

# Глава 5

## Тепловое излучение

### 5-1. Законы теплового излучения

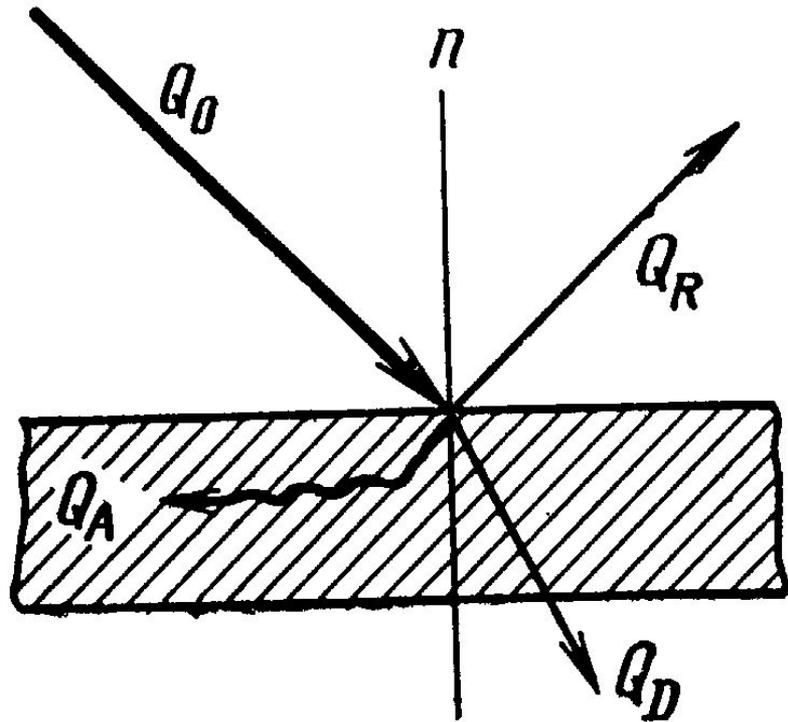
Суммарное излучение, проходящее через произвольную поверхность  $F$  в единицу времени, называется *потоком излучения*  $Q$  и измеряется в Вт.

Лучистый поток, испускаемый с единицы поверхности по всем направлениям полусферического пространства, называется *плотностью потока излучения*  $E$  и измеряется в Вт/м<sup>2</sup>.

$$E = \frac{dQ}{dF}$$

Поток излучения и плотность потока излучения содержат лучи различных длин волн, поэтому эти характеристики излучения также называют *интегральными*.

Излучение, соответствующее узкому интервалу изменения длины волны от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , называется *монохроматическим*.



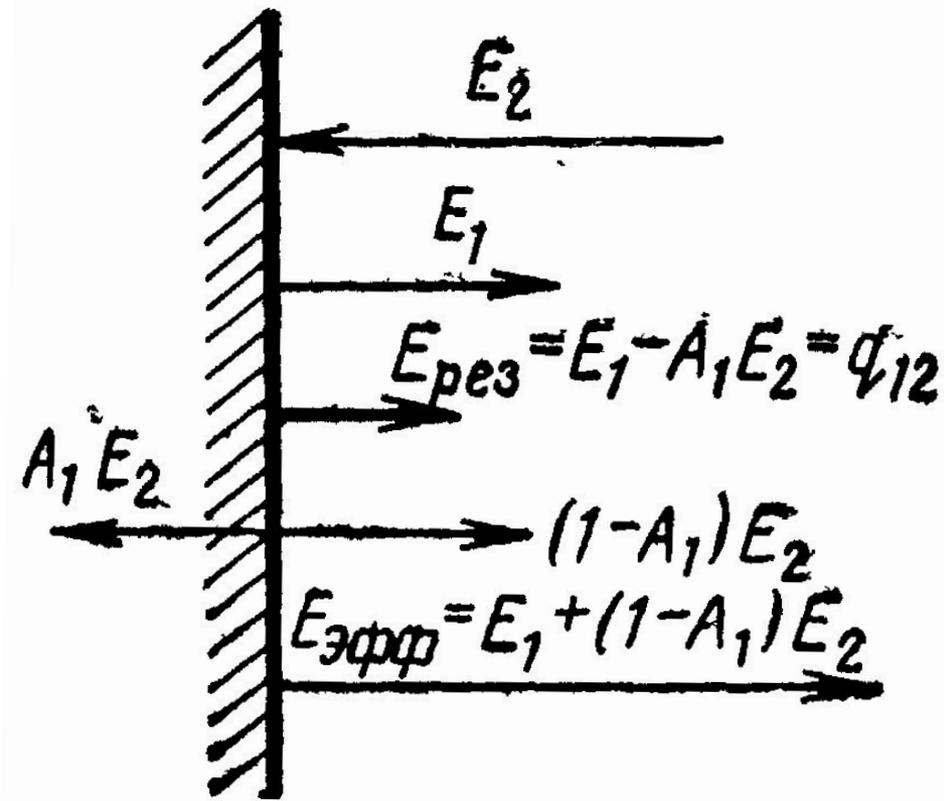
$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0$$

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = 1$$

$$A + R + D = 1$$

- *чёрное тело*
- *зеркальное или белое тело*
- *прозрачное или диатермичное тело*

$$A + R = 1$$



$E_1$  – собственное излучение тела

$E_2$  – падающее излучение

$A_1 E_2$  – поглощённое излучение

$(1 - A_1) E_2$  – отражённое излучение

$E_{эфф} = E_1 + (1 - A_1) E_2$  – эффективное излучение

$E_{рез} = E_1 - A_1 E_2$  – результирующее излучение

## Закон Планка

Величина  $E_\lambda$  представляет собой отношение плотности потока излучения, испускаемого в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , к рассматриваемому интервалу длин волн и называется *спектральной плотностью потока излучения*.

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

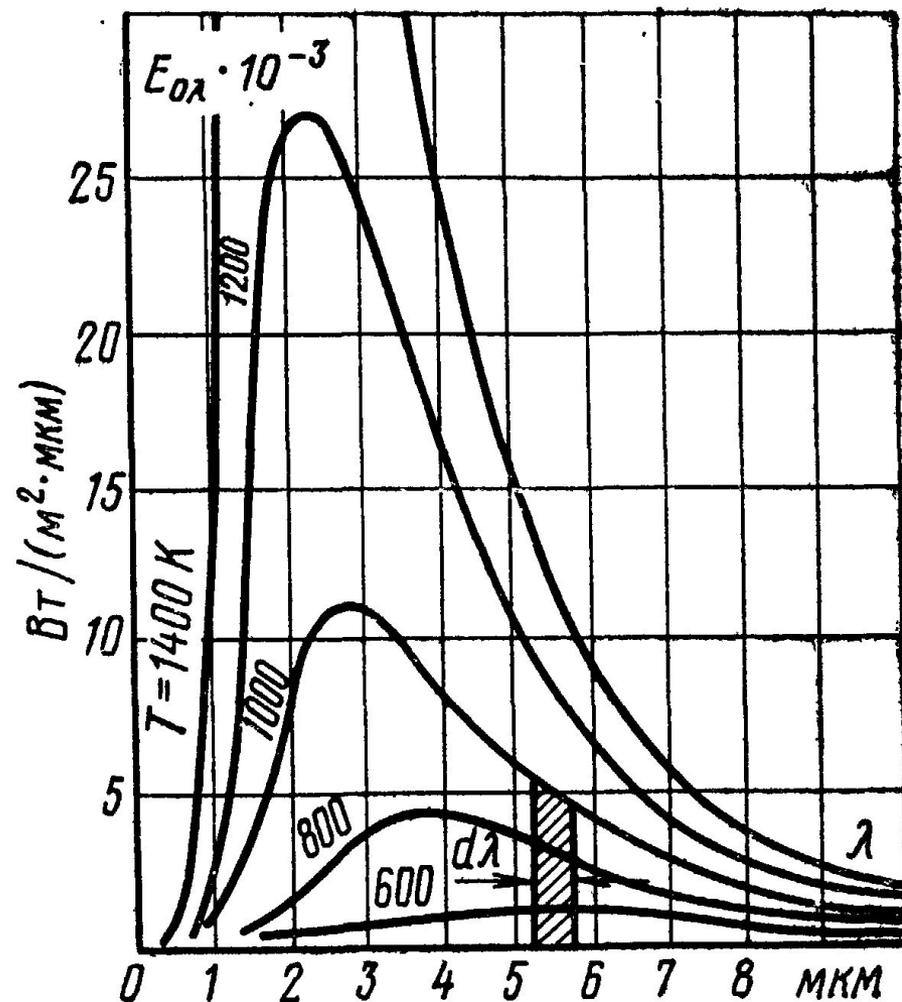
$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

## Закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,9 \cdot 10^{-3}$$

$$E_{0\nu} = \frac{2\pi h \nu^3 / c^2}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



## Закон Стефана-Больцмана

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

$c_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^2 \cdot \text{К}^2$  — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

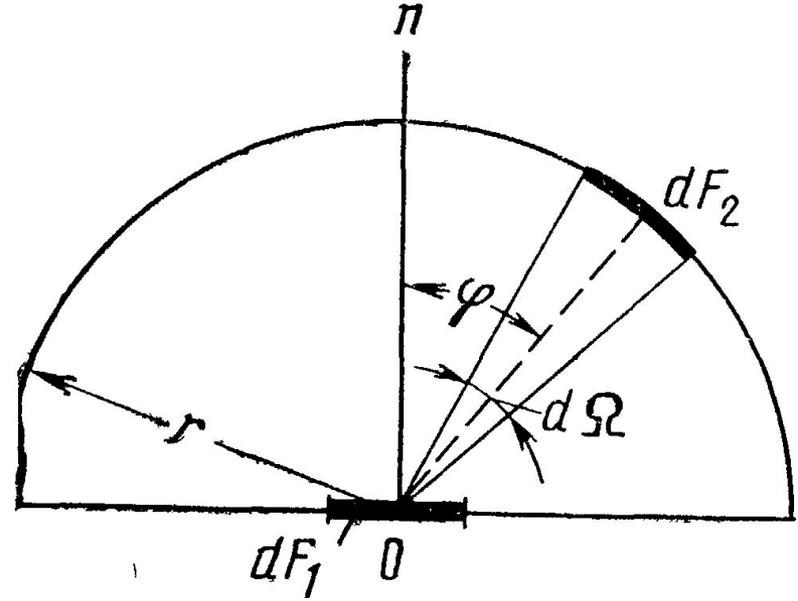
## Закон Кирхгофа

При термодинамическом равновесии отношение собственного излучения к поглощательной способности для всех тел одинаково и равно собственному излучению абсолютно чёрного тела при той же температуре.

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0 = f(T)$$

## Закон Ламберта

Количество энергии, излучаемой элементом поверхности  $dF_1$  в направлении элемента  $dF_2$ , пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали  $E_n dF_1$ , умноженному на величину элементарного телесного угла  $d\Omega$  и  $\cos\varphi$ .



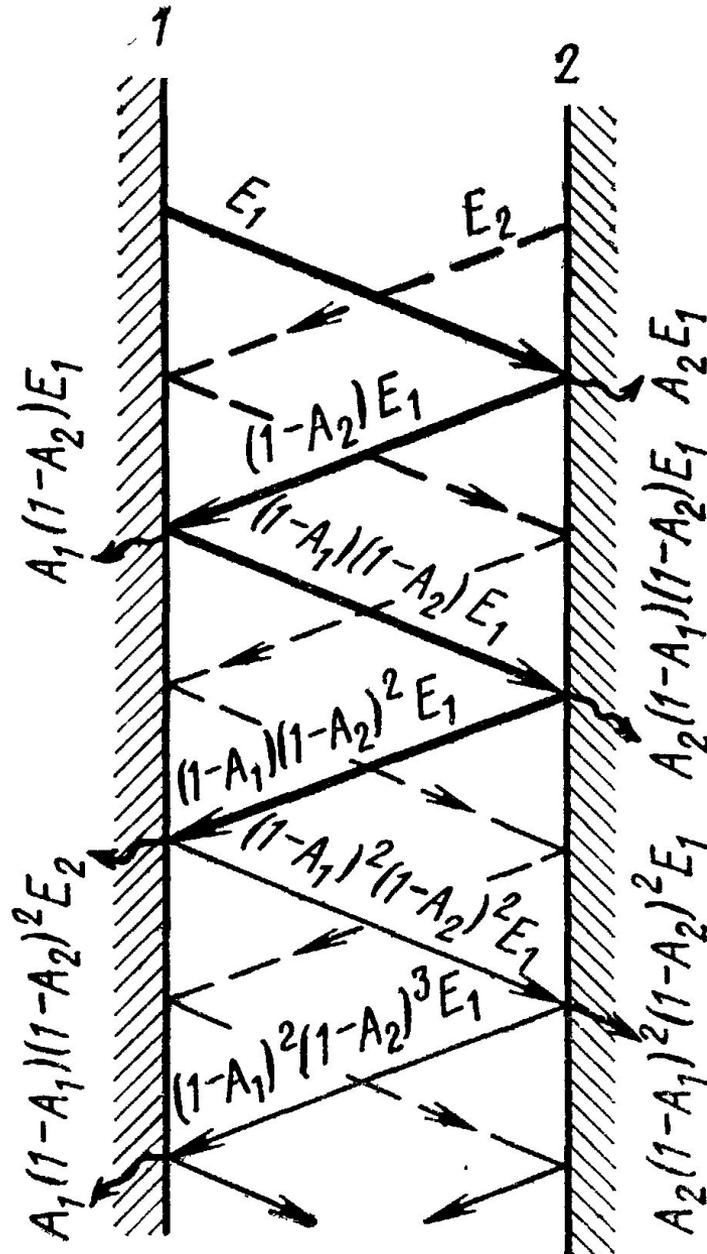
$$d^2Q_\varphi = E_n d\Omega \cos\varphi dF_1$$

$$E_n = \frac{E}{\pi} = \frac{1}{\pi} c \left( \frac{T}{100} \right)^4 = \frac{\varepsilon}{\pi} c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$d^2Q_\varphi = \frac{\varepsilon}{\pi} c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dF_1 \cos\varphi$$

## 5-2. Лучистый теплообмен между телами

Схема лучистого теплообмена между плоскими параллельными поверхностями



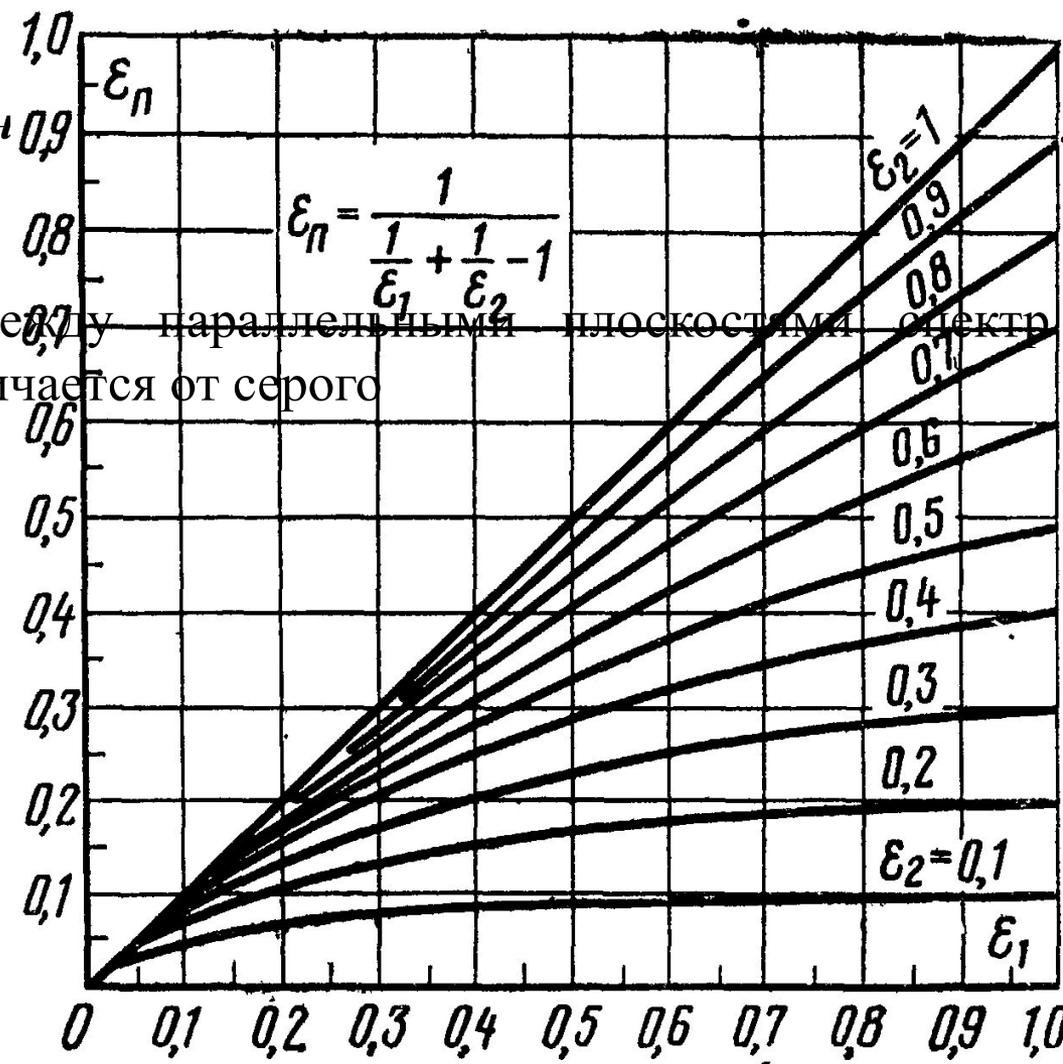
Расчётная формула для лучистого теплообмена между параллельными серыми плоскостями

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

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad \text{— приведённый}$$

Расчёт лучистого теплообмена между параллельными плоскостями спектр излучения которых значительно отличается от серого

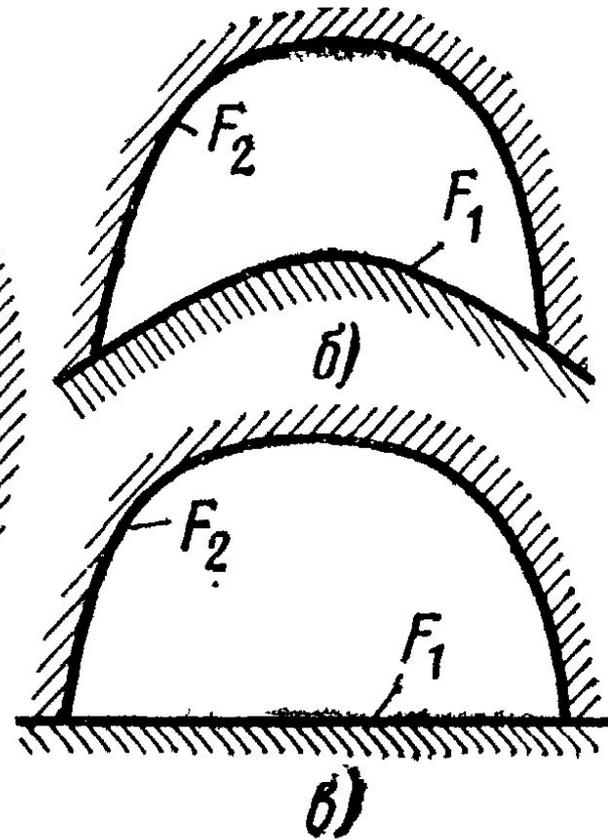
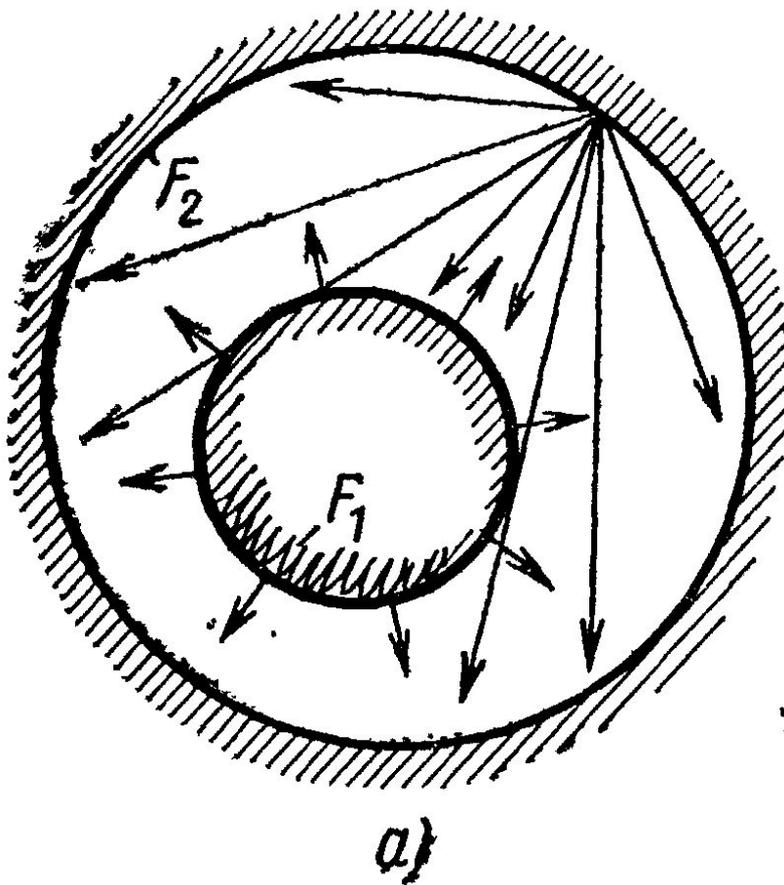
$$q = \int_0^{\infty} \frac{E_{\lambda,1} A_{\lambda,2} - E_{\lambda,2} A_{\lambda,1}}{A_{\lambda,1} + A_{\lambda,2} - A_{\lambda,1} A_{\lambda,2}} d\lambda$$



Лучистый теплообмен между двумя серыми телами в замкнутом пространстве

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon c F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

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



Расчётная формула для лучистого теплообмена между поверхностями произвольной формы с произвольной ориентацией в пространстве

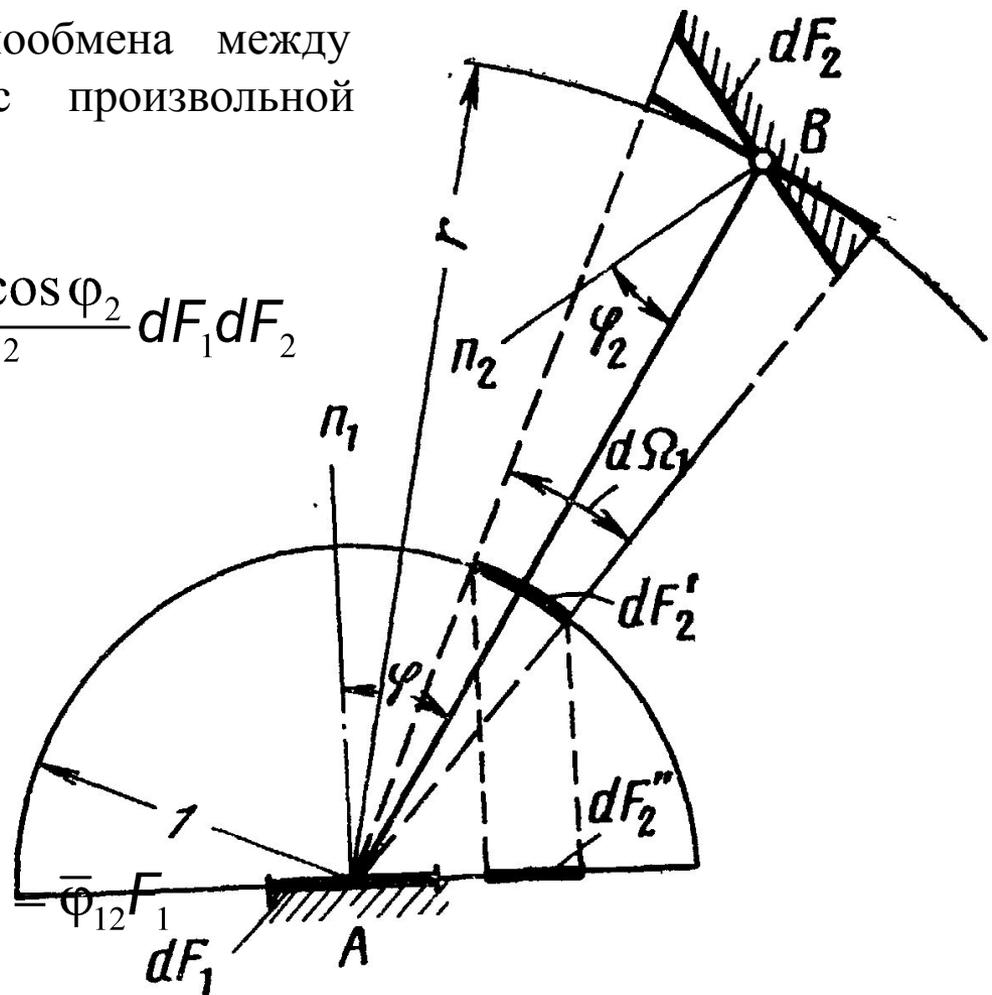
$$Q = \varepsilon_{\Pi} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

$$\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_1 \varepsilon_2$$

$$Q = \varepsilon_{\Pi} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12}$$

Взаимная поверхность излучения

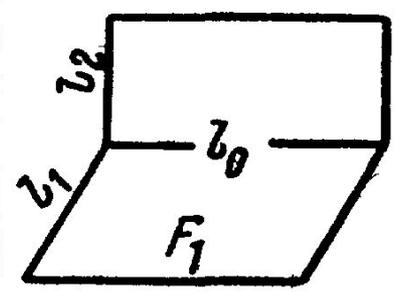
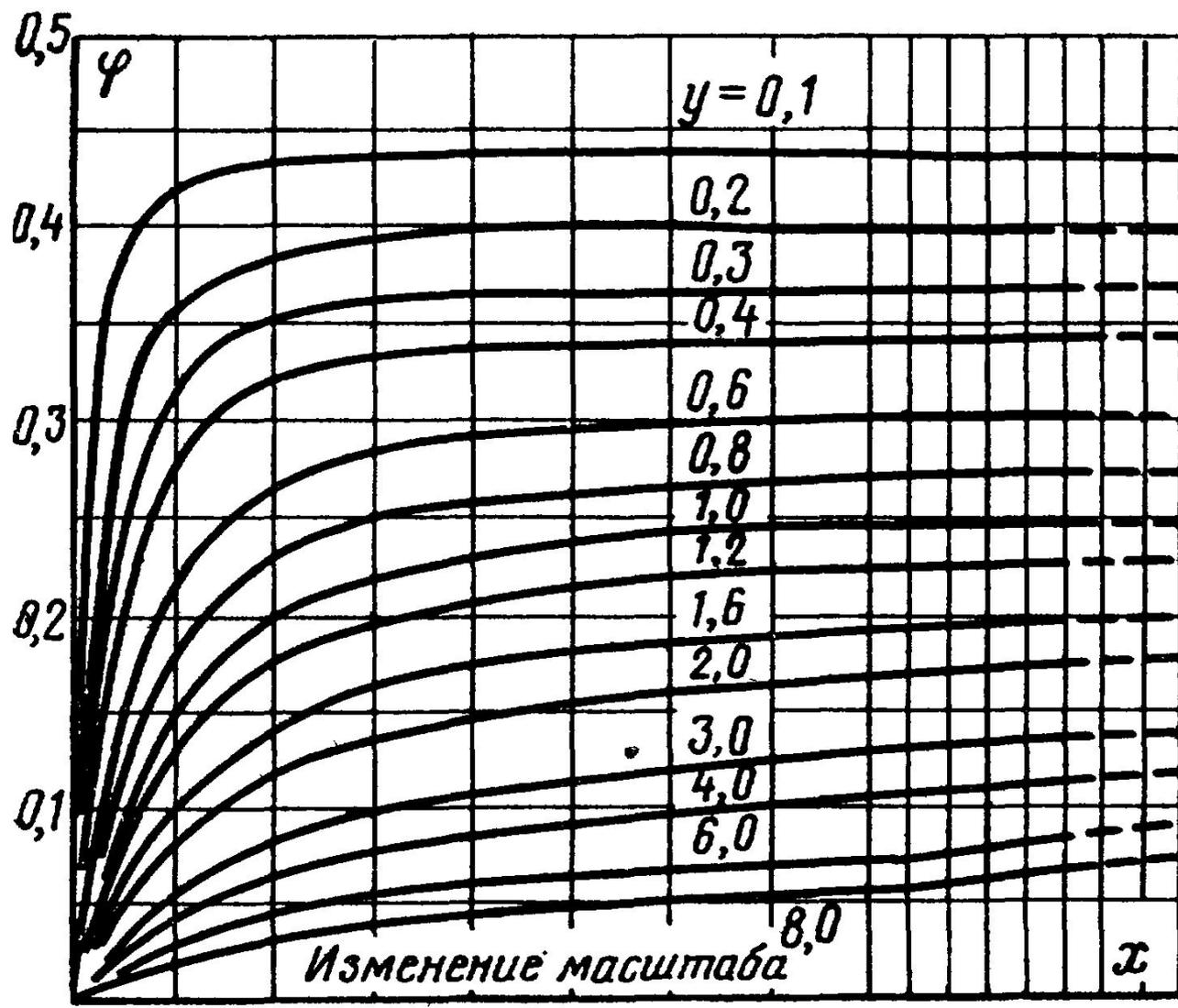
$$F_{12} = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_2 = \int_{F_1} \varphi' dF_1 = \bar{\varphi}_{12} F_1$$



$\varphi'$  — локальный угловой коэффициент, численное значение которого показывает, какая доля энергии, излучаемой элементом  $dF_1$  по всему полупространству, попадает на поверхность  $F_2$ ;  $\bar{\varphi}_{12}$  — средний угловой коэффициент.

Для некоторых технически важных случаев лучистого теплообмена значения угловых коэффициентов приведены ниже.

Значения углового коэффициента  $\varphi$  для случая лучистого теплообмена между двумя взаимно перпендикулярными прямоугольниками с общей стороной  $l_0$ .  
 $F_1$  — расчётная поверхность теплообмена.

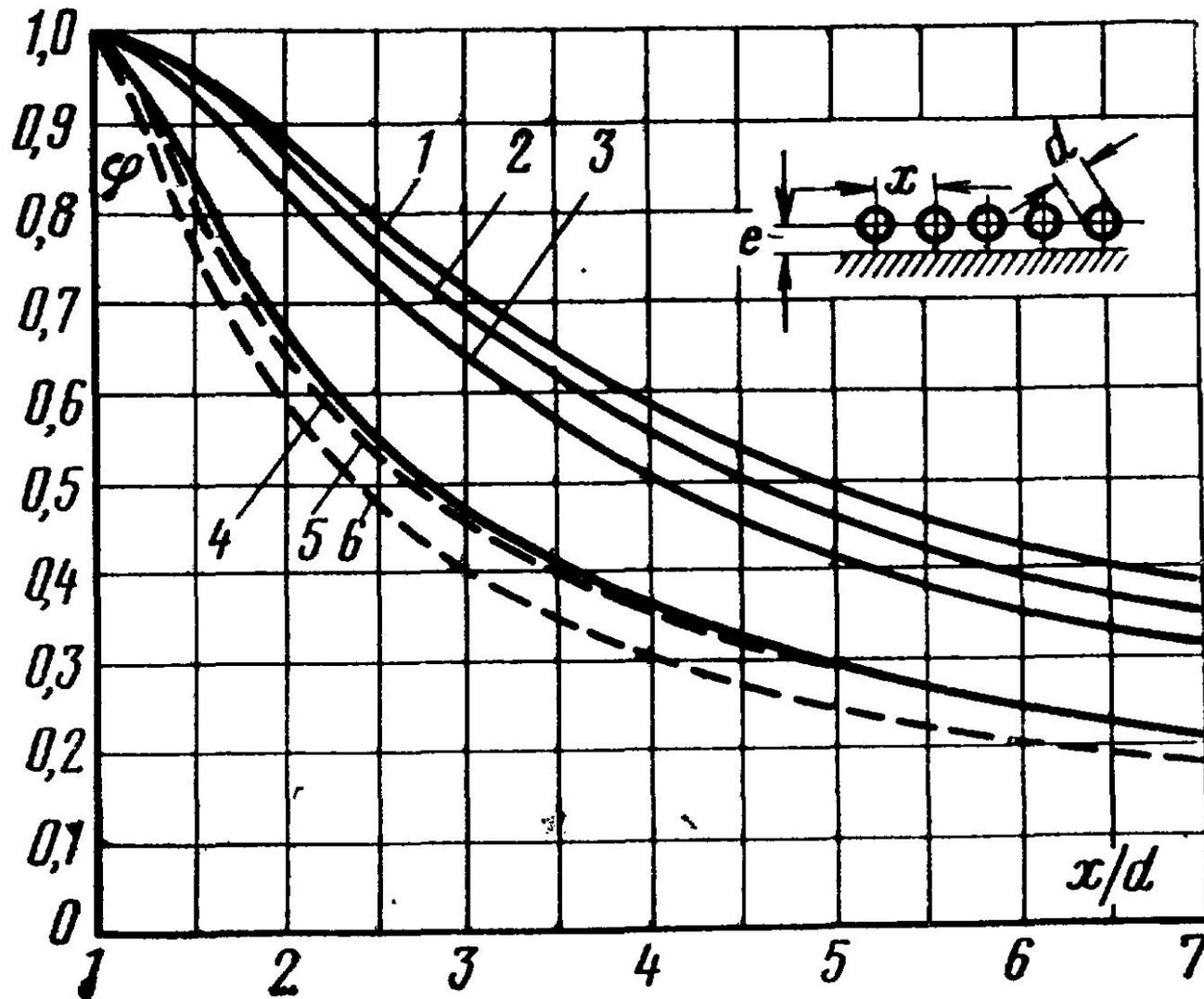


$$y = l_1 / l_0$$

$$x = l_2 / l_0$$

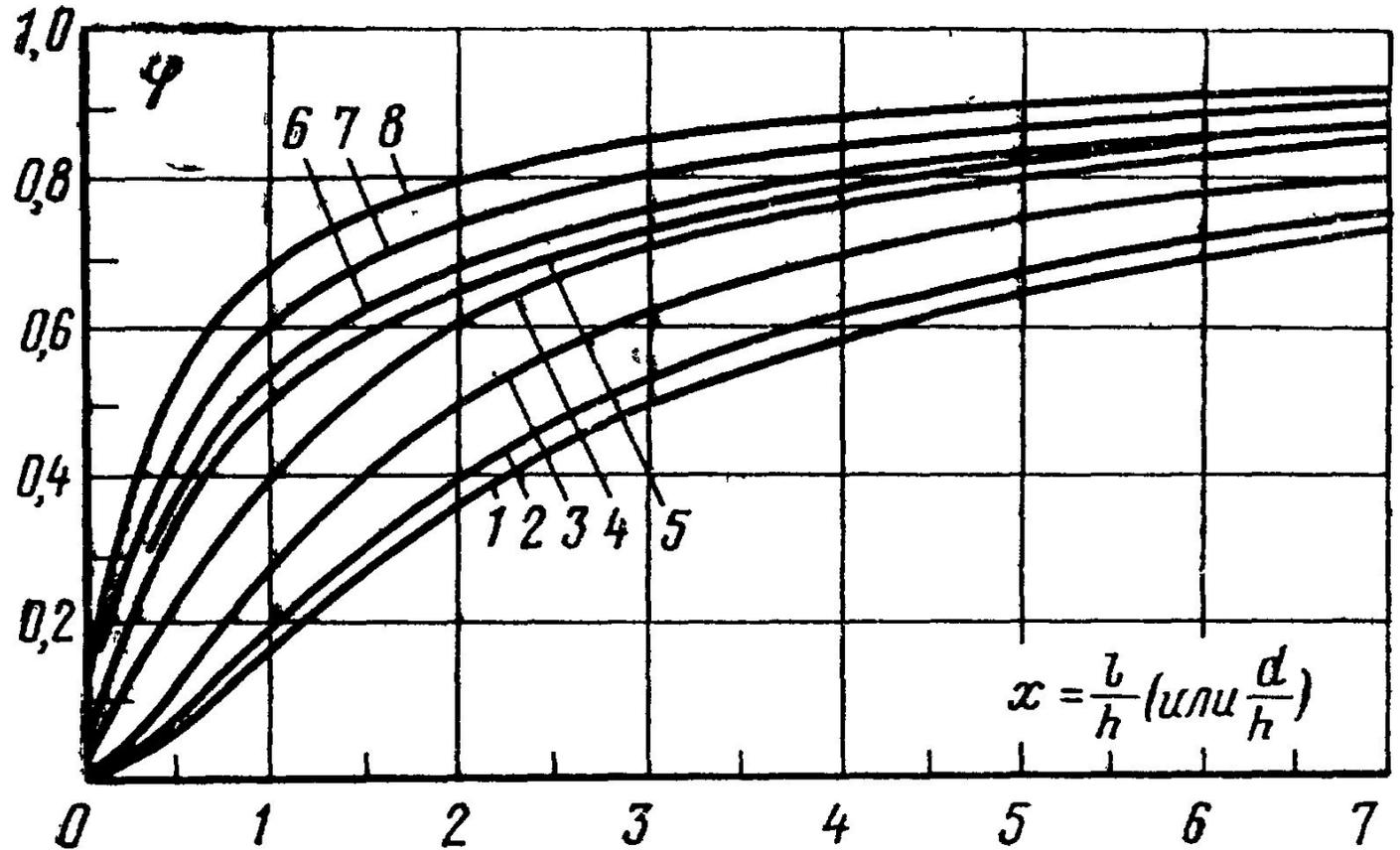
### Значения углового коэффициента $\phi$ для однорядного экрана.

1 – общее излучение при  $e \geq 1,4d$ ; 2 – общее излучение при  $e = 0,8d$ ; 3 – общее излучение при  $e = 0,5d$ ; 4 – общее излучение при  $e = 0$ ; 5 – излучение пламени при  $e \geq 0,5d$ ; 6 – излучение пламени при  $e = 0$ .

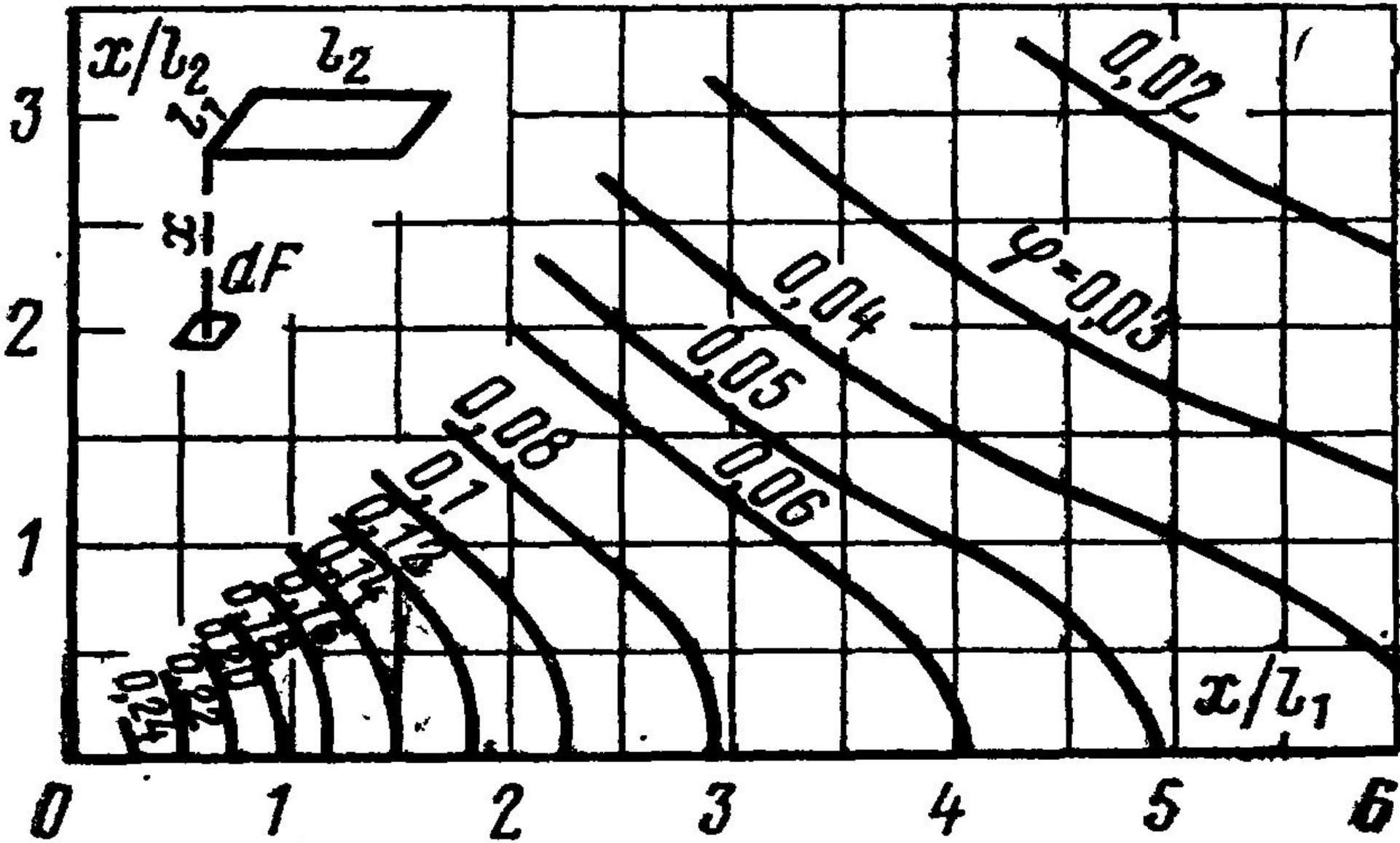


# Значения углового коэффициента $\phi$ для случая лучистого теплообмена между плоскими параллельными фигурами.

$l$  и  $d$  – сторона и диаметр фигуры;  $h$  – расстояние между плоскостями; 1–4 – при прямом лучистом теплообмене между поверхностями; 5–8 – при лучистом теплообмене между поверхностями с учётом отражения от соединяющей их нетеплопроводной оболочки, 1, 5 – диски; 2, 6 – квадраты; 3, 7 – прямоугольники с отношением сторон 2:1; 4, 8 – длинные узкие прямоугольники.



Значения углового коэффициента  $\phi$  для случая лучистого теплообмена между элементом  $dF$  и параллельным прямоугольником, через одну из вершин которого проходит нормаль к  $dF$ .



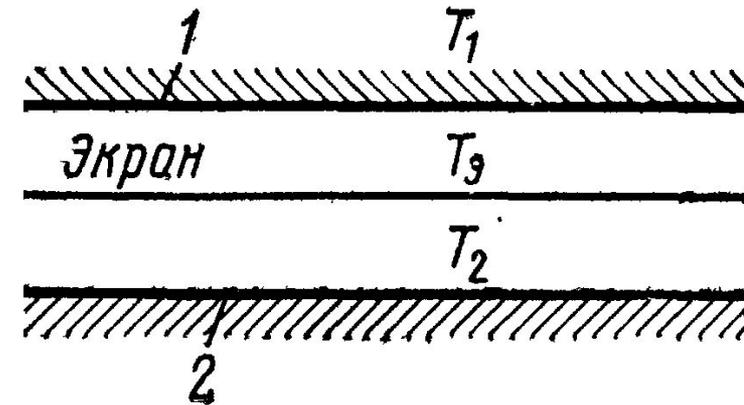
Чтобы интенсифицировать лучистый теплообмен необходимо увеличить температуру излучающего тела и увеличить степень черноты системы.

Чтобы уменьшить теплообмен, необходимо снизить температуру излучающего тела и уменьшить степень черноты.

В тех случаях, когда температуру изменять нельзя, для снижения лучистого теплообмена обычно применяются экраны.

При отсутствии экрана теплообмен излучением между поверхностями 1 и 2 определяется уравнением

$$q_{12 \text{ без экр}} = \varepsilon c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$



При наличии экрана интенсивность лучистого теплообмена изменится.

Вследствие стационарности процесса потоки излучения, передаваемые от первой поверхности к экрану и от экрана ко второй поверхности будут одинаковы.

$$q_3 = \varepsilon_{\text{п}} c_0 \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] = q_2 = \varepsilon_{\text{п}} c_0 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right]$$

Из этого соотношения определяется неизвестная температура экрана.

$$\left(\frac{T_3}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

$$q_3 = \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{II}} c_0 \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad q_3 = \frac{q_{12}}{2}$$

Последнее равенство означает, что при наличии одного экрана количество передаваемой энергии уменьшается в 2 раза.

Можно также показать, что при наличии двух экранов количество передаваемой теплоты уменьшается в 3 раза, при наличии  $n$  экранов – в  $(n + 1)$  раз.

Ещё больший эффект снижения получается, если применяются экраны с малой степенью черноты. Так, если между двумя плоскими поверхностями со степенью черноты  $\varepsilon$  установлено  $n$  экранов со степенью черноты  $\varepsilon_3$ , то

$$\frac{q_3}{q_{12}} = \frac{1}{1 + n \frac{2 - \varepsilon_3}{2 - \varepsilon} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_3}}$$

### 5-3. Тепловое излучение газов

Газы обладают способностью излучать и поглощать лучистую энергию. Для разных газов она различна.

Излучение обычных одно- и двухатомных газов настолько незначительно, что в инженерных расчётах эти газы обычно рассматривают как абсолютно прозрачные (диатермичные).

Значительной способностью излучать и поглощать лучистую энергию обладают многоатомные газы.

В теплотехнических расчётах наибольший интерес представляют углекислый газ и водяной пар; эти газы образуются при горении топлива.

При наличии в среде раскалённых частиц сажи газовая среда становится светящейся (такую среду называют *пламенем* или *факелом*).

Газы постоянно излучают и поглощают энергию лишь в определённых интервалах длин волн  $\Delta\lambda$ , так называемых *полосах*, расположенных в различных частях спектра.

Излучение и поглощение газов носит *избирательный (селективный)* характер.

# Основные полосы поглощения CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O

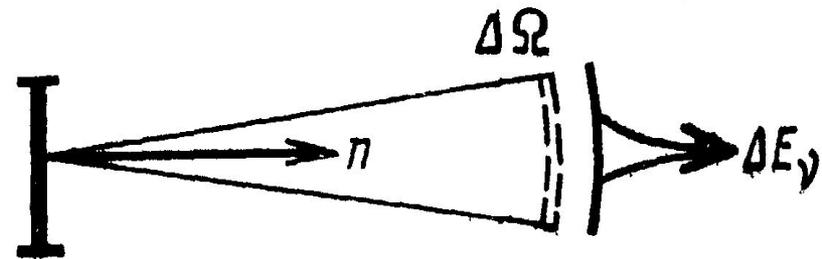
CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O	
λ, мкм	Δλ, мкм	λ, мкм	Δλ, мкм
2,4—3,0	0,6	2,2—3,0	0,8
4,0—4,8	0,8	4,8—8,5	3,7
12,5—16,5	4,0	12—30	18

В газах излучение и поглощение *всегда протекает в объёме*.

Поток энергии излучения, пересекающий единичную площадку и распространяющийся в направлении нормали к её поверхности внутри элементарного телесного угла называется интенсивностью излучения  $J$ .

$$J_v = \lim \frac{\Delta E_v}{\Delta \Omega}$$

$$J = \int_0^{\infty} J_v dv$$



## Закон Бугера

$$dJ_{\nu} = -a_{\nu} J_{\nu} dx$$

$$J_{\nu}(x) = J_{\nu}(0) e^{-a_{\nu} x}$$

$a_{\nu} l$  – *оптическая толщина* газового слоя

$$\varepsilon = \frac{E_{\nu}}{E_{0\nu}} = f(a_{\nu} l) \text{ – спектральная степень черноты}$$

