Э нергомашиностроение.
6

Лекция №14
ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

- Основные понятия и определения
- Основные законы лучистого теплообмена
- Различные случаи теплообмена излучением
- Радиационный теплообмен между произвольно расположенными элементами поверхностей нагрева
- Интегральные характеристики излучения и поглощения полупрозрачного объема
- Радиационный теплообмен в газах
- Радиационный теплообмен между газом и оболочкой

Основные понятия и определения

Энергия теплового излучения возникает в теле вследствие тепловой энергии и представляет собой электромагнитные колебания.

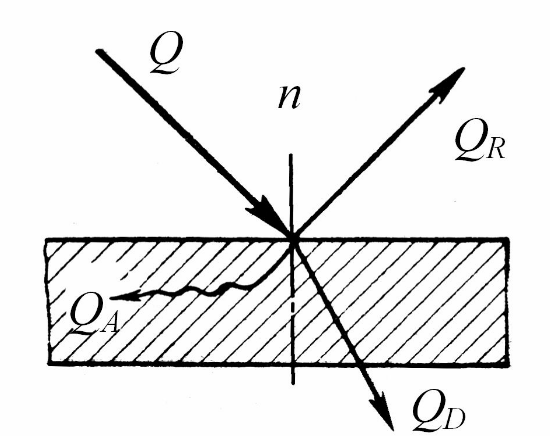


Рис. 1. Реакция тела на тепловое излучение

Космическое излучение	**$0{,}05 \cdot 10^{-9}$ мм**
γ-излучение	**$(0{,}5 \ldots 10) \cdot 10^{-9}$**
Рентгеновские лучи	**$10^{-9} \ldots 2 \cdot 10^{-5}$**
Ультрафиолетовые лучи	**$2 \cdot 10^{-5} \ldots 0{,}4 \cdot 10^{-3}$**
Видимые (световые) лучи	**$(0{,}4 \ldots 0{,}8) \cdot 10^{-3}$**
Тепловые лучи	**$0{,}8 \cdot 10^{-3} \ldots 0{,}8$**
Электромагнитные волны	**$2 \cdot 10^{5}$**

Если из общего количества энергии Q, падающего на тело, поглощается Q_A, отражается Q_R и проходит сквозь тело Q_D (рис. 1), то $Q = Q_A + Q_R + Q_D$. Отношение $Q_A / Q = A$ называют ***поглощательной способностью***, отношение $Q_R / Q = R$ — ***отражательной способностью*** и отношение $Q_D / Q = D$ — ***пропускной способностью тела.***

Следовательно, $A + R + D = 1$.

Если $A = 1$, $R = 0$, $D = 0$ - тело *абсолютно черное*, так как вся энергия поглощается телом. $A = 0{,}96$ имеют шероховатые тела, покрытые сажей.

Если $R = 1$, $A = 0$, $D = 0$ - падающее на тело излучение полностью отражается. Этот предельный случай является абстракцией. Такое абстрактное тело, создающее рассеянное диффузное отражение, называется *абсолютно белым*, а тело, отражающее по законам геометрической оптики, называется *зеркальным*.

При $D = 1$, $R = 0$, $A = 0$ тело совершенно *прозрачно* (диатермично) для теплового излучения и вся энергия проходит через тело.

В природе абсолютно черных, прозрачных, белых и зеркальных тел нет. Тела, поглощательная способность которых от длины волны не зависит, называют ***серыми.***

Закон Стефана-Больцмана

По закону Стефана-Больцмана лучеиспускательная способность тела *E* пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \qquad (1)$$

E — лучеиспускательная способность тела, т. е. количество энергии, проходящей через единицу
поверхности тела в единицу времени, *Вт/м*^{2}*;*
C_0 = 5,67 — константа излучения абсолютно черного тела, *Вт/(м*^{2} • *K*^{4}*);*
ε — степень черноты тела, характеризующая собой отношение лучеиспускательной способности *E*
серого тела к лучеиспускательной способности E_0 абсолютно черного тела при той же температуре *T:*

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C\left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_0\left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C}{C_0} \qquad (2)$$

Закон Кирхгофа

Пусть абсолютно черное тело излучает энергию E_0
.
Часть этой энергии в количестве AE_0 поглотится
серым
телом, остальная энергия в количестве (1 — A) E_0
отразится, снова попадет на черное тело и
полностью
поглотится им. Собственное же излучение серого
тела
обозначим через E_λ.

$$E_0 = (1 - A)E_0 + E_\lambda \qquad (3)$$

$$E_\lambda = AE_0$$

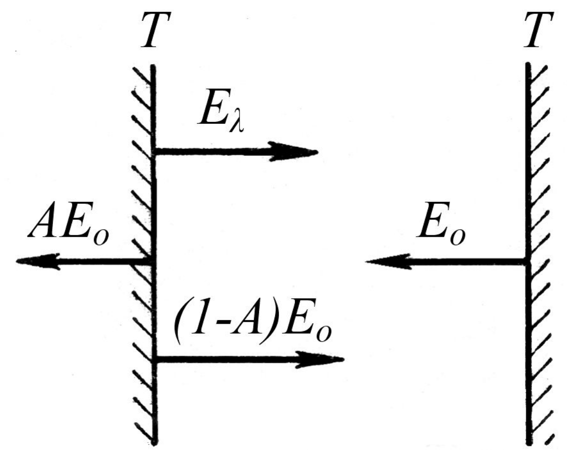


Рис. 2. Теплообмен между серой и абсолютно черной поверхностями тел

т. е. количество испускаемого телом излучения равно произведению коэффициента поглощения этого тела на количество испускаемого излучения абсолютно черным телом.

Степень черноты некоторых материалов

Материал	t в °C	ε
Алюминий шероховатый	26	0,055
Алюминий, окисленный при 600° C	200—600	0,11—0,19
Железо окисленное гладкое	125—525	0,78—0,82
Золото полированное	225—635	0,018—0,035
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь, окисленная при 60° C	200—600	0,61—0,59
Медь полированная	80—115	0,018—0,023
Медь, окисленная при 600 ° C	200—600	0,57—0,87
Молибденовая нить	725—2 600	0,096—0,292
Никель технический полированный	225—375	0,07—0,087
Никелевая проволока	185—1 000	0,096—0,186
Никель, окисленный при 600° C	200—600	0,37—0,48
Платина чистая, полированная пластина	225—625	0,054—0,104
Платиновая проволока	225—1 375	0,73—0,182
Серебро полированное, чистое	225—625	0,020—0,032
Асбестовый картон	40—370	0,93—0,950
Бумага тонкая	19	0,92
Кирпич красный	20	0,93
Кирпич огнеупорный	—	0,8—0,9
Лак белый и черный	40—95	0,80—0,98
Масляные краски различных цветов	100	0,92—0,86
Сажа, свечная копоть	95—270	0,95
Продольная нить	1 040—1 405	0,53
Штукатурка шероховатая, известковая	10—88	0,91

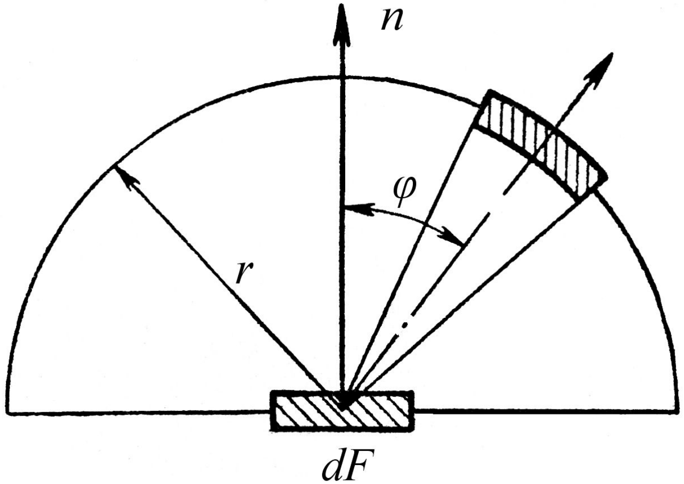


Рис. 3. Излучение с элементарной площадки на поверхности тела

Закон Ламберта

Общее количество энергии, излучаемой по всем направлениям в пределах полусферы с 1 м^2 поверхности в единицу времени, равно лучеиспускательной способности

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Если же рассматривать излучение тела лишь в направлении нормали *En,* то известно, что оно будет в π = 3,14 раз меньше

$$E_n = \frac{E}{\pi} \qquad E_\varphi = E_n \cos\varphi \qquad (4,5)$$

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi = \frac{E}{\pi} \cos\varphi = \frac{\varepsilon\, C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4}{\pi} \cos\varphi \qquad (6)$$

Закон Ламберта справедлив для абсолютно
черных тел, для серых же тел он справедлив
при φ < 60°.

Величина F_{12}, м^2, называется ***взаимной поверхностью излучения***. Она является чисто геометрическим параметром, который определяется размерами и формой поверхностей тел, их взаимным расположением и расстоянием между ними:

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

Величины φ' и φ_{12} представляют собой соответственно ***локальный и средний угловые коэффициенты.*** Численное значение φ ' показывает, какая доля энергии, излучаемой элементом dF_1 по всему полупространству, попадает на поверхность F_2. Значение же φ_{12} является осредненным значением φ' по всей поверхности F_1.

Закон Планка

Излучение называется монохроматическим, если оно отвечает какой-либо определенной длине волны. Излучение, отвечающее длинам волн от 0 до ∞, называется ***интегральным.***
Планком теоретически установлена зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела ***I*** от длины волны и температуры:

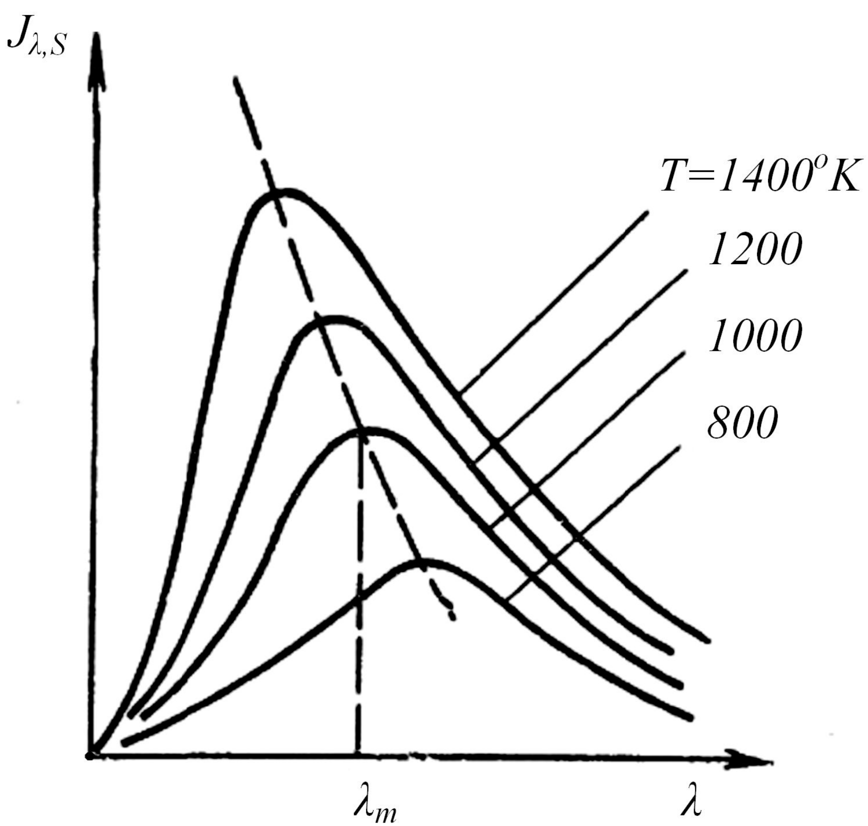


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от длины волн и температуры

$$I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}}-1} \quad Вт/м^3 \qquad (7)$$

λ — длина волны излучения в *м;*
Т — абсолютная температура в ° К;
C_1 и C_2 — постоянные величины;
C_1 = 3,74 10^{-16} Вт/м^2 и C_2 = 1,438 10^{-2} м*К – постоянные закона Планка
е — основание натуральных логарифмов.

Закон Вина

Закон «смещения» Вина вытекает из закона Планка и устанавливает зависимость длины волны λ_m, соответствующей максимальной интенсивности, от температуры:

$$\lambda_m T = 2{,}9 \quad (мм \cdot град)$$

Различные случаи теплообмена излучением

Лучистый теплообмен между двумя телами

$$Q_л = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1$$

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

Учёт солнечного излучения

$$Q_л = \varepsilon_1 C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] - A_{1(s)} F_0 E_s$$

$$e = \frac{W}{4\pi r^2} \quad ккал/м^2 ч$$

Теплообмен между газом и поверхностью твёрдого тела

$$q = 5,69\varepsilon_э \left[\varepsilon_г \left(\frac{T_г}{100} \right)^4 - A_г \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]$$

Если степень черноты стенки $\varepsilon_{ст}$=0.7..1

$$\varepsilon_э = \frac{\varepsilon_{ст} + 1}{2}$$

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\varepsilon_г \varepsilon_{ст}}{\varepsilon_{ст} + \varepsilon_г (1 - \varepsilon_{ст})}$$

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2}(p_{CO_2} l, T_г) + \varepsilon_{H_2O}(p_{H_2O} l, T_г)\beta - \Delta\varepsilon_г$$

Радиационный теплообмен между произвольно расположенными элементами поверхностей нагрева

Пусть dF_1 и dF_2 - произвольно расположенные в пространстве элементы поверхностей, имеющих температуры соответственно T_1 и T_2 (рис 5.). Поглощательная способность этих элементов A_1 и A_2, коэффициенты излучения $C_1 = \varepsilon_1 C_0 = A_1 C_0$ и $C_2 = \varepsilon_2 C_0 = A_2 C_0$. Расстояние между центрами элементов r, а углы между r и нормалями к плоскостям элементов φ_1 и φ_2. Тогда угол видения dF_1 из dF_2

$$d\Omega = dF_2 \cos\varphi_2 / r^2$$

$$dQ_1 = \frac{1}{\pi} F_1 dF_1 d\Omega_1 \cos\varphi_1$$

$$dQ_1 = C_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

$$dQ_{2-1} = A_2 dQ_1 = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

$$dQ_{1-2} = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

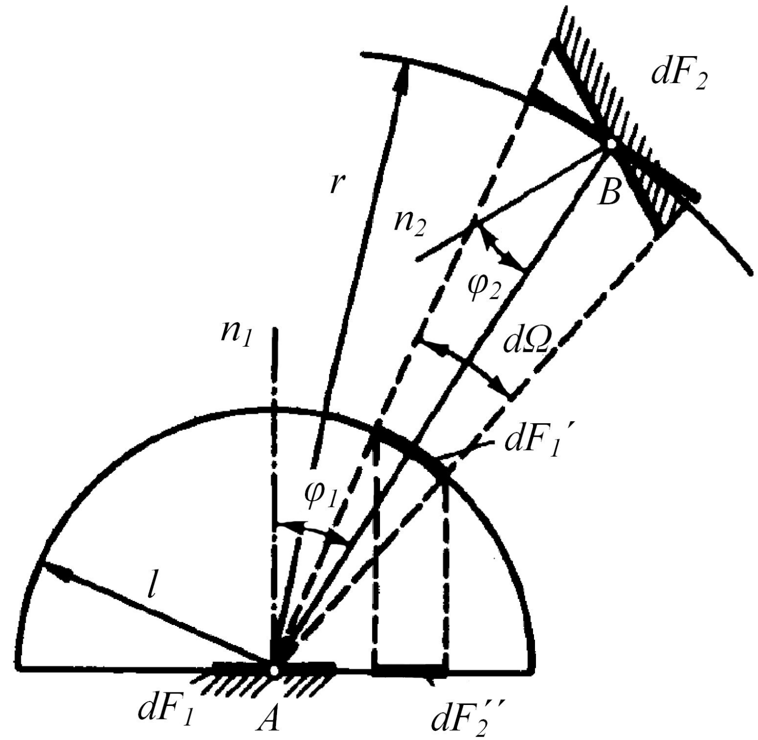


Рис. 5. К выводу формулы для углового коэффициента

$$dQ = dQ_{2-1} - dQ_{1-2}$$

$$dQ = \frac{C_1 C_2}{C_0}\left[\left(\frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100}\right)^4\right]\frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$$

$$dQ = C_{np_0}\left[\left(\frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100}\right)^4\right]\frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2 \qquad (8)$$

где $C_{np_0} = C_1 C_2 / C_0$

$$dQ = C_{np_0}\left[\left(\frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100}\right)^4\right]\int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_2 \qquad (9)$$

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

Отношение потока излучения от поверхности одного тела на поверхность другого тела к полному потоку собственного излучения, выходящему со всей поверхности первого тела по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла, называется ***средним угловым коэффициентом излучения, или коэффициентом облученности***, и обозначается φ_{ik}.

$$\varphi_{12} = Q_{12} / Q_1 \qquad \varphi_{21} = Q_{21} / Q_2 \qquad (10)$$

$$Q = C_1 \left(T_1 / 100 \right)^4 F_1$$

$$Q_{12} = C_1 \left(\frac{T_1}{100} \right) \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{\pi r^2} dF_2$$

$$\varphi_{12} F_1 = \varphi_{21} F_2$$

Для n поверхностей

$$\varphi_{ik} F_i = \varphi_{ki} F_k$$

Где i = 1, 2, 3,…, n; k = 1, 2, 3,…, n

Когда поверхность тела имеет вогнутость, возможно самооблучение ($i = k$), тогда

$$\varphi_{ii} = Q_{ii} / Q_i$$

Если тела образуют замкнутую систему

$$\sum_{k=1}^{n} \varphi_{ik} = 1$$

$$Q_{ik} = \varphi_{ik} Q_i$$

Интегральные характеристики излучения и поглощения полупрозрачного объема

Для расчета полного (интегрального, т.е. по всему спектру) потока излучения введем понятие полной, или интегральной степени черноты газа ε, которая определяется как отношение полного потока излучения газа $E_г$ к полному потоку излучения абсолютно черного тела при температуре, равной температуре газа:

$$\varepsilon_г = \frac{E_г}{E_0} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_{\lambda г} E_{\lambda 0} d\lambda}{\sigma_0 T^4} \tag{11}$$

$$A_г = \frac{E_{погл}}{E_{пад}} = \frac{\int_0^\infty E_{\lambda пад}\left(1 - e^{-\alpha_\lambda l_{эф}}\right) d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda пад} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty A_{\lambda г} E_{\lambda пад} d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda пад} d\lambda} \tag{12}$$

Лишь в условиях термодинамического равновесия между падающим излучением и поглощающей средой, когда падающее излучение является абсолютно черным, выражения (11) и (12) совпадают, что означает справедливость в этих условиях закона Кирхгофа для поглощающей и излучающей сред: $\varepsilon_г = A_г$.

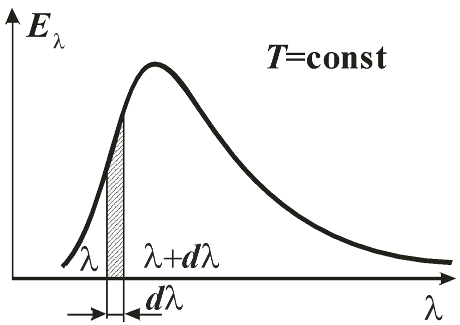
$$E_г = \varepsilon_г \sigma_0 T^4$$

Радиационный теплообмен в газах

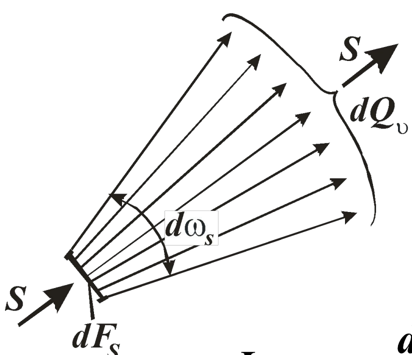
Типы полупрозрачных сред:

1. газовые среды;
2. запыленные среды;
3. светящееся пламя

Характеристики излучения газов



1. Спектральная интенсивность изл.



$$I_{\upsilon,s} = \frac{dQ_\upsilon}{dF_s d\omega_s d\upsilon}$$

2. Угловая плотность объемного излучения

$$j_\upsilon = \frac{dQ_\upsilon}{dV d\upsilon d\omega_s}$$

3. Спектральная плотность объемного излучения

$$\eta_{c,\upsilon} = 4\pi j_\upsilon$$

4. Закон Бугера

$$\frac{dI_{\upsilon,s}}{I_{\upsilon,s}} = -K_\upsilon ds \qquad K_\upsilon = \alpha_\upsilon + \beta_\upsilon$$

5. Спектральная оптическая длина луча

$$I_{\upsilon,s}^{M_2} = I_{\upsilon,s}^{M_1} \exp\left(-\int_0^l K_\upsilon ds\right) \qquad l_\upsilon = -\int_0^l K_\upsilon ds$$

$$K_\upsilon = \text{const}, \quad l_\upsilon = K_\upsilon l, \quad I_{\upsilon,s}^{M_2} = I_{\upsilon,s}^{M_1} e^{-K_\upsilon l} = I_{\upsilon,s}^{M_1} e^{-l_\upsilon}$$

6. Спектральная плотность объемного поглощения излучения

$$\eta_{пог,\upsilon} = \alpha_\upsilon \int_0^{4\pi} I_{\upsilon,s} d\omega_s$$

Обычно в веществе количество атомов в основном состоянии гораздо больше, чем атомов возбужденных. Поэтому световая волна, проходя по веществу, расходует свою энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения при этом падает, подчиняясь закону Бугера:

$$I_l = I_0 e^{-kl}$$

где I_0 – исходная интенсивность, I_l – интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе с коэффициентом поглощения k. Из уравнения видно, что среда поглощает свет очень сильно – по экспоненциальному закону.
Вещество, в котором возбужденных атомов гораздо больше, чем атомов в основном состоянии, называется *активным*.

Следует иметь в виду, что величина $\varepsilon_г$ весьма сильно зависит от температуры, так что плотность излучения, проходящего через границу газового объёма, не пропорциональна четвёртой степени температуры газа. Так, при прочих равных условиях, плотность излучения углекислоты пропорционально температуре в степени 3,5, а водяного пара – в степени 3.
Из уравнений (12) видно, что при достаточно большой длине луча $l_{эф}$ спектральные степени черноты и поглощательная способность газа в отдельных полосах поглощения могут достигнуть значения единицы, т.е. излучательные свойства слоя газа в этих полосах могут сравняться с излучательными свойствами абсолютно чёрного тела.
При невысоких давлениях поглощение лучистой энергии в газах подчиняется закону Бэра, согласно которому количество поглощённой лучистой энергии на длине луча пропорционально числу поглощающих частиц на этой длине. Вследствие этого коэффициент поглощения и соответственно степень черноты должны быть пропорциональны длине луча и парциальному давлению поглощающего (излучающего) газа. Поэтому сведения о степени черноты газов приводится в виде зависимостей

$\varepsilon_г = f(pl_{эф}, T)$, где p - парциальное давление газа, $l_{эф}$ - эффективная длина луча в газовом объёме.

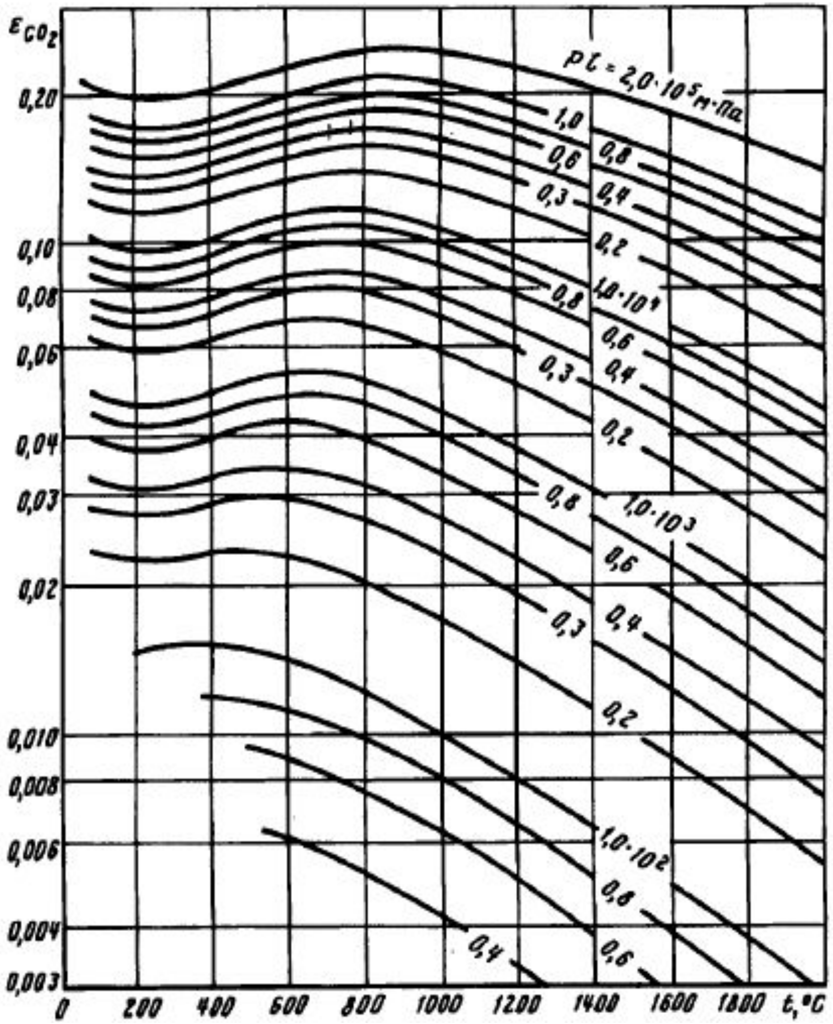


Рис. 6. Степень черноты углекислого газа

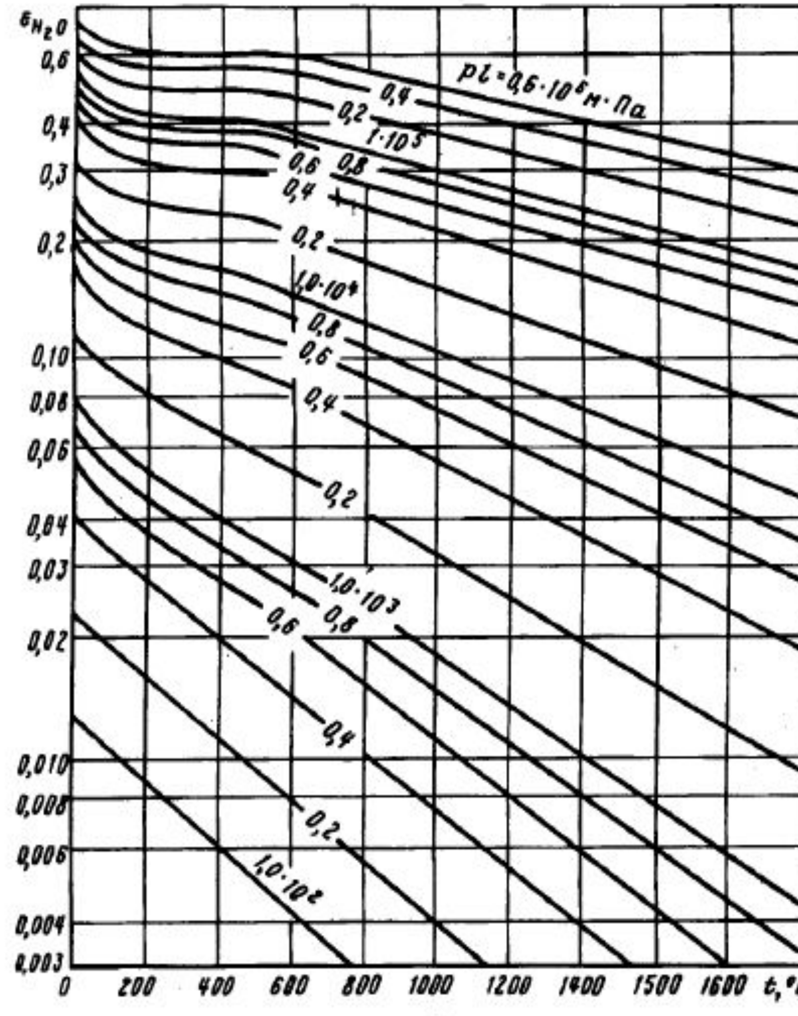


Рис. 7. Степень черноты водяного пара

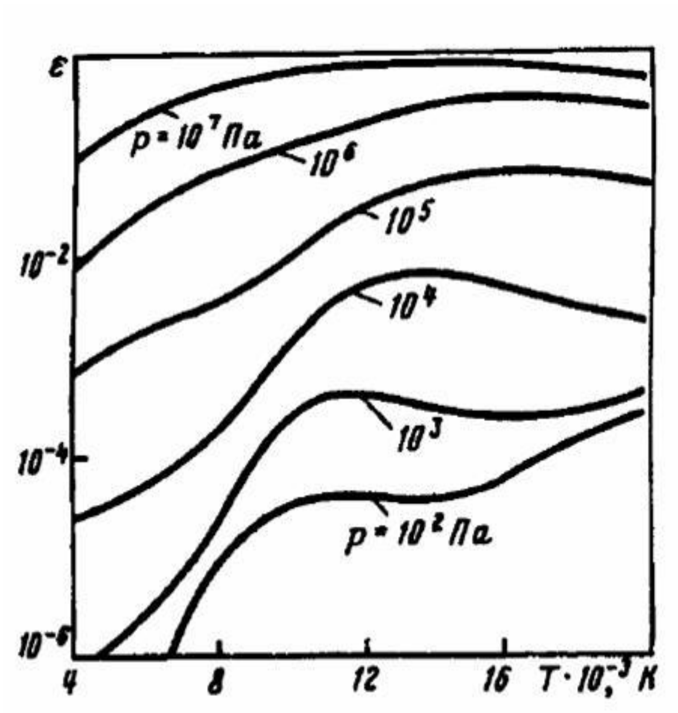


Рис. 8. Степень черноты слоя воздуха толщиной 10 см

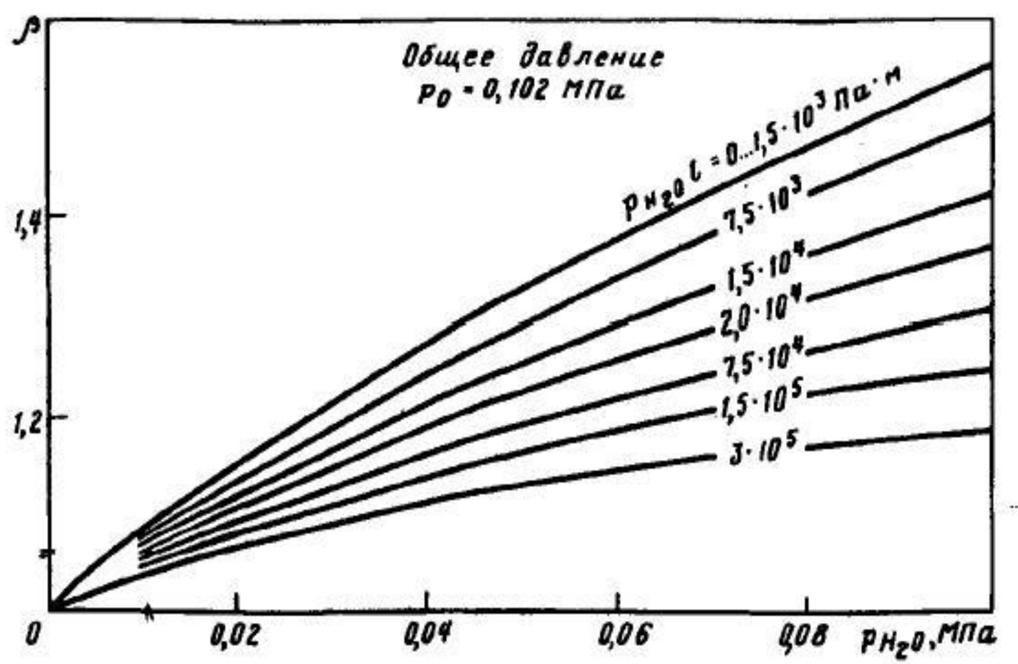


Рис. 9. Поправка на влияние давления на степень черноты водяного пара

Для расчета степени черноты продуктов сгорания, содержащих CO_2 и H_2O, используют выражение

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon \qquad (13)$$

Радиационный теплообмен между газом и оболочкой

Радиационный теплообмен между газом и окружающей газ оболочкой может быть представлен как результат многократных поглощений и отражений стенкой потока, излучаемого газом, и многократных поглощений и пропусканий газом потока, излучаемого стенкой. Если при этом температура стенки постоянна по всей поверхности, то лучистый тепловой поток может быть найден по формуле, полученной для расчета теплообмена между твердым телом и окружающей его оболочкой при малом зазоре между ними:

$$q = \frac{\varepsilon_г \varepsilon_{ст}}{\varepsilon_г + \varepsilon_{ст} - \varepsilon_г \varepsilon_{ст}} \sigma_0 \left(T_г^4 - T_{ст}^4\right)$$

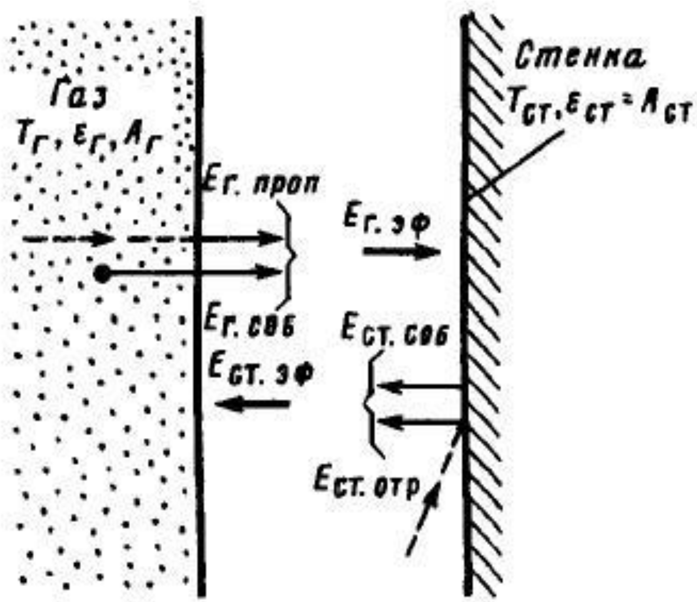


Рис. 10. Теплообмен между газом и оболочкой

$$q = E_{г.эф} - E_{ст.эф} \qquad (14)$$

$$E_{Г.эф} = E_{г.соб} - E_{ст.эф}(1 - A_г) \qquad (15)$$

$$E_{ст.эф} = E_{ст.соб} - E_{г.эф}(1 - A_{ст}) \qquad (16)$$

$$q = \frac{A_{ст} E_{г.соб} - A_г E_{ст.соб}}{1 - (1 - A_{ст})(1 - A_г)}$$

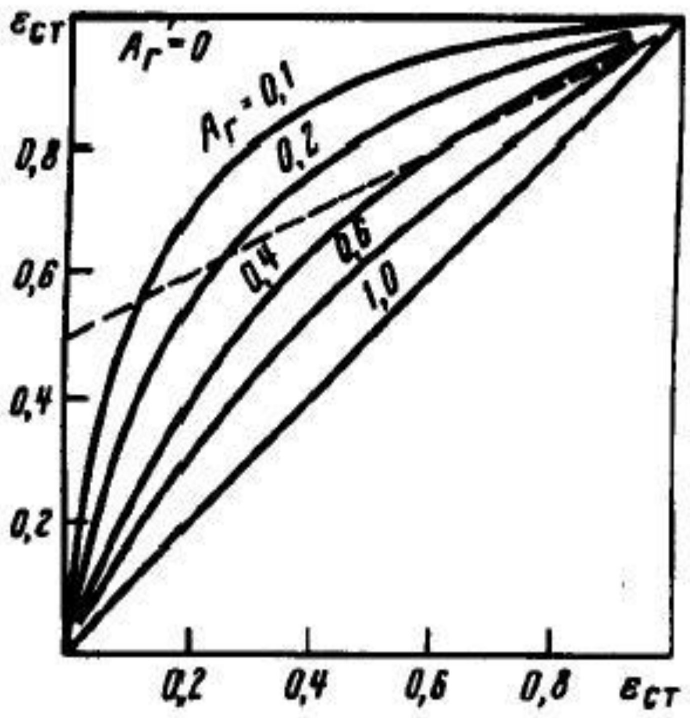


Рис. 11. Эффективная степень черноты стенки замкнутой полости:
Сплошная – расчет по формуле(17)
Пунктир – расчет по формуле(18)

$$q = \frac{\varepsilon_{cm}\varepsilon_{г}\sigma_0 T_{Г}^4 - A_{г}\varepsilon_{cm}\sigma_0 T_{cm}^4}{1-(1-\varepsilon_{cm})(1-A_{г})} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{cm}}{1-(1-\varepsilon_{cm})(1-A_{г})}\sigma_0\left(\varepsilon_{г}T_{г}^4 - A_{г}T_{cm}^4\right)$$

$$\varepsilon_{cm}^{'} = \frac{\varepsilon_{cm}}{1-(1-\varepsilon_{cm})(1-A_{Г})} \qquad (17)$$

Для практических расчетов часто принимают

$$\varepsilon_{cm}^{'} \approx \left(\varepsilon_{cm} + 1\right)/2 \qquad (18)$$

Контрольные вопросы

- Основные понятия и определения. Белое, зеркальное, серой тело.
- Основные законы лучистого теплообмена
- Различные случаи теплообмена излучением
- Радиационный теплообмен между произвольно расположенными элементами поверхностей нагрева
- Интегральные характеристики излучения и поглощения полупрозрачного объема
- Радиационный теплообмен в газах
- Радиационный теплообмен между газом и оболочкой
- Закон Стефана-Больцмана
- Закон Кирхгофа
- Закон Ламберта
- Закон Планка
- Закон Вина