

***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

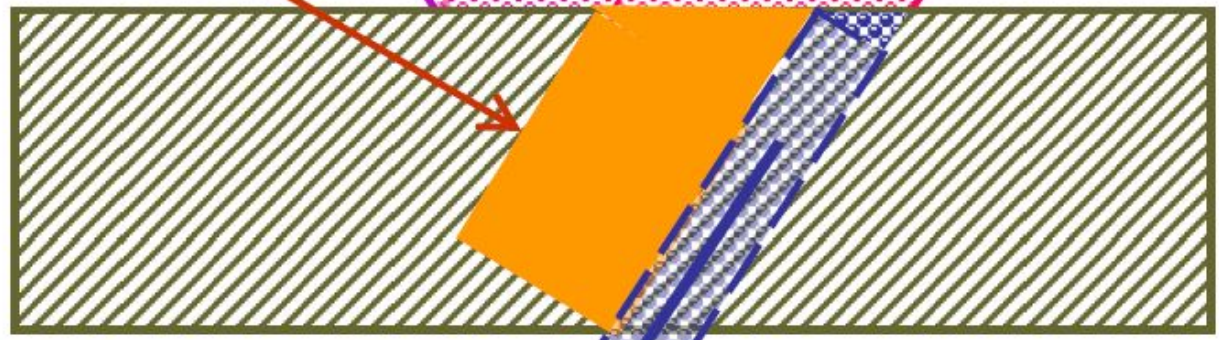
$Q$

Поглащённое излучение

$Q_A$

Прошедшее 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/м<sup>2</sup>]** – поток интегрального излучения с поверхности единичной площади:

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

**Спектральная излучательная способность (Спектральная плотность потока излучения),  $J_\lambda$  [Вт/м<sup>3</sup>]** – излучательная способность в бесконечно малом диапазоне длин волн, отнесённая к этому диапазону:

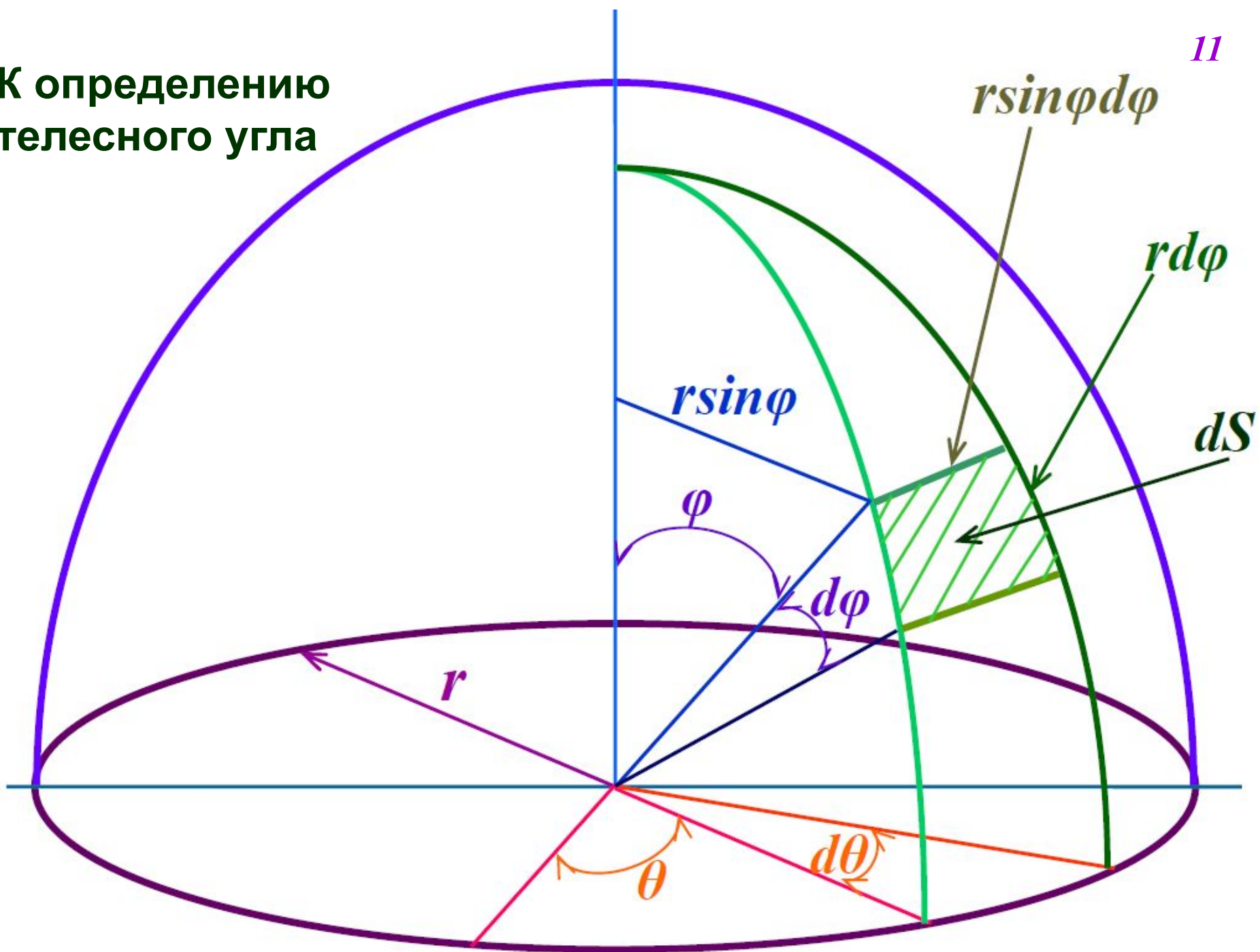
$$J_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} .$$

**Яркость (Интенсивность) излучения,  $I$  [Вт/(м<sup>2</sup>·ср)]** – количество энергии, излучаемой в единицу времени в направлении угла  $\varphi$  элементарной площадкой поверхности  $dS$ , отнесённое к единице телесного угла и единице площади проекции этой площадки на плоскость перпендикулярную направлению излучения:

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

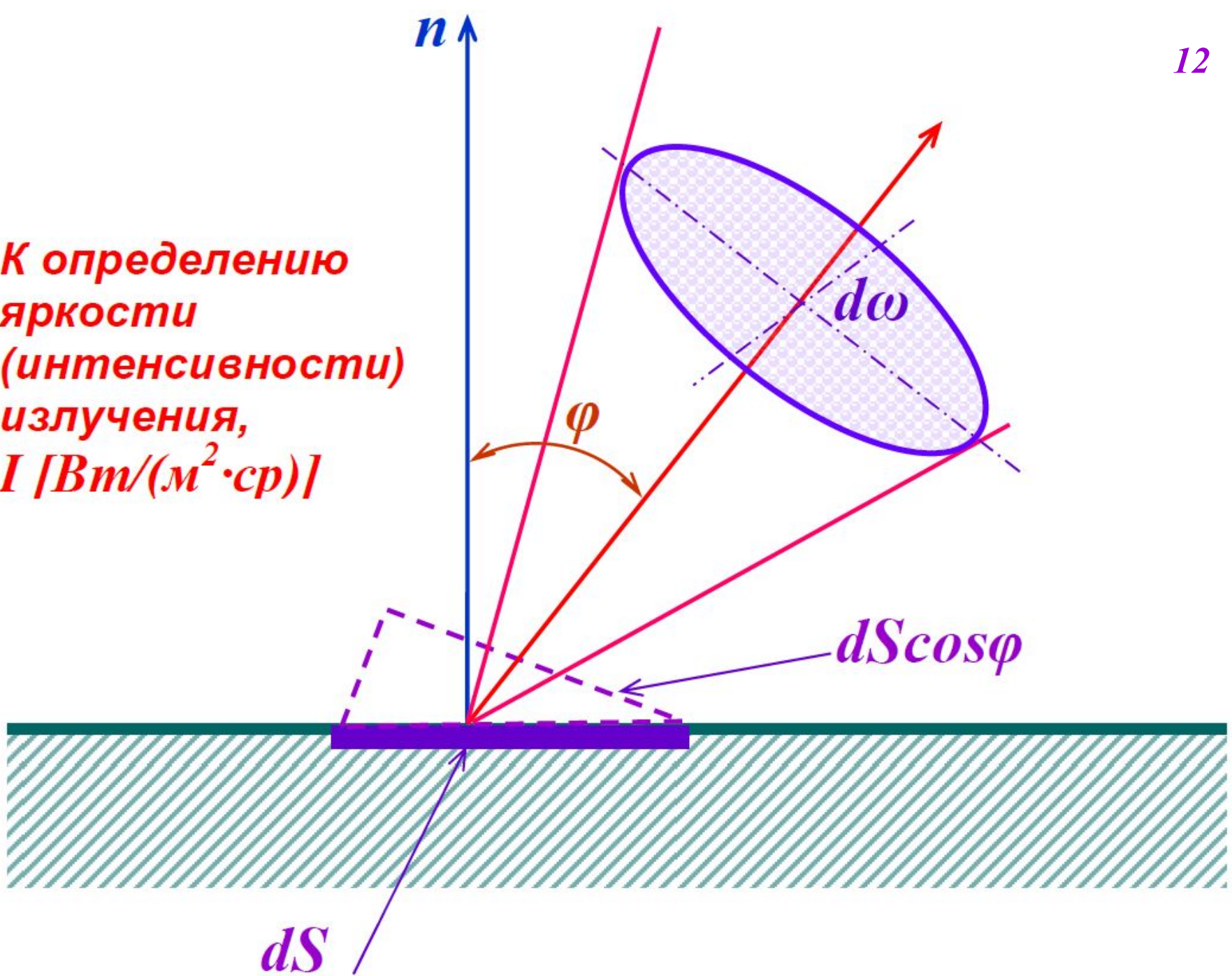
**Спектральная яркость излучения [Вт/(м<sup>3</sup>·ср)]:**  $I_\lambda \equiv \frac{dI}{d\lambda} .$

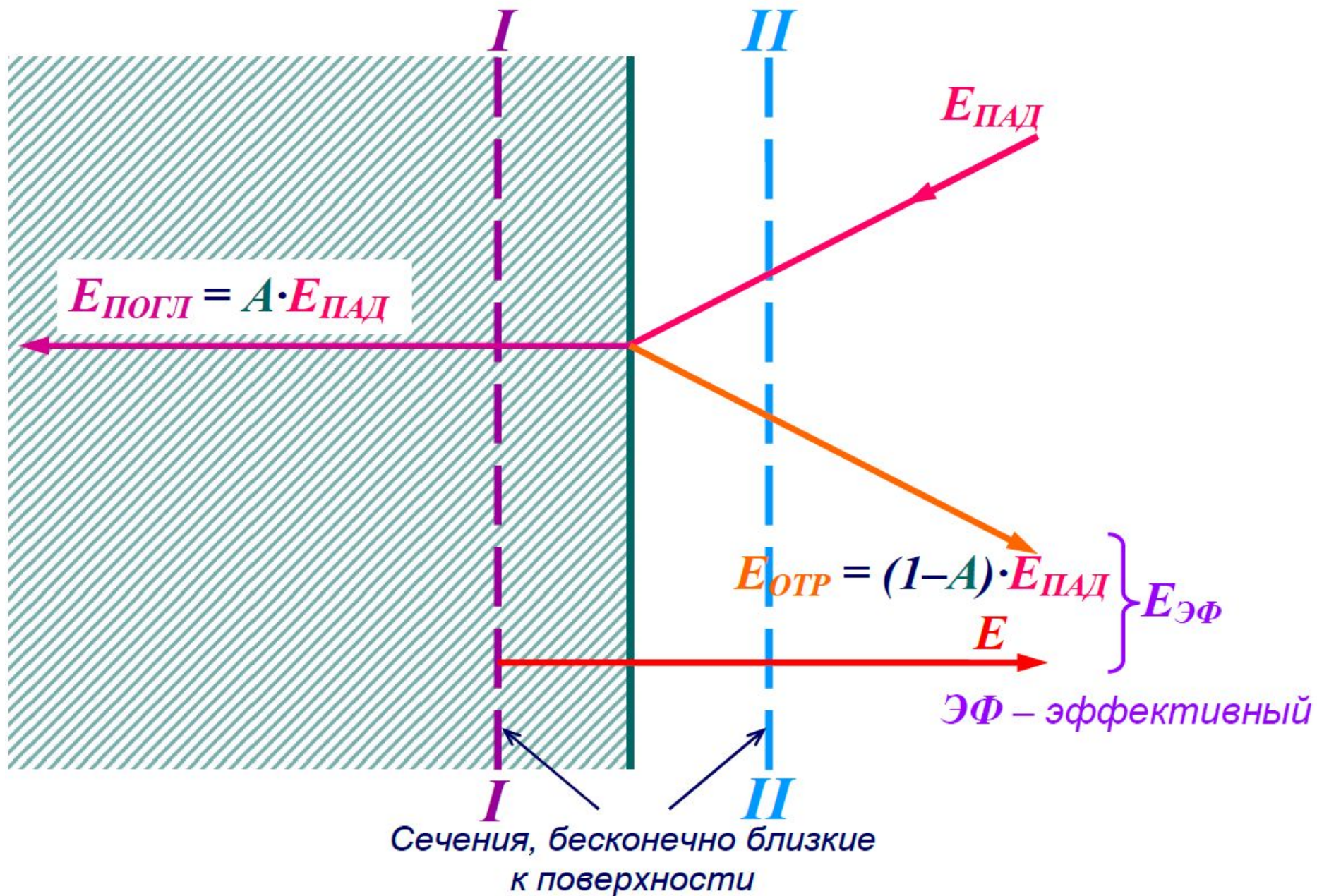
К определению  
телесного угла





К определению  
яркости  
(интенсивности)  
излучения,  
 $I$  [Вт/(м<sup>2</sup>·ср)]

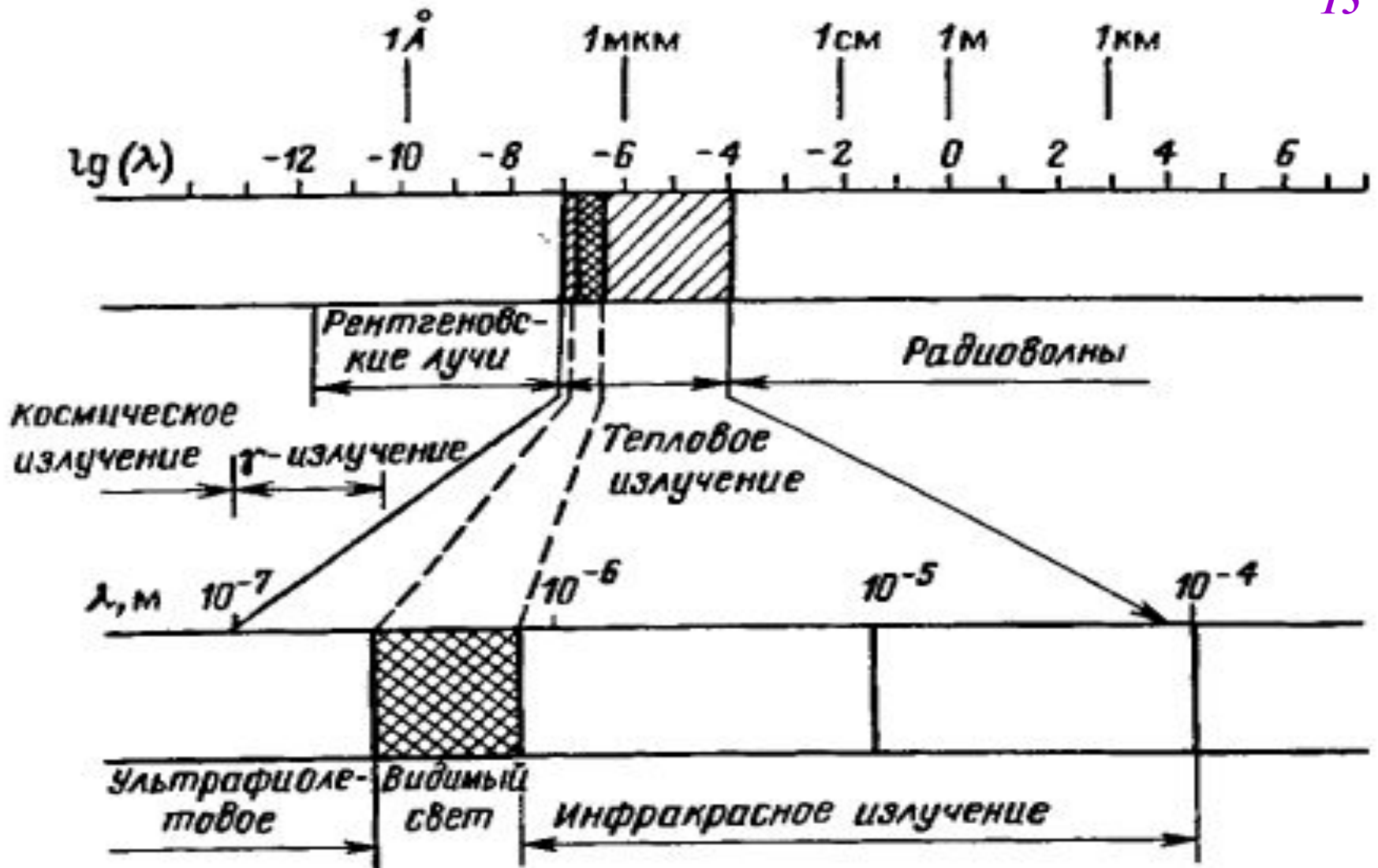




**Тепловое излучение** – электромагнитное излучение, энергия которого получена за счёт возбуждения теплового движения возбуждения тепловым движением атомов, молекул и других частиц вещества.

**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:**

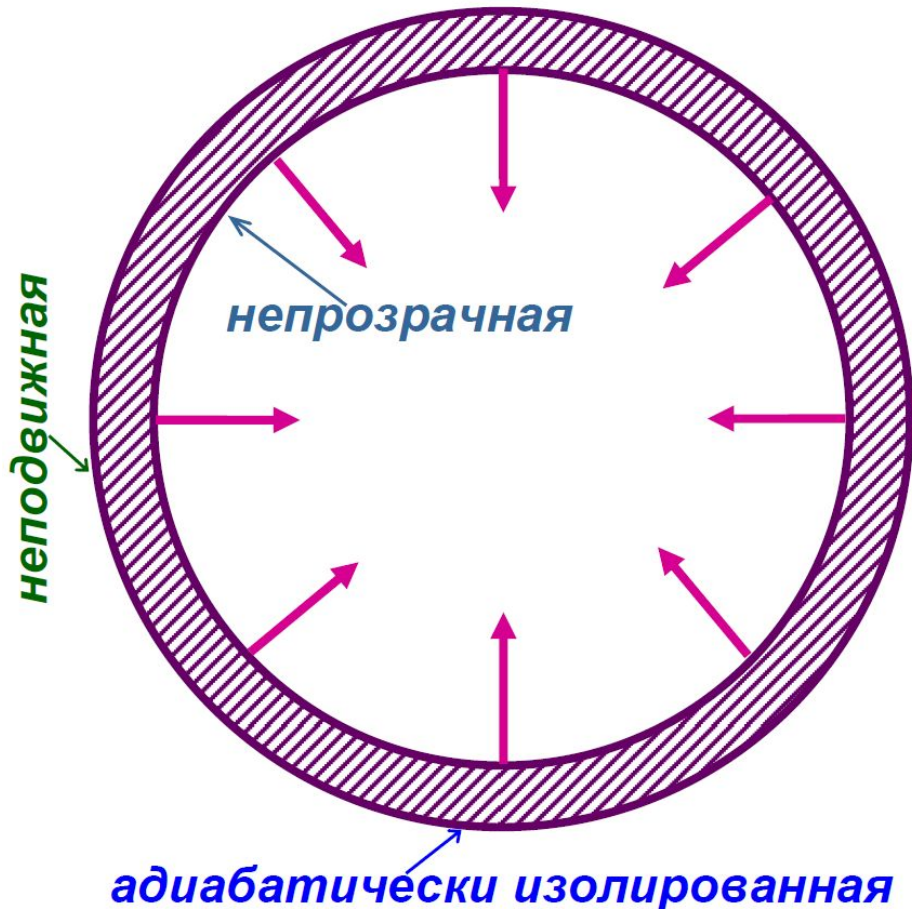
- случаи, когда процессы взаимодействия излучения и вещества вызывают какие-либо изменения в телах (ионизация, изменение свойств, химические реакции и др.);
- неравновесные процессы излучения (люми-несценция, хемилюминесценция; рекомбинационное, ударное и когерентное испускание);
- различные формы взаимодействия 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/м<sup>2</sup>] – 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/м<sup>3</sup>], – **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.**

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

**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»:

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



Удостоверимся в справедливости 1-го следствия:

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

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

$$h_0^{\text{ИЗЛ}} = \sigma_0 T^4$$

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/(м<sup>3</sup>·ср)]**

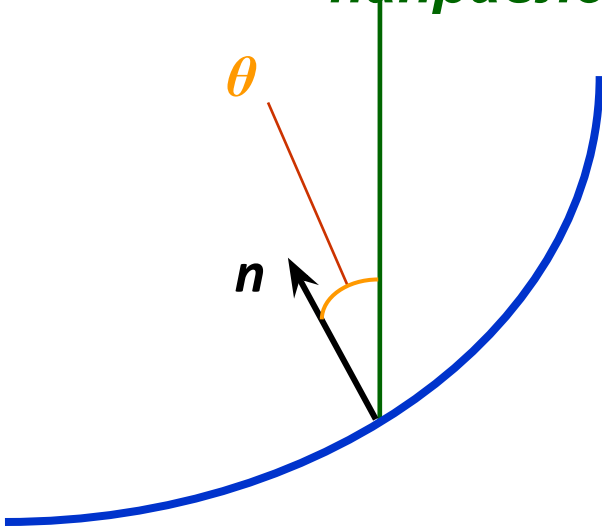
– мощность излучения в единице объёма в единичном телесном угле:

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

## **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:*

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

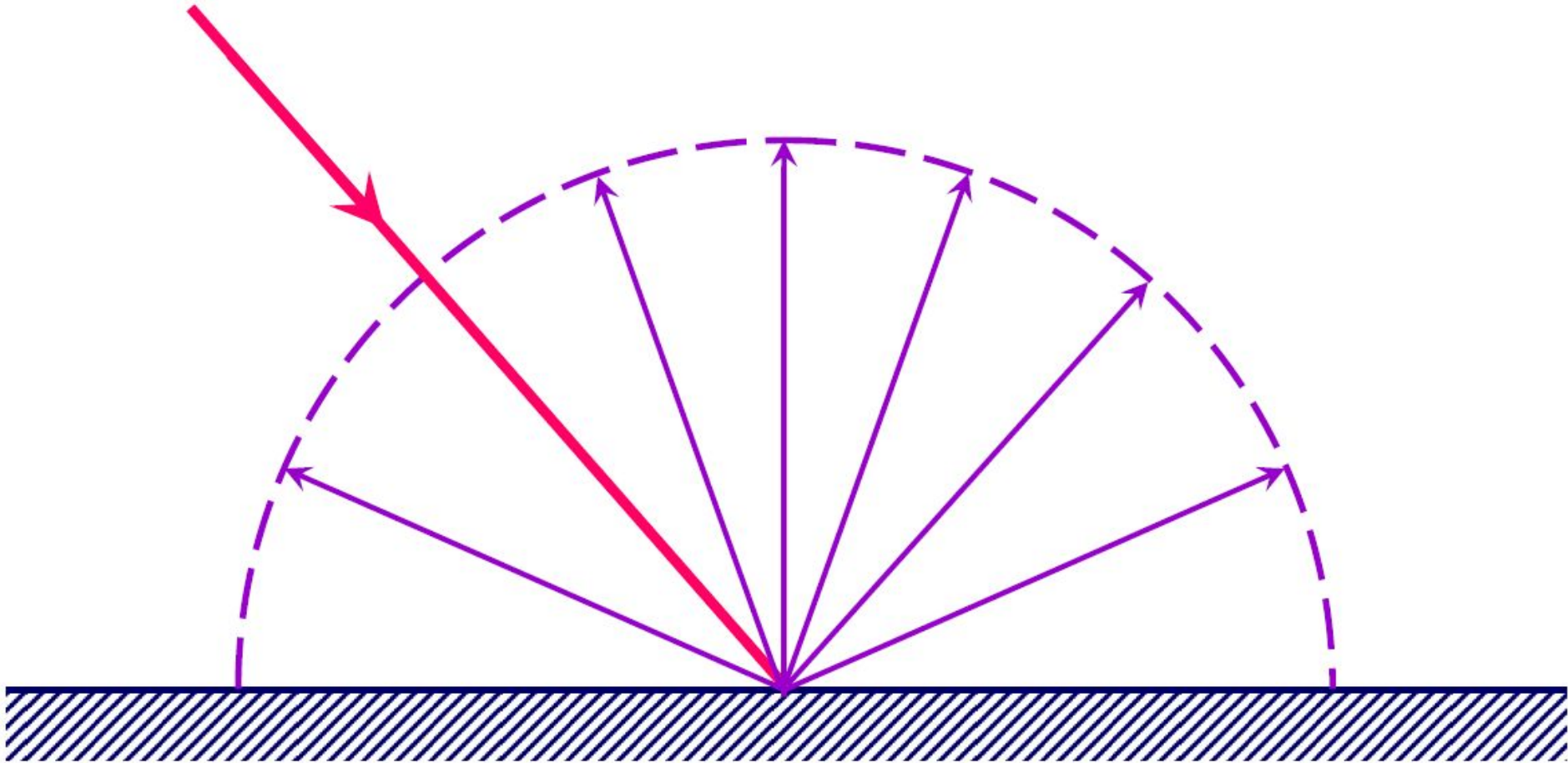
$I_{\theta}$  – интенсивность в направлении  $\theta$  ;

$I_N$  – интенсивность в направлении нормали;

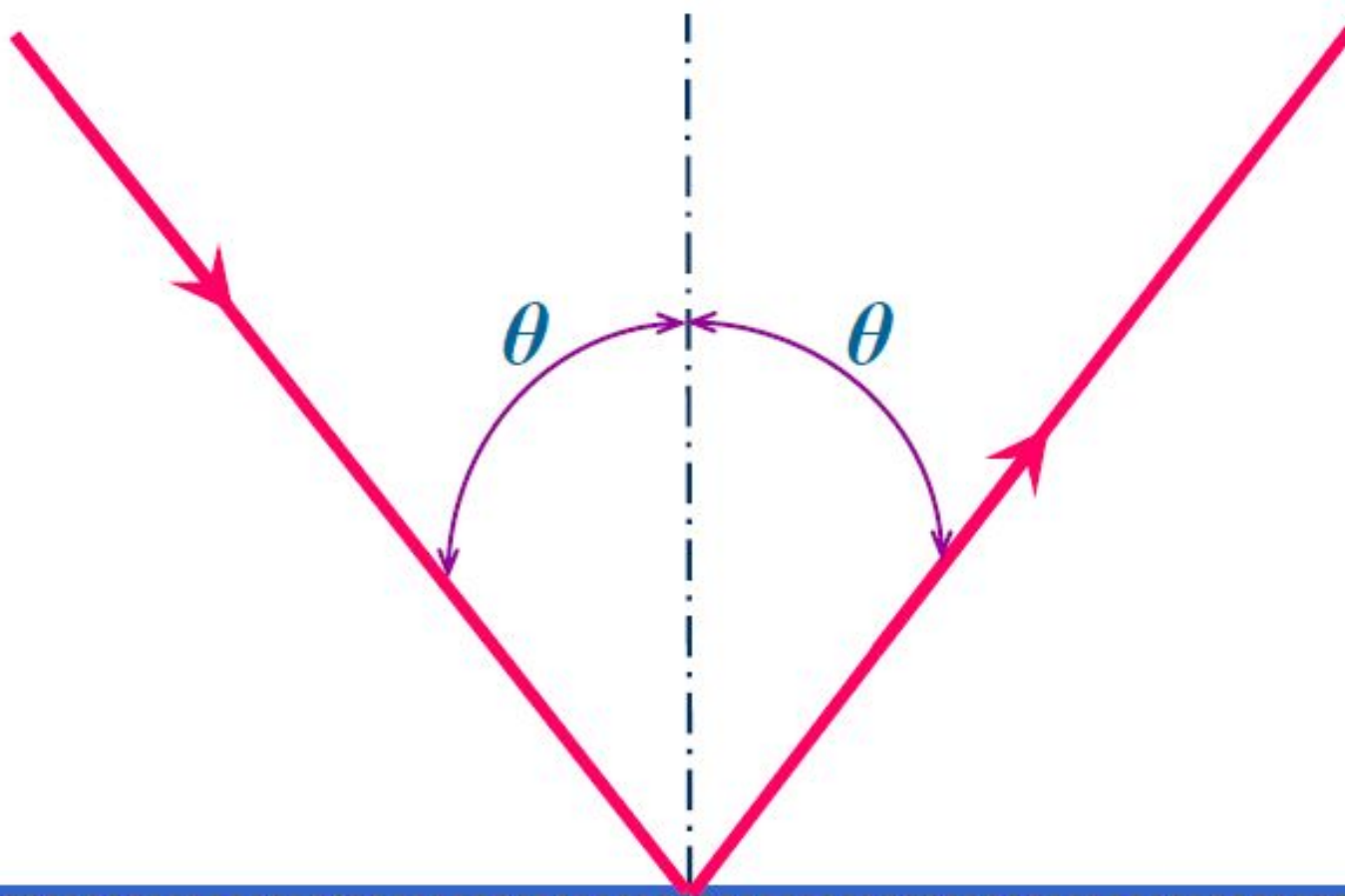
$B$  – энергетическая яркость.

*Диффузное излучение – излучение, подчиняющееся закону Ламберта.*

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

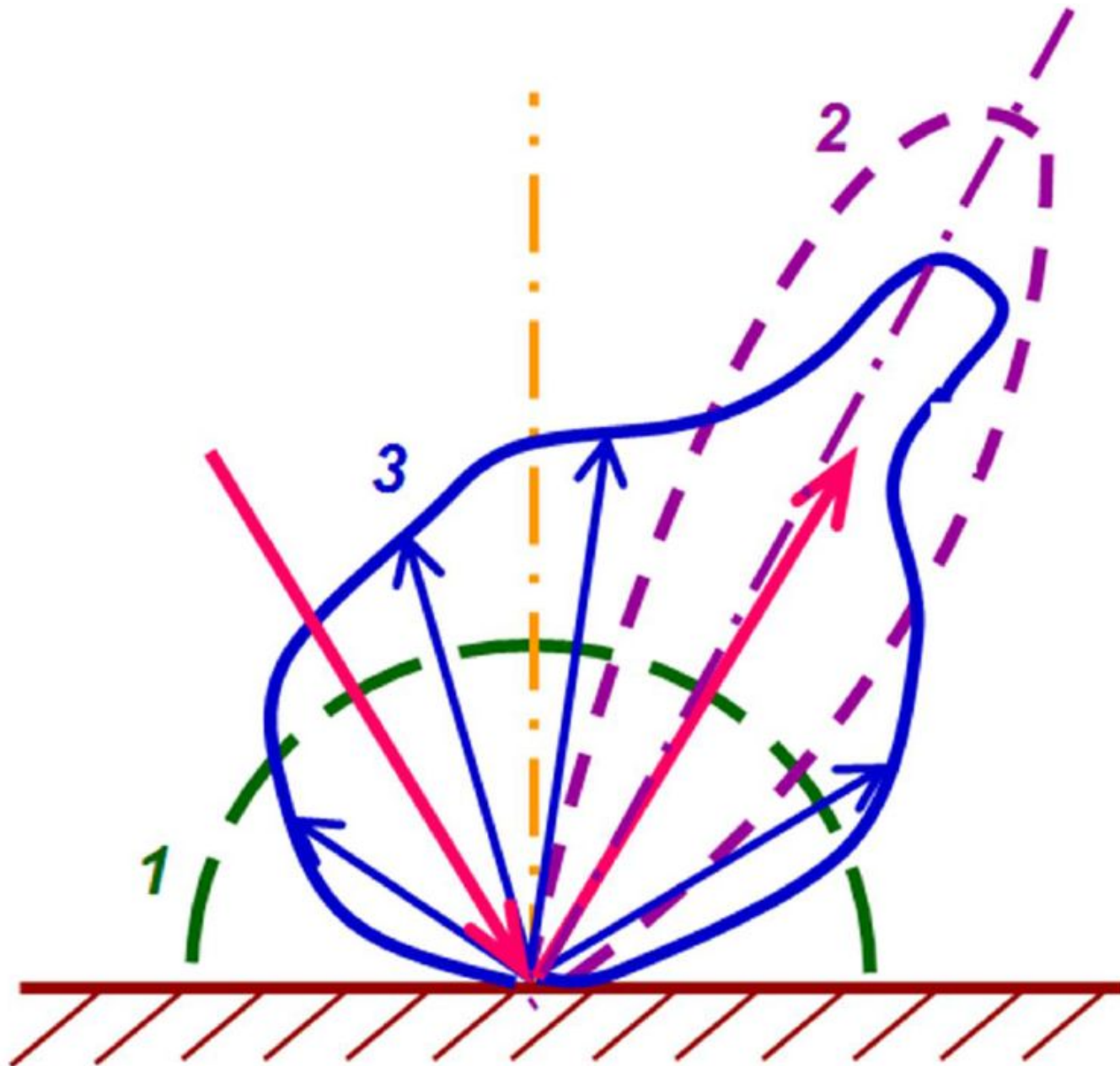


Типы отражательных поверхностей: **ДИФФУЗНАЯ**



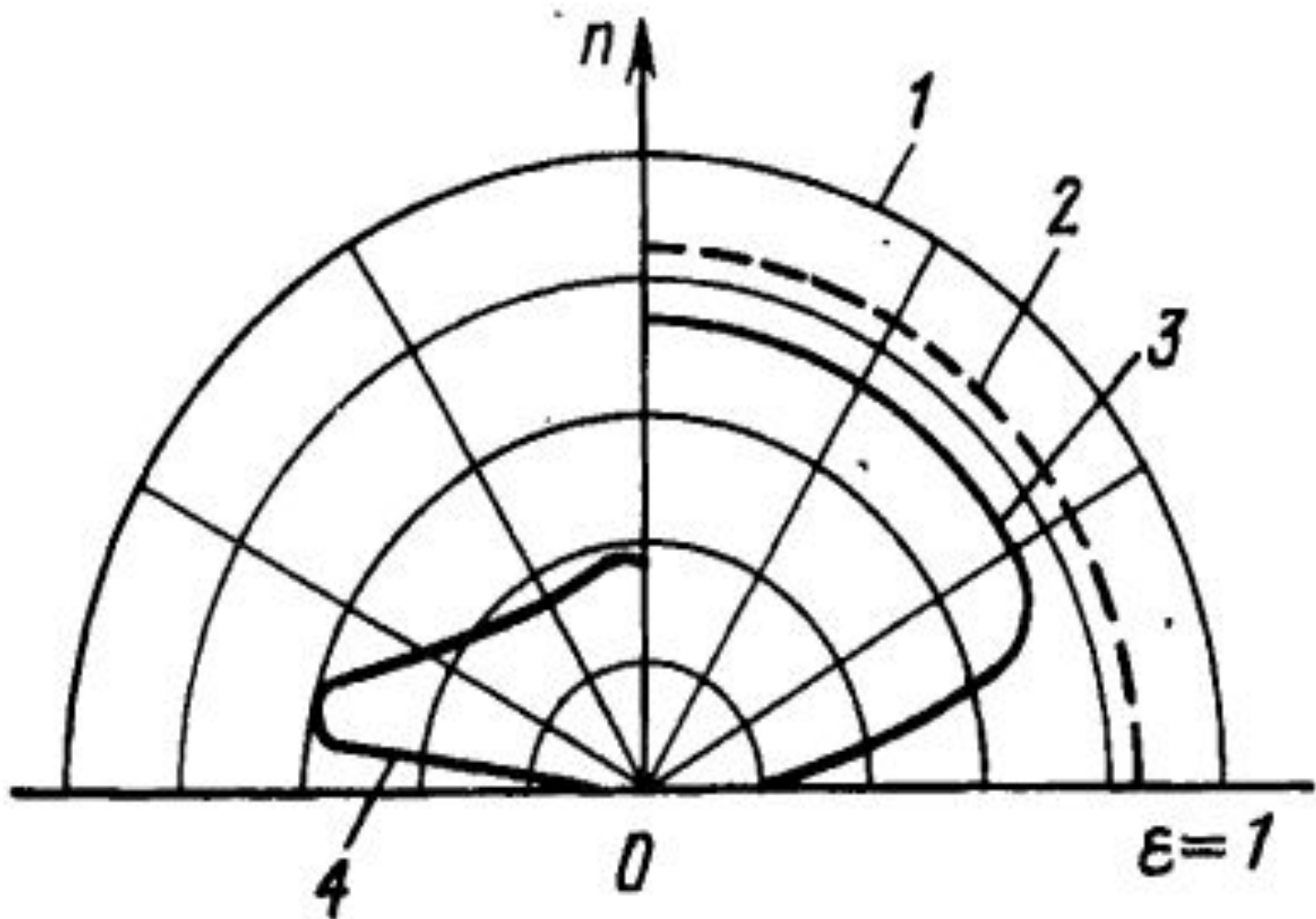
Типы отражательных поверхностей: **ЗЕРКАЛЬНАЯ**





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 –  $\varepsilon$  –**

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).

$$A + R + D = 1$$

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

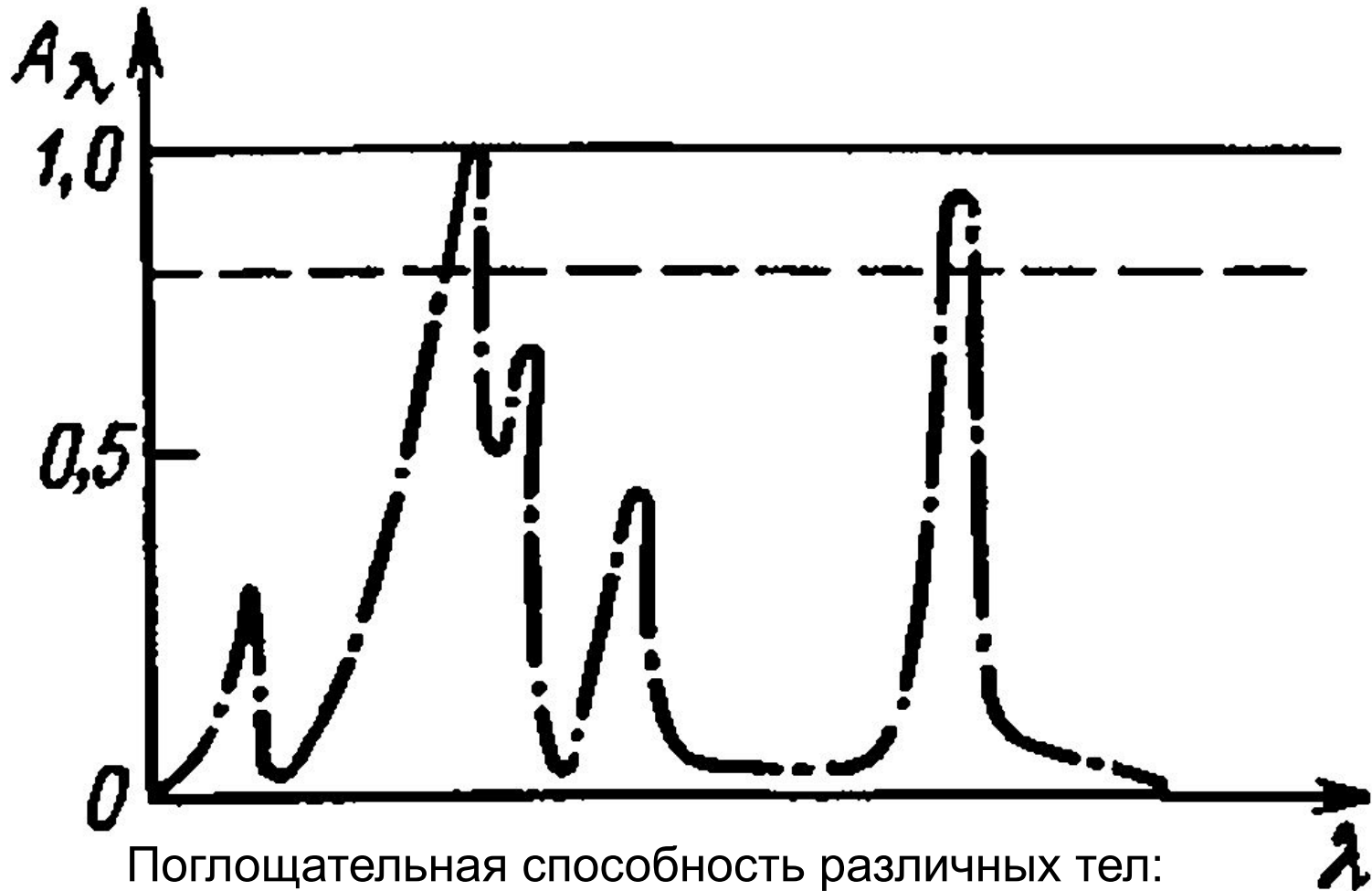
$$A_\nu + R_\nu + D_\nu = 1$$

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

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

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

сухой воздух  $D \approx 1$



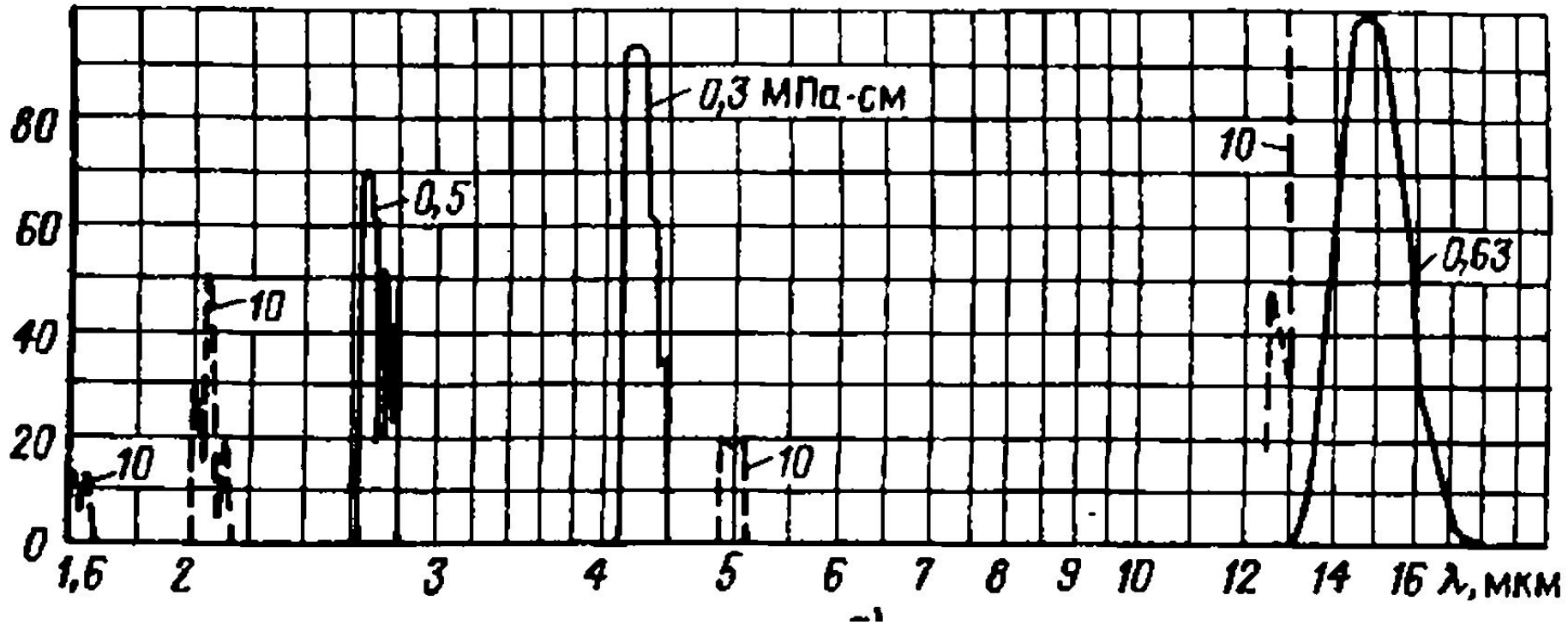
Поглощательная способность различных тел:

————— — абсолютно чёрное тело;

— — — — — серое тело;

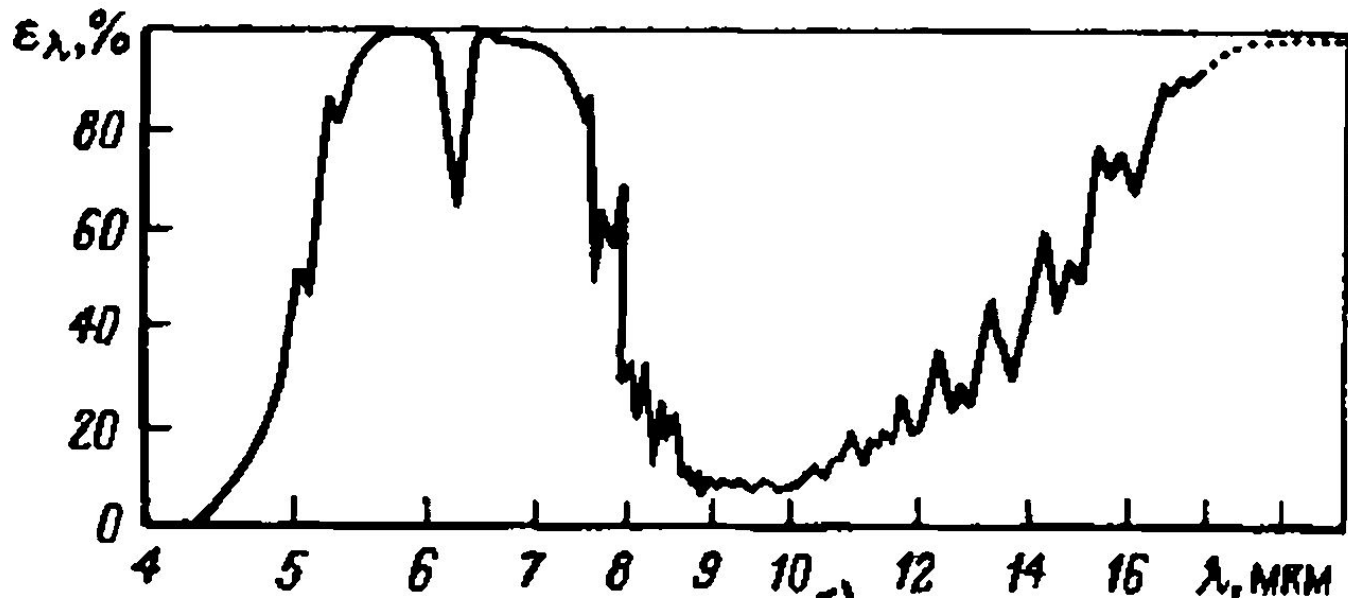
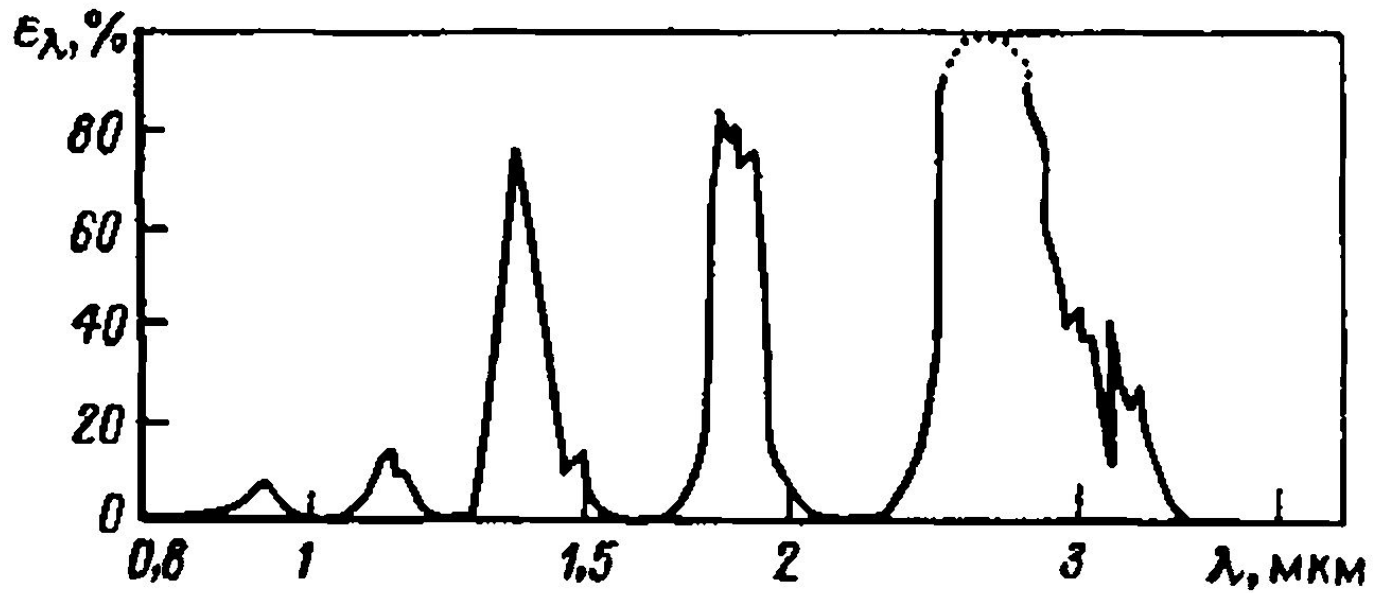
—• —• —• — селективно поглощающее тело

[1] Кириллов, П.Л. <sup>[1]</sup>Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. — М.: ИздАт, 2008. — 256 с.

$A_{\lambda}, \%$ 

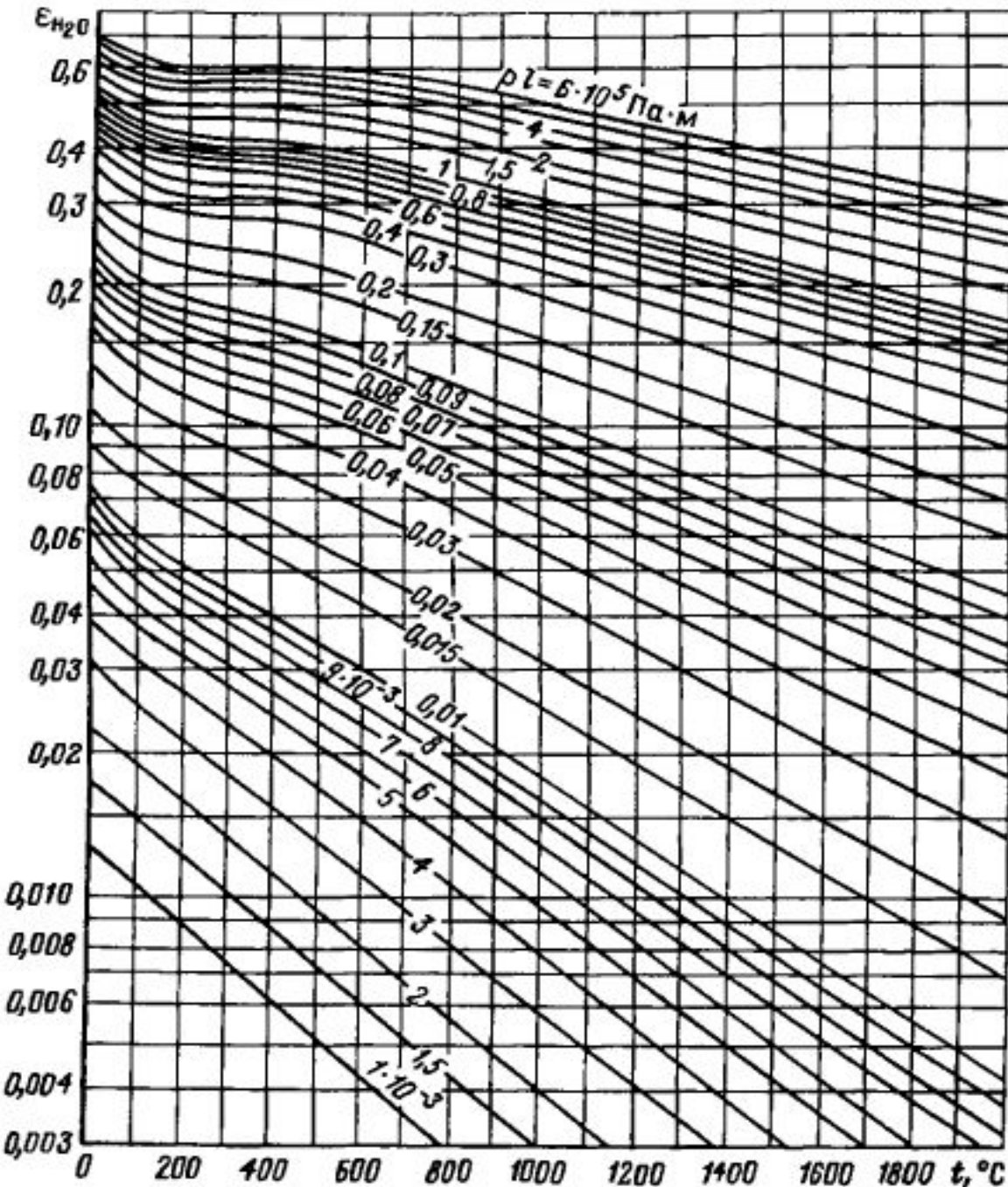
Спектр поглощения углекислого газа

[1]



Спектр поглощения водяного пара

[1]



Зависимость

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

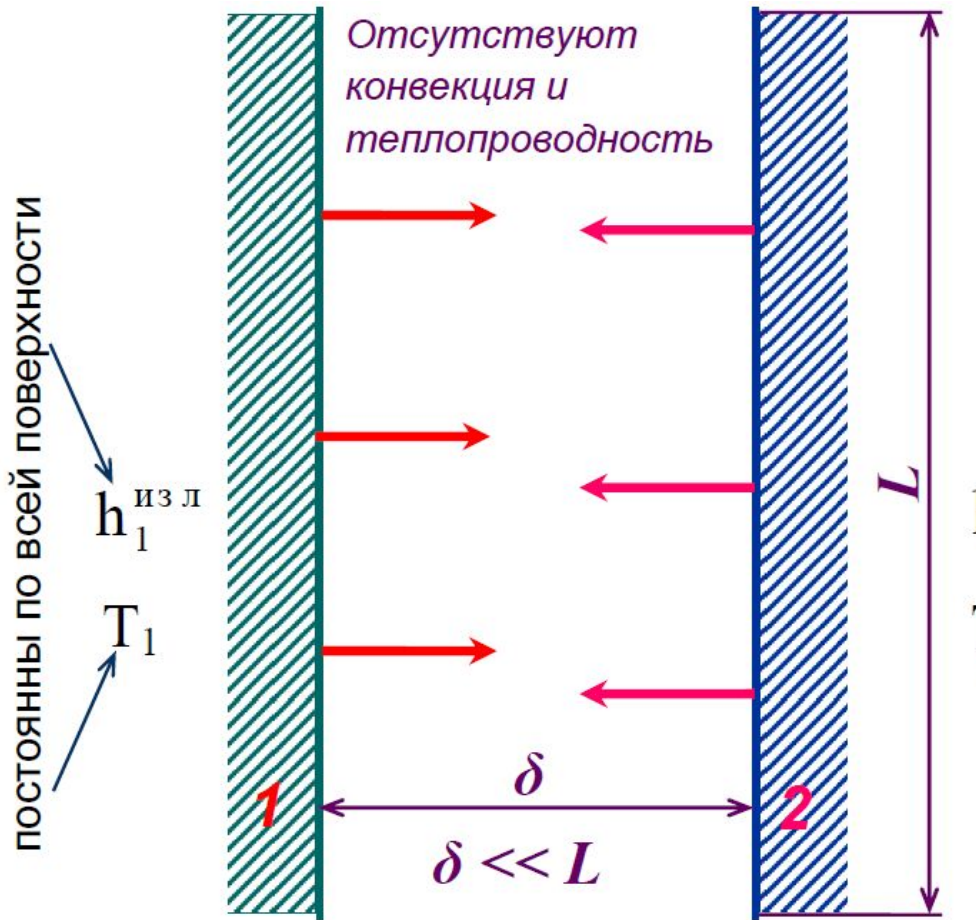
для водяного пара:

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

$p$  – давление газа (водяного пара),  $\text{Па}$ ;

$l$  – толщина слоя газа (водяного пара),  $\text{м}$ ; [1].





поверхности **1** и **2** – непрозрачные, плоские

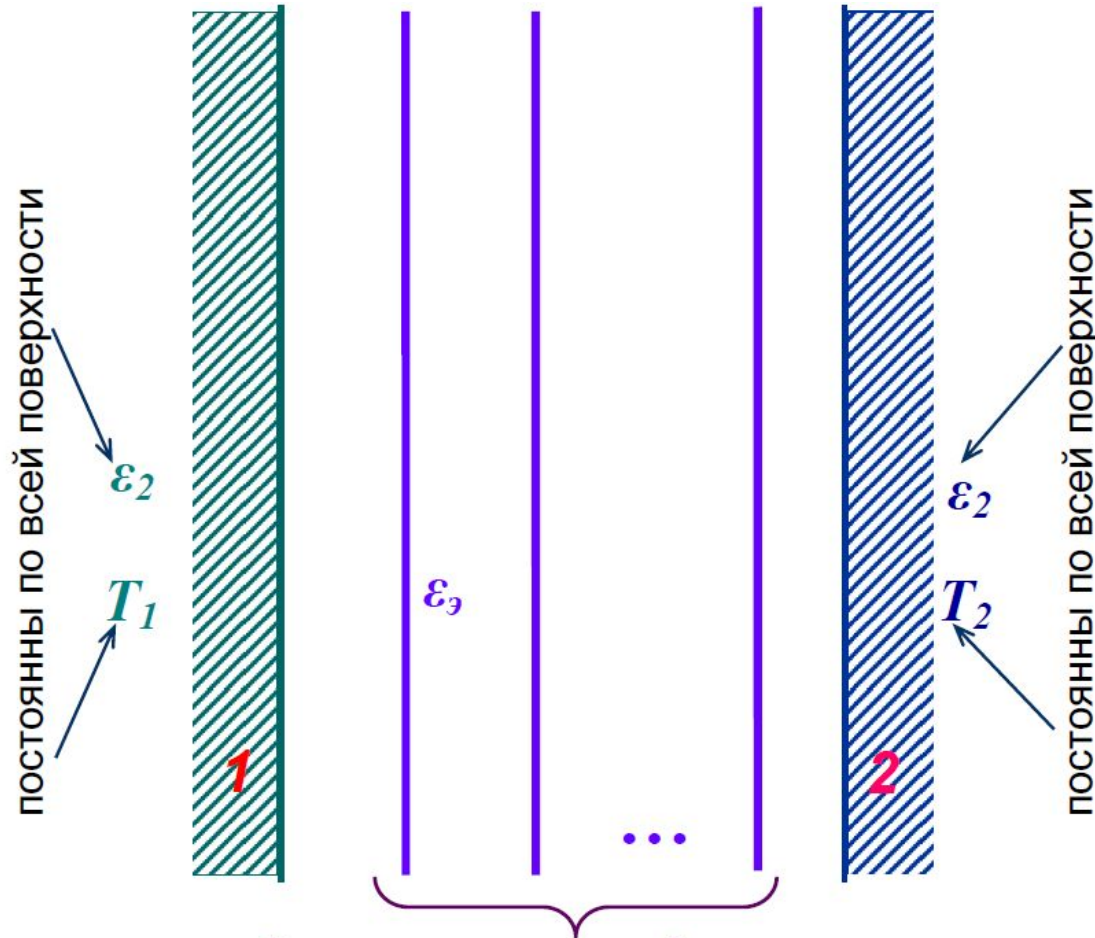
Плотность результирующего потока энергии, передаваемой от поверхности плоскости «1» к поверхности плоскости «2» равна

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

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:

$$h_{1,2}^{p\epsilon_3} = \sigma_0 \epsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) ,$$

где

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 + n \cdot \left( \frac{2}{\epsilon_3} - 1 \right)} .$$

Если  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ , то

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

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

Один экран уменьшает – в 2 раза.

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

Для двух поверхностей справедливы соотношения

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

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

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:

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

То есть для любого тела  $k$

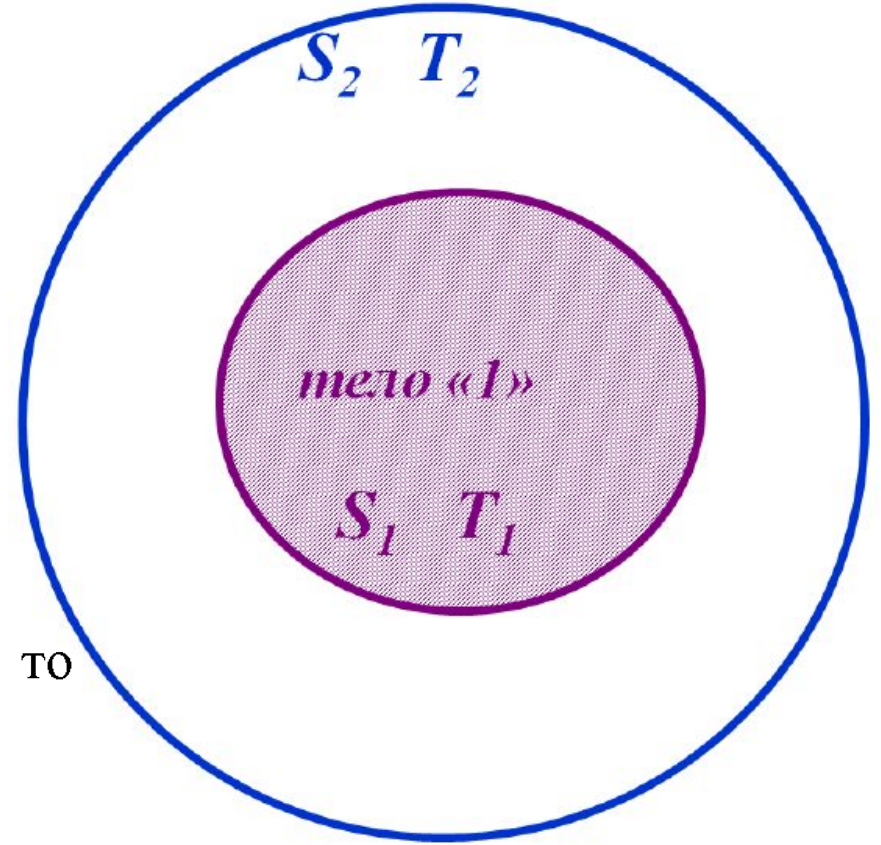
$$\sum_{l=1}^N \varphi_{k-l} = 1 \quad .$$

оболочка «2»

$S_2$   $T_2$

тело «1»

$S_1$   $T_1$



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

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

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

# КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

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

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

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

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

$$T_1 \approx T_2$$

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

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

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

[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 поглотительная 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*