. Закон Стефана-Больцмана (формулировка).
Коэффициент теплообмена излучением.
6. Закон Ламберта. Типы отражательных поверхностей.
7. Радиационные характеристики реальных тел.

*ДЗЯКУЙ
ЗА ЎВАГУ*

*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ*

*THANK FOR
YOUR ATTENTION*