Тема 3 (2 час, лекция 1)

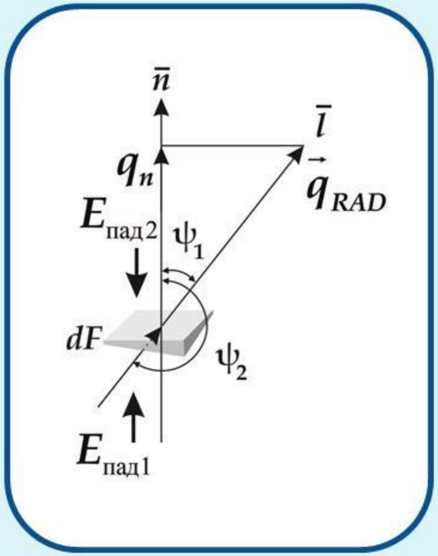
Лекция 15

Особенности теплообмена излучением в поглощающих средах, теплообмена излучением между излучающим газом или паром и теплообменной поверхностью.

Рассматриваются не «мутные», не рассеивающие среды. Газы чистые без копоти и сажи (т.е. не факел). Только поглощение, потом излучение поглащенного.

Вектор теплового излучения

$$\vec{q}_{RAD}$$



$$dQ = \vec{q}_{RAD} \cdot d\vec{F} = q_{RAD} \cdot \cos\psi \cdot dF = q_n \cdot dF$$

$$dQ = \vec{q}_{RAD} \cdot d\vec{F} = dQ_{пад1} - dQ_{пад2} = dQ_{рез}$$

$$Q_{рез} = \int_F \vec{q}_{RAD} \cdot d\vec{F} = \int_F q_{RAD} \cdot \cos\psi \cdot dF = Q_{пад1} - Q_{пад2}$$

$$q_{рез} = E_{пад1} - E_{пад2} = \left|\cos\psi_1 = -\cos\psi_2\right| = \int_{2\pi} I_1 \cdot \cos\psi \cdot d\omega + \int_{2\pi} I_2 \cdot \cos\psi \cdot d\omega$$

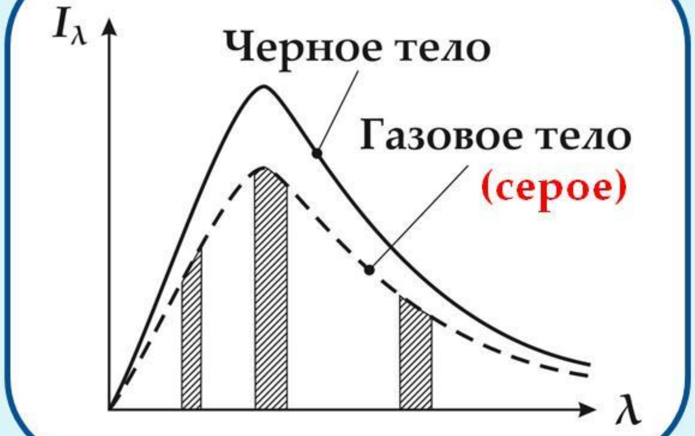
$$q_{рез} = \int_{4\pi} I \cdot \cos\psi \cdot d\omega$$

$$\vec{q}_{RAD} = q_{RAD\,x}\vec{i} + q_{RAD\,y}\vec{j} + q_{RAD\,z}\vec{k} = \int_{4\pi} I\vec{l}\,d\omega$$

Если длина пробега фотонов мала, этапы поглощения – излучения близки, то вектор диффузного излучения можно представить в градиентной форме, используя представление элементарного объема как абсолютно черного тела. Подход Росселанда.

$$\vec{q}_{RAD} = -\lambda_{RAD} \cdot \mathrm{grad}(T) \qquad \lambda_{RAD} = \frac{16}{3}\frac{\sigma_0}{\alpha}T^3$$

Уравнение переноса излучения в газовой среде



Одноатомные и двухатомные газы обладают ничтожной излучательной и поглощательной способностью – прозрачны для тепловых лучей. В практике теплотехнических расчетов наиболее распространенными трехатомными газами являются углекислый газ (CO_2) и водяные пары (H_2O). Спектры газов - резко выраженный селективный (избирательный) характер.

$$A_\lambda = f(T_\text{г}, p, l) \qquad p_{\mathrm{CO_2}} = r_{\mathrm{CO_2}} \qquad p_{\mathrm{H_2O}} = r_{\mathrm{H_2O}}$$

$$dI_{\lambda l} = -\alpha_\lambda I_{\lambda l}\, dl$$

α_λ - спектральный коэффициент поглощения среды

$$\frac{dI_{\lambda l}}{I_{\lambda l}} = -\alpha_\lambda\, dl \Rightarrow I_{\lambda l} = I_{\lambda l=0}\, e^{-\int_0^l \alpha_\lambda\, dl}$$

$$A_\lambda = \frac{I_{\lambda l=0} - I_\lambda}{I_{\lambda l=0}} = 1 - e^{-\int_0^l \alpha_\lambda\, dl}$$

$$L_\lambda = \int_0^l \alpha_\lambda\, dl$$

L_λ - оптическая толщина среды (l – полная толщина среды)

$$I_{\lambda l} = I_{\lambda l=0}\, e^{L_\lambda}$$ - закон **Бугера**

$$A_\lambda = 1 - e^{-L_\lambda}$$

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda = 1 - e^{-L_\lambda} \quad - \text{ по закону Кирхгофа}$$

Если предположить, что поглощенная – мало переизлучается:

$I_0 \alpha_\lambda dl$ - собственное излучение

$$dI_l = \left(I_0 - I_l\right)\alpha_\lambda dl$$

$I_l \alpha_\lambda dl$ - поглощенное излучение

$$I_0 = \frac{\eta}{4\pi\alpha_\lambda}$$

$$\frac{dI_l}{dl} = -I_l\alpha_\lambda + \frac{\eta}{4\pi}$$

$$I_l = I_{l=0}\exp\left(-\int_0^l \alpha_\lambda dl\right) + \int_0^l \alpha_\lambda I_0 \exp\left(-\int_{l'}^l \alpha_\lambda dl''\right) dl'$$

При постоянных параметрах влияния среды на луч (для газов):

$$I_l = I_{l=0}\,\mathrm{e}^{-L} + I_0\left(1 - e^{-L}\right)$$

$$I_l = I_{l=0}\left(1 - A_\lambda\right) + I_0 A_\lambda$$

Интенсивность потока в поглощающей среде определяется свойствами ограничивающей среду стенки. Для диффузной стенки ($D = 0$):

$$I_{l=0} = \varepsilon_{\lambda\,\text{c}} \frac{E_{0\,\text{c}}}{\pi} + R_{\lambda\,\text{c}} \frac{E_{\text{пад}}}{\pi}$$

Для серой стенки $\varepsilon_{\lambda\,\text{c}}$, $R_{\lambda\,\text{c}}$ не зависят от длины волны.

$$I_l = \frac{1}{\pi}\left[\int_0^\infty \left(\varepsilon_{\lambda\text{c}} E_{0\,\text{c}} + R_{\lambda\,\text{c}} \cdot E_{\text{пад}}\right)\left(1 - A_\lambda\right) + E_0 A_\lambda\right] d\lambda$$

$$I_l = \frac{1}{\pi}\left[\varepsilon_{\text{c}}\left(\sigma_0 T_c^4 - \int_0^\infty E_{0\,\text{c}} \cdot \alpha_\lambda d\lambda\right) + R_{\text{c}}\left(E_{\text{пад}} - \int_0^\infty E_{\text{пад}} \cdot \alpha_\lambda d\lambda\right) + \int_0^\infty E_{0\,\lambda} \cdot \alpha_\lambda d\lambda\right]$$

Отсюда для среды средние значения:

$$A_{\text{г}} = \frac{1}{\sigma_0 T_c^4}\int_0^\infty E_{0\,\text{c}} \cdot \alpha_\lambda d\lambda \qquad \varepsilon_{\text{г}} = \frac{1}{\sigma_0 T^4}\int_0^\infty E_{0\,\lambda} \cdot \alpha_\lambda d\lambda$$

Если помимо поглощения еще и рассеянье, то :
α_λ (коэффициент поглощения или коэффициент абсорбции вещества) заменяется на коэффициент ослабления среды k_λ, который иногда представляется в виде суммы двух коэффициентов, отвечающих, соответственно, за поглощение и рассеяние.

$$L_\lambda = \frac{1}{\alpha_\lambda}, \text{ при серой изотропной среде } L = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{k}$$

$L_\lambda = 0$ или $L = 0$, то $A_\lambda = 0$ или $A = 0$ - поглощение может происходить только в слое вещества конечной толщины.

$L_\lambda \to \infty$ или $L \to \infty$, то $A_\lambda = 1$ или $A = 1$ - слой большой толщины поглощает луч целиком как абсолютно черное тело.

Если $k_\lambda = 0$, то и $A_\lambda = 0$.

Если $k_\lambda \to \infty$, то поглощение происходит в поверхностном слое, то есть состояние поверхности тела оказывает большое влияние на его поглощательную и излучательную способности.

Длину луча – иногда как длину свободного пробега фотонов. Обратная величина – как фотонное число Кнудсена.

Степень черноты газового объема (средняя, эффективная) определяется длиной луча:

$$\varepsilon_{\lambda l} = \alpha_\lambda L$$

(по данным Х. Хоттела и Э. Эккерта)

Форма газового объема	
Круглый цилиндр: высота = диаметру = *d*. Излучение в центр основания	0.77 *d*
Круглый цилиндр: высота = ∞, диаметр = *d*. Излучение на выпуклую поверхность	0.95 *d*
Цилиндр: высота = ∞, основание — полукруг с радиусом *r*. Излучение в центр плоской прямоугольной поверхности	1.26 *r*
Сфера: диаметр = *d* Излучение на поверхность	0.65 *d*
Объем между двумя бесконечными плоскостями, находящимися на расстоянии *l* друг от друга. Излучение на плоскости	1.8 *l*
Круглый цилиндр: высота = ∞, диаметр = *d* Излучение в центр основания	0.9 *d*
Пучок труб[1]	
В треугольном расположении:	
$s = 2d$	$3.0\,(s - d)$
$s = 3d$	$3.8\,(s - d)$
В квадратном расположении	
$s = 2d$	$3.5\,(s - d)$
Куб: длина = *a* Излучение на каждую плоскость поверхности	0.66 *a*

s — расстоянию между центрами труб

d — диаметр трубы

Излучение в полостях и каналах

Средняя температура стенки канала, в котором находится газ, рассчитывается по уравнению:

$$T_{ст} = T'_{ст} + \frac{T''_{ст}}{2}$$

где $T'_{ст}$ – температура стенки канала у входа газа;
$T''_{ст}$ – температура стенки канала у выхода га

Средняя температура газа определяется по формуле:

$$T_{г} = \frac{T'_{ст} + T''_{ст}}{2} \pm \frac{\left(T'_{г} - T'_{ст}\right) - \left(T''_{г} - T''_{ст}\right)}{\ln\frac{\left(T'_{г} - T'_{ст}\right)}{\left(T''_{г} - T''_{ст}\right)}}$$

где $T'_{г}$ – температура газа у входа в канал;
$T''_{г}$ – температура газа у выхода из канала.

Часто длина пути луча для газовых объемов рассчитывается по уравнению $l = 0.9\frac{4V}{F}$

Часто для пучков труб, омываемых излучающими газами, длина пути луча рассчитывается по формуле $l = 1.08\, d_2\left(\frac{s_1 \cdot s_2}{d_2} - 0.785\right)$

Количество теплоты, **воспринятое стенками канала** (направление - к стенке) в результате теплообмена излучением между газом и стенкой (как результирующее), согласно интегральным соотношениям определяется уравнением без учета многократного отражения (это при $\varepsilon_с \geq 0.8$):

$$q_л = \varepsilon'_с \cdot (q_г - q_с)$$

$$\varepsilon'_с = \frac{\varepsilon_с + 1}{2}$$

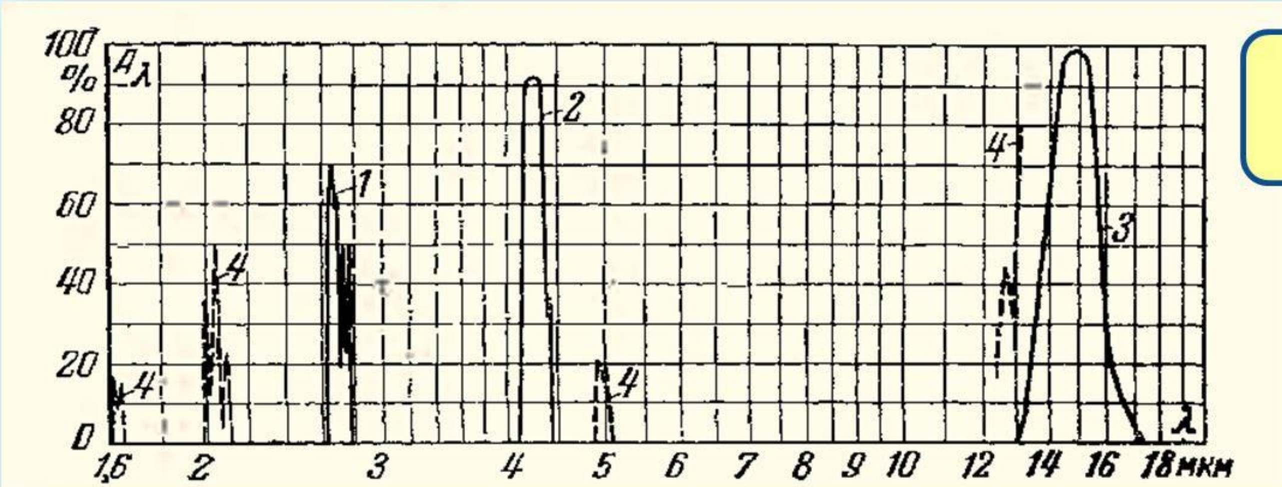
$$Q = \varepsilon'_с c_0 F_с \left[\varepsilon_г \left(\frac{T_г}{100} \right)^4 - A_г \left(\frac{T_с}{100} \right)^4 \right]$$

$$\alpha_л = \frac{q_л}{T_г - T_с}$$

$$\varepsilon_г = \frac{q_г}{q_0}$$

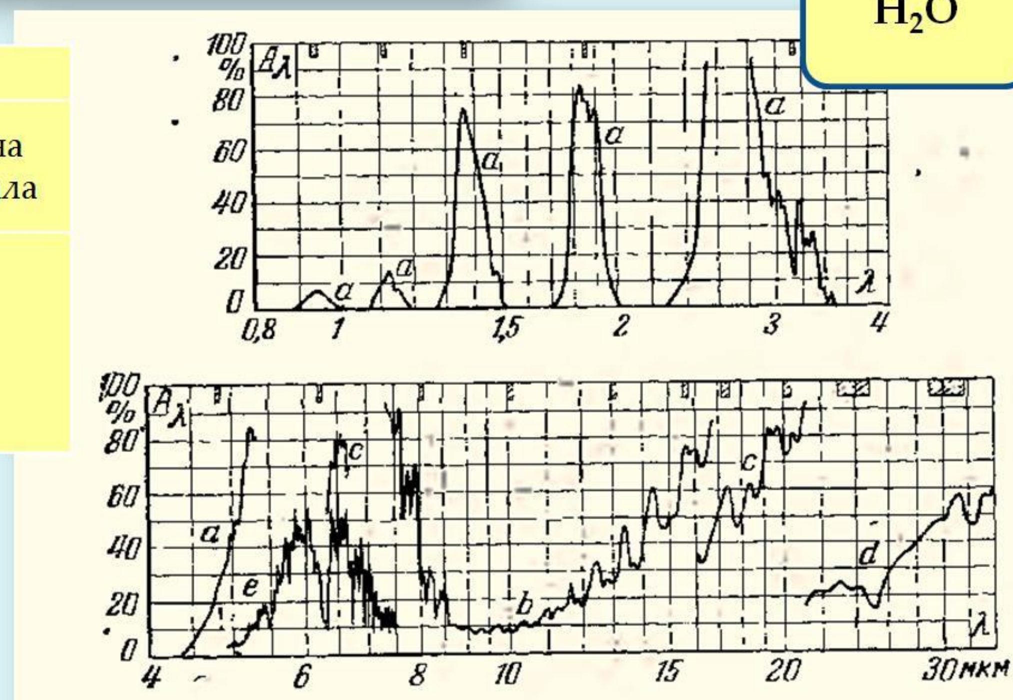
q_0 - Согласно закону Стефана – Больцмана для АЧТ

В практике теплотехнических расчетов наиболее распространенными трехатомными газами являются углекислый газ (CO_2) и водяные пары (H_2O).



CO_2

H_2O



CO_2		H_2O	
Δλ, мкм	Ширина интервала	Δλ, мкм	Ширина интервала
2.4 – 3.0 4.0 – 4.8 12.5 – 16.5	0.6 0.8 4.0	1.7 – 2.0 2.2 – 3.0 4,8 – 8.5 12 - 13	0.3 0.8 3.7 18

Более простой и надежный метод разработан Альфредом Шаком, который предлагает следующие уравнения, определяющие излучение газов в среду с температурой 0K. В этих формулах p – парциальное давление газа, бар.

Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.
Теплопередача

$$E_{CO_2} = 3.50 \cdot (pl)^{0.33} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3.5}$$

$$E_{H_2O} = 3.50 \cdot p^{0.8} \cdot l^{0.6} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3}$$

Шак А.
Промышленная теплопередача

$$E_{CO_2} = 4.07 \cdot (pl)^{0.33} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3.5}$$

$$E_{H_2O} = 40.7 \cdot p^{0.8} \cdot l^{0.6} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3}$$

Излучательная способность газов не подчиняется закону Стефана-Больцмана:
излучательная способность водяных паров пропорциональна T^3,
излучательная способность углекислого газа – $T^{3.5}$.
. Следовательно, интенсивность излучения газов с ростом температуры уменьшается.

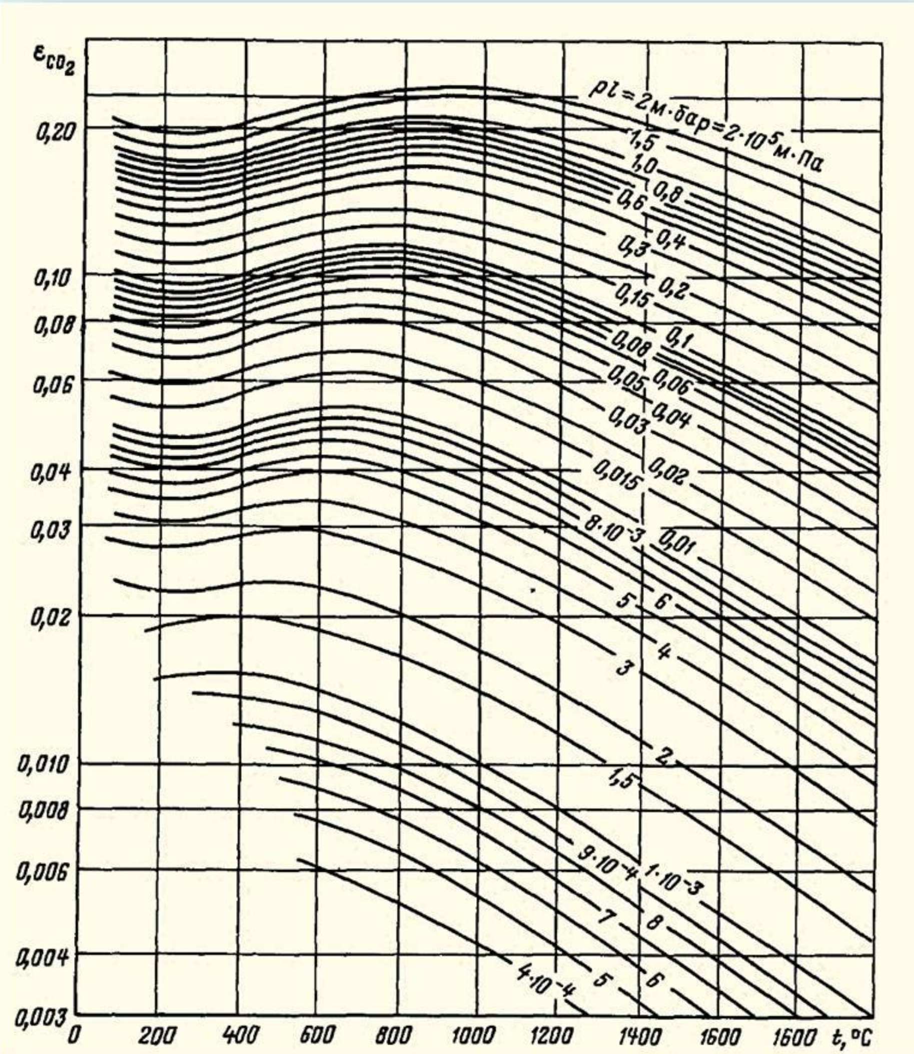
$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon_г$$

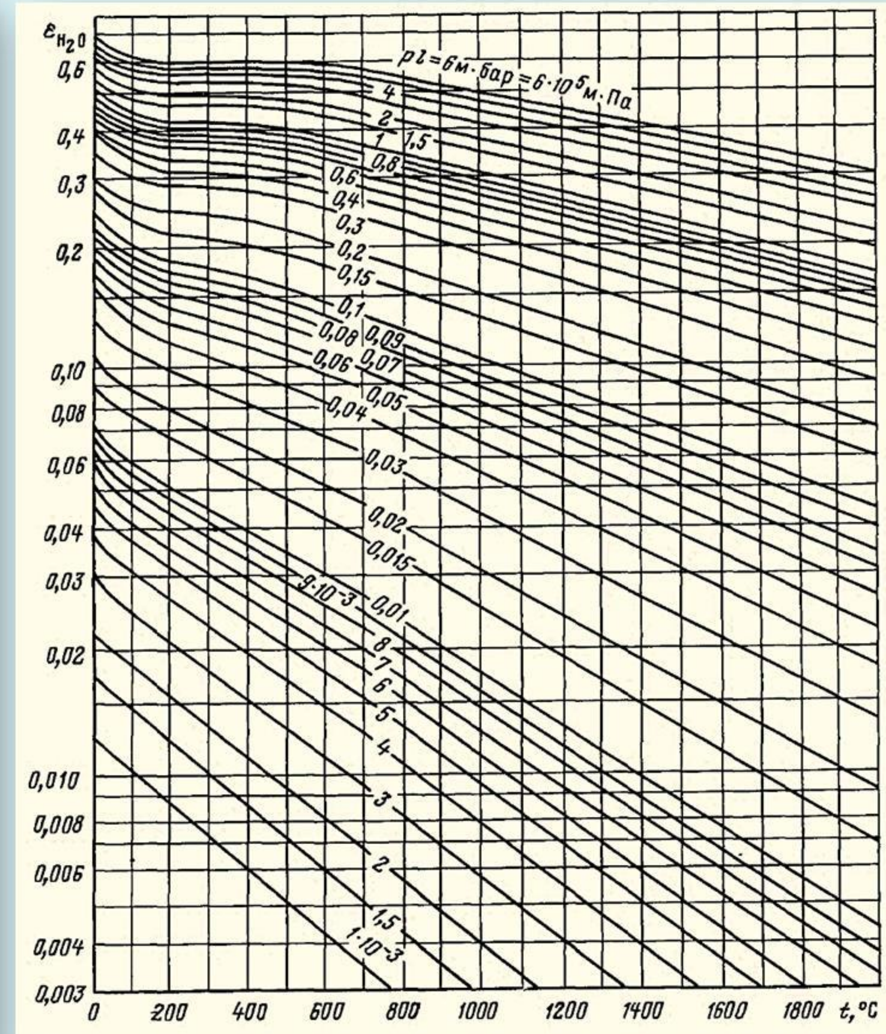
$$A_г = \varepsilon_{CO_2} \left(\frac{T_г}{T_с}\right)^{0.65} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon_г$$

β - поправочный коэффициент, учитывающий более сильное влияние парциального давления по сравнению с влиянием толщины слоя газа.
$\Delta\varepsilon_г$ - поправка на переизлучение газа и пара при совпадении частот в спектре.

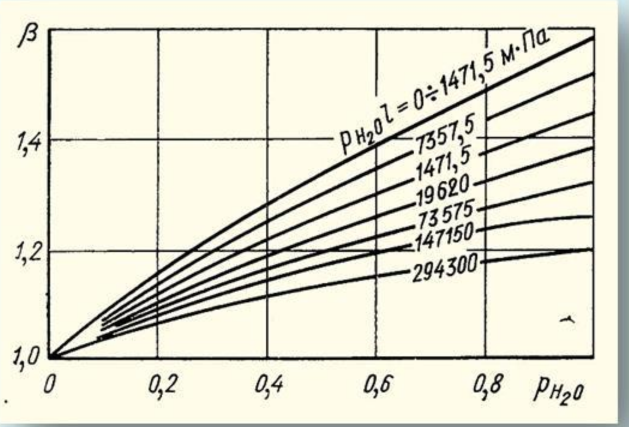
Точнее – пользуясь номограммами.

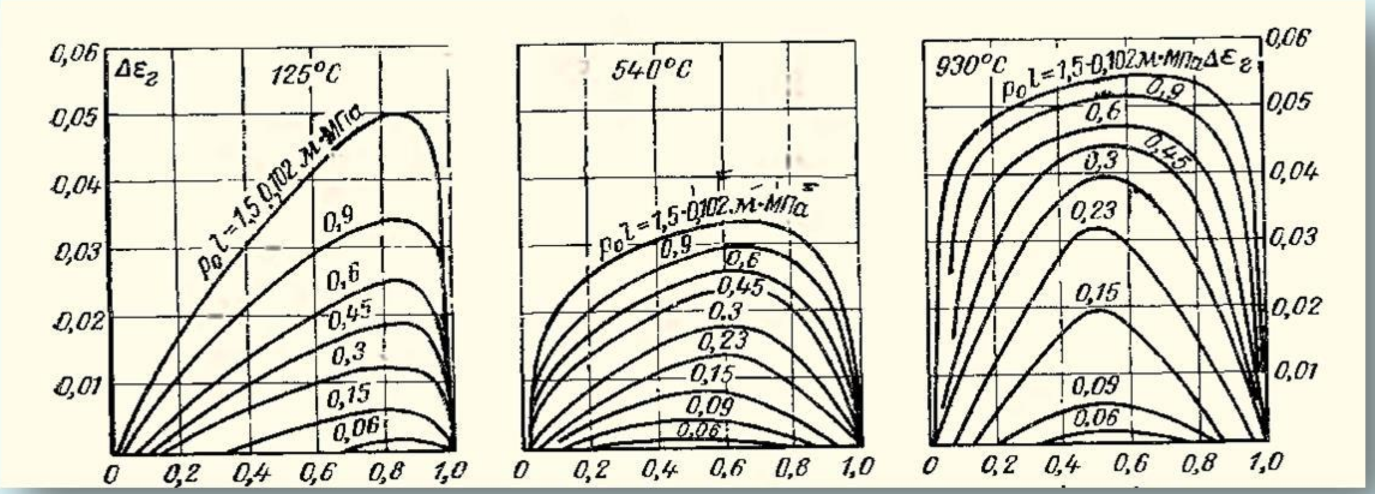
Вход в номограммы – длина луча и парциальное давление газа (пара)





Поправка на парциальное давление водяных паров. Общее давление – 0.98 бар. При расчете входить по реальному отношению $\dfrac{p_{H_2O}}{p_0}$





$$\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}}$$

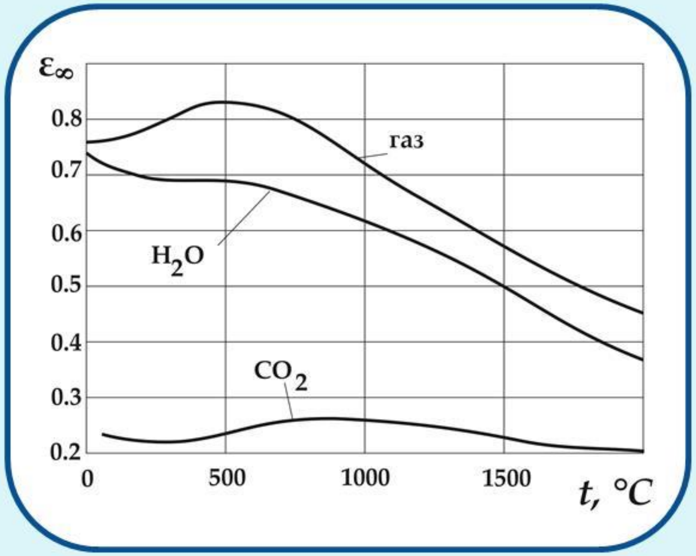
Поправка на переизлучение. p_0 – общее давление газа в полости.

Другой приближенный метод. Используя метод сальдо и представление о предельных значениях степени черноты получают выражение для теплового потока от газа к окружающей его стенке. Рассматривают селективное излучение и в качестве поглотительной способности АЧТ – предельная степень черноты.

$$Q_{гс} = \left(E_{эфф\,г} - E_{эфф\,с}\right)F_с \qquad E_{эфф\,г} = \left(E_{0\,г}\right) + q_{г\,с}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_г \Delta\lambda}\right) \qquad E_{эфф\,с} = \left(E_{0\,с}\right) + q_{с\,г}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_с \Delta\lambda}\right) \qquad q_{г\,с} = -q_{с\,г}$$

$$E_{0\,г} = \varepsilon_г c_0 \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 \qquad E_{0\,с} = \varepsilon_с c_0 \left(\frac{T_с}{100}\right)^4 \qquad \varepsilon_г \Delta\lambda = \frac{\varepsilon_г E_{0\,г}}{\varepsilon_г^\infty E_{0\,г}} = \frac{\varepsilon_г}{\varepsilon_г^\infty}$$

$$Q_{гс} = \frac{c_0 F_с \left[\varepsilon_г^\infty \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \varepsilon_{гс}^\infty \left(\frac{T_с}{100}\right)^4\right]}{\frac{\varepsilon_г^\infty}{\varepsilon_г} + \frac{1}{\varepsilon_с} - 1},$$



Расчет теплообмена между продуктами сгорания и стенкой можно согласно инженерным методикам (А.М. Гурвич и В.В. Митор):

$$\varepsilon = 1 - e^{-10kpl}$$

$$k = 0.8\frac{1 + 2.0p_{H_2O}}{\sqrt{10pl}}\left(1 - 0.38\frac{T}{1000}\right)$$

$$p = p_{H_2O} + p_{CO_2}, \quad \text{в МПа}$$

Методика согласована с номограммами в диапазонах:

$$p_{CO_2}\ (\text{МПа}) = 8 \cdot 10^{-4} \div 0.16$$

$$p_{H_2O}\ (\text{МПа}) = 4 \cdot 10^{-4} \div 0.13$$

$$p_{H_2O} / p_{CO_2} = 0.2 \div 2.0$$

$$T,\ K = 750 \div 1950$$