

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

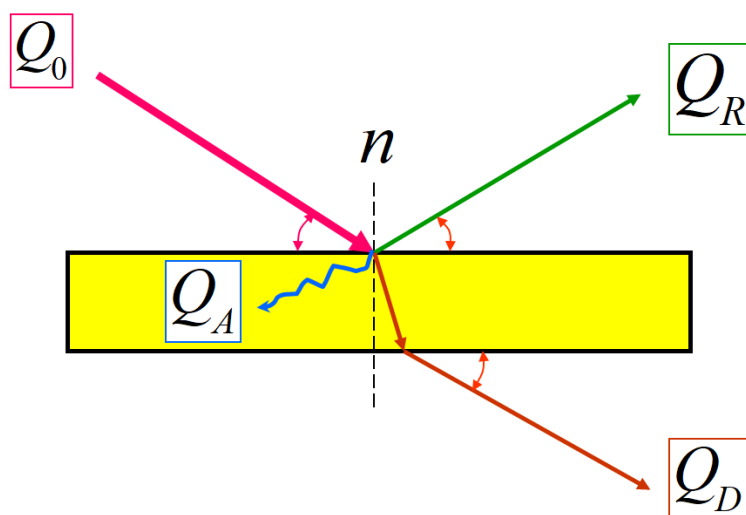
КАФЕДРА ФИЗИКИ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕПЛОМАССООБМЕН»**

для студентов специальностей:

1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»,

1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного
производства»



Брест, 2022 г.

УДК 536.331, 537.321, 530.145.3

Методические указания содержат типовые задачи с решениями и задачи для самостоятельного решения по разделу "Радиационный теплообмен" ("Теплообмен излучением") курса «Тепломассообмен». В методических указаниях приведены основные расчетные формулы, необходимые для решения задач.

Методические указания предназначены для студентов дневного и заочного факультетов, обучающихся по специальностям: 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства».

Материал может быть использован использовать на аудиторных занятиях по решению задач по данной тематике, а также при самостоятельной работе по выполнению типовых проектов студентами дневной и заочной форм получения высшего образования.

Составители: Пинчук Александр Александрович, к. ф.-м. н.,
доцент кафедры физики БрГТУ;
Борушко Вадим Васильевич, старший преподаватель
кафедры физики БрГТУ.

Рецензент: Кац Петр Борисович
Новосельцев Владимир Геннадьевич

Учреждение образования
© «Брестский государственный технический университет», 2022

Введение

В соответствии с государственным образовательным стандартом выпускники теплоэнергетических специальностей должны не только понимать физические основы работы теплоэнергетического оборудования, но и уметь применять теоретические знания при решении практических задач как при конструировании и наладке, так и при эксплуатации его.

Практические занятия по дисциплине «Тепломассообмен» позволяют студентам на конкретных примерах овладеть закономерностями основных процессов переноса теплоты и массы, усвоить результаты теоретических и экспериментальных исследований, проводить тепловые расчеты практических задач, связанных с теплообменом в элементах энергетических установок, использовать полученные знания и навыки на стадии курсового и дипломного проектирования, в профессиональной деятельности.

Задачи, представленные в практических работах, могут оказать помощь при выполнении фронтальных задач по дисциплине.

Теоретические сведения

В этом разделе даны основные формулы для решения задач по разделу «Радиационный теплообмен» курса ТМО.

Основные понятия радиационного теплообмена

Тепловое излучение (радиационный теплообмен) – способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в тепло. Радиационный теплообмен связан с двойным преобразованием энергии: первоначально внутренняя энергия тела превращается в энергию электромагнитного излучения, а затем, после переноса энергии в пространстве электромагнитными волнами, происходит второй переход лучистой энергии во внутреннюю энергию другого тела.

Тепловое излучение тела зависит от его температуры (степени нагретости тела).

Плотность потока собственного излучения $E_{\text{соб}}$, Вт/м², тела называют его *лучеиспускательной (излучательной) способностью*. Этот параметр излучения в пределах элементарного участка длин волн $d\lambda$ называют спектральной плотностью потока собственного излучения E_{λ} , Вт/м³, или спектральной лучеиспускательной способностью тела, или спектральной интенсивностью излучения.

Энергия теплового излучения, падающего на тело, по закону сохранения энергии может поглощаться, отражаться телом или проходить через него:

$$Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} = Q_{\text{пад}}. \quad (1)$$

Отношение поглощенной части энергии к падающей энергии теплового излучения называют *поглощательной способностью тела* и обозначают буквой A . Отношение отраженной части энергии к падающей энергии теплового излучения называют *отражательной способностью тела* и обозначают буквой R . Отношение прошедшей сквозь тело энергии к падающей энергии теплового излучения называют *пропускательной способностью тела* и обозначают буквой D . Таким образом, по закону сохранения энергии записывают:

$$A + R + D = 1. \quad (2)$$

Тело, поглощающее всю падающую на его поверхность лучистую энергию, называют абсолютно черным телом (АЧТ). Для АЧТ поглощательная способность $A = 1$.

Тело, отражающее всю падающую на его поверхность лучистую энергию, называют абсолютно белым телом (если отражение происходит в пределах полусферы) или зеркальным (если угол падающего луча равен углу отраженного луча). В этом случае отражательная способность $R = 1$.

Тело, пропускающее всю падающую на его поверхность лучистую энергию, называют прозрачным или диатермичным. В этом случае пропускательная способность $D = 1$.

Твердое тело не пропускает падающую на его поверхность энергию теплового излучения и поэтому

$$A + R = 1. \quad (3)$$

Сумму собственного излучения и части падающей энергии, которая отражается поверхностью тела, называют *эффективным излучением тела*:

$$E_{\text{эфф}} = E_{\text{соб}} + E_{\text{отр}}. \quad (4)$$

Результирующим тепловым потоком излучения называют разность между собственным излучением и частью падающей энергии, которую тело поглощает телом:

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{соб}} - E_{\text{погл}} = E_{\text{эфф}} - E_{\text{пад}}. \quad (5)$$

Основные законы излучения АЧТ

Закон Планка устанавливает зависимость спектральной интенсивности излучения АЧТ от длины волны и абсолютной температуры:

$$E_{\lambda 0} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (6)$$

где $c_1 = 3,740 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $c_2 = 1,4387 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Закон Вина устанавливает связь между длиной волны λ_{max} , соответствующей максимуму спектральной интенсивности излучения и абсолютной температурой АЧТ:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \quad (7)$$

Закон Стефана-Больцмана устанавливает связь между лучеиспускательной способностью АЧТ (плотностью потока собственного излучения) и его температурой:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{\lambda 0} \cdot d\lambda = \sigma_0 T^4 = c_0 \frac{T}{100}^4, \quad (8)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана; T – температура поверхности абсолютно черного тела, К; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Излучение серых тел

Абсолютно черных тел в природе не существует. Тело, у которого спектр излучения подобен спектру излучения абсолютно черного тела и спектральная плотность потока излучения (E_{λ}) составляет одну и ту же долю ε_{λ} от спектральной плотности потока излучения абсолютно черного тела ($E_{\lambda 0}$), называют *серым телом*:

$$\frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda 0}} = \varepsilon_{\lambda} = \text{const}, \quad (9)$$

где ε_{λ} – спектральная степень черноты.

После интегрирования выражения (9) по всему спектру излучения ($0 \leq \lambda \leq \infty$) получим:

$$\frac{E}{E_0} = \varepsilon, \text{ или } E = \varepsilon \cdot E_0, \quad (10)$$

где E – лучеиспускательная способность серого тела; E_0 – лучеиспускательная способность АЧТ; ε – интегральная степень черноты серого тела.

Закон Кирхгофа для интегрального излучения определяет, что отношение лучеиспускательной способности серого тела E к поглощательной способности серого тела A равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела, находящегося при той же температуре:

$$\frac{E}{A} = E_0, \text{ или } E = A \cdot E_0. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) следует, что для серых тел в условиях теплового равновесия:

$$\varepsilon = A. \quad (12)$$

Из формулы (10) с учетом закона Стефана – Больцмана получают выражение для расчета плотности потока собственного излучения (лучеиспускательной способности) серого тела:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \frac{T}{100}^4 = c \cdot \frac{T}{100}^4, \quad (13)$$

где c – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м²*К⁴):

$$c = \varepsilon \cdot c_0. \quad (14)$$

Значение коэффициента излучения лежит в пределах $c = 0 \div 5,67$ Вт/(м²*К⁴), а интегральная степень черноты изменяется от 0 до 1.

Теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой

Поток результирующего излучения в замкнутой системе, состоящей из двух серых поверхностей, разделенных лучепрозрачной (диатермичной) средой рассчитывают по формулам:

$$Q_{\omega,1} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot T_2^4 - T_1^4 \cdot \varphi_{21} \cdot F_2; \quad (15)$$

$$Q_{\omega,2} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot T_1^4 - T_2^4 \cdot \varphi_{12} \cdot F_1 \quad (16)$$

или

$$Q_{\omega,1} = c_{\text{пр}} \cdot \frac{T_2}{100}^4 - \frac{T_1}{100}^4 \cdot \varphi_{21} \cdot F_2; \quad (17)$$

$$Q_{\omega,2} = c_{\text{пр}} \cdot \frac{T_1}{100}^4 - \frac{T_2}{100}^4 \cdot \varphi_{12} \cdot F_1. \quad (18)$$

Для замкнутой системы из закона сохранения энергии следует очевидное равенство:

$$Q_{\omega,2} = Q_{\omega,1}. \quad (19)$$

В формулах (15) ÷ (19) $Q_{\omega,1}$, $Q_{\omega,2}$ – результирующие тепловые потоки излучением со второго тела на первое тело и с первого тела на второе тело соответственно, Вт; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты в системе 2-х серых тел; φ_{21} , φ_{12} – угловые коэффициенты излучения – показывают, какая доля лучистого теплового потока попадает со второго тела на первое тело и с первого тела

на второе тело соответственно; T_1, T_2 – абсолютные температуры первой и второй поверхностей, К; $c_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения в системе двух серых тел; F_1, F_2 – площади поверхностей первого и второго тела соответственно.

Приведенную степень черноты и приведенный коэффициент излучения в системе двух серых тел рассчитывают по формулам:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \varphi_{12} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \varphi_{21}}; \quad (20)$$

$$c_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0} \varphi_{12} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \varphi_{21}}, \quad (21)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты первого и второго тел; c_1, c_2 – коэффициенты излучения первого и второго тел:

$$c_1 = \varepsilon_1 \cdot c_0, c_2 = \varepsilon_2 \cdot c_0. \quad (22)$$

Угловые коэффициенты излучения можно найти, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости:

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1; \quad (23)$$

б) свойство взаимности:

$$\varphi_{ik} \cdot F_i = \varphi_{ki} \cdot F_k; \quad (24)$$

в) свойство невогнутости (для плоских и выпуклых поверхностей):

$$\varphi_{ii} = 0. \quad (25)$$

Частные случаи радиационного теплообмена в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой

Случай 1. Теплообмен излучением между двумя плоскими параллельными серыми поверхностями неограниченных размеров. В этом случае угловые коэффициенты $\varphi_{21} = \varphi_{12}$ и выражение (20) примет вид:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (26)$$

Случай 2. Теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, одно из которых невогнутое.

Если принять за невогнутое тело поверхность 1, то по свойству невогнутости (25) $\varphi_{11} = 0$ и тогда из свойства замкнутости (23) следует, что

$\varphi_{12} = 1$. Тогда по свойству взаимности (24) $\varphi_{21} = F_1/F_2$ и выражение (20) записывают в виде:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + (\frac{1}{\varepsilon_2} - 1) \frac{F_1}{F_2}}. \quad (27)$$

Случай 3. Теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел при условии, что площадь поверхности одного тела много меньше площади поверхности другого тела. Например, если $F_1 \ll F_2$, то

$$\varepsilon_{пр} = \varepsilon_1, c_{пр} = c_1. \quad (28)$$

И тогда в этом случае формула (16) для расчета результирующего теплового потока принимает вид

$$Q_{\omega,2} = \varepsilon_1 \cdot \sigma_0 \cdot T_1^4 - T_2^4 \cdot F_1 \quad (29)$$

или

$$Q_{\omega,2} = c_1 \cdot \frac{T_1}{100}^4 - \frac{T_2}{100}^4 \cdot F_1. \quad (30)$$

Лучистый теплообмен при наличии экранов

Плотность потока результирующего излучения в системе, состоящей из двух плоских параллельных серых поверхностей неограниченных размеров, между которыми расположено n экранов равна

$$q_{\omega,2}^{\partial} = \varepsilon_{\text{пр}}^{\partial n} \cdot \sigma_0 \cdot T_1^4 - T_2^4, \quad (31)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}^{\partial n}$ – приведенная степень черноты при наличии экранов

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\partial n} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}} + \sum_{i=1}^n \frac{2}{\varepsilon_{\partial i}} - 1^{-1} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}} + \sum_{i=1}^n \frac{2}{\varepsilon_{\partial i}} - n^{-1}, \quad (32)$$

где $\varepsilon_{\partial i}$ - степень черноты i -го экрана.

При условии, что экраны имеют одинаковую степень черноты выражение (32) принимает вид

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\partial n} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}} + n \cdot \frac{2}{\varepsilon_{\partial}} - 1^{-1}. \quad (33)$$

В формулах (32) и (33) приведенную степень черноты между двумя плоскими параллельными серыми поверхностями неограниченных размеров $\varepsilon_{\text{пр}}$ рассчитывают по формуле (26).

Излучение газов

В инженерных расчетах принимают допущение о том, что газ является серым телом, которое излучает и поглощает лучистую энергию оболочкой, в которой он находится. Тогда плотность потока собственного излучения газа при температуре газа T_{Γ} рассчитывают по формуле

$$E_{\Gamma} = \varepsilon_{\Gamma} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\Gamma}^4. \quad (34)$$

Степень черноты газа ε_{Γ} , состоящего из смеси излучающих и поглощающих газов, равна сумме степеней черноты этих газов:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{SO}_2} + \varepsilon_{\text{CO}}, \quad (35)$$

где $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ – степень черноты углекислого газа CO_2 ; $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ – степень черноты водяного пара H_2O ; $\varepsilon_{\text{SO}_2}$ – степень черноты двуокиси серы SO_2 ; ε_{CO} – степень черноты окиси углерода CO .

Степень черноты водяного пара находят по формуле

$$\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^*, \quad (36)$$

где $\varepsilon_{H_2O}^*$ – условная степень черноты водяного пара; β – поправочный коэффициент, который учитывает, что влияние давления водяного пара несколько выше, чем влияние эффективной длины луча.

Значения ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , ε_{SO_2} , ε_{CO} находят при помощи номограмм.

При сгорании энергетического топлива в продуктах сгорания содержатся в основном углекислый газ и водяной пар. Номограммы для ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , и β приведены в приложении.

При использовании номограмм необходимо знать парциальные давления газов, входящих в газовую смесь, и длину пути луча, которую рассчитывают по формуле

$$l = 3,6 \cdot \frac{V}{F}, \quad (37)$$

где V – объем оболочки, в которой находится газ; F – площадь поверхности этой оболочки.

Результирующий лучистый тепловой поток на поверхности оболочки с температурой T_w и степенью черноты ε_w , ограничивающей газовую среду с температурой T_r , равен

а) по формуле Нуссельта (при допущении $\varepsilon_r = A_r$)

$$Q_\omega = \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 \cdot T_r^4 - T_w^4 \cdot F_w, \quad (38)$$

где

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\varepsilon_r} - \frac{1}{\varepsilon_w} - 1^{-1}; \quad (39)$$

б) по формуле Поляка (с учетом неравенства $\varepsilon_r \neq A_r$)

$$Q_\omega = \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 \cdot \frac{\varepsilon_r}{A_r} * T_r^4 - T_w^4 \cdot F_w, \quad (40)$$

где

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{A_r} - \frac{1}{\varepsilon_w} - 1^{-1}; \quad (41)$$

$$A_r = A_{CO_2} + \beta \cdot A_{H_2O}^* + A_{SO_2} + A_{CO}. \quad (42)$$

Поглощательные способности газов находят по номограммам при температуре стенки T_w . Поглощательные способности A_{CO_2} , $A_{H_2O}^*$ можно найти по номограммам приложения.

Расчет лучисто-конвективной теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи излучением

В общем случае теплоотдача между твердой непроницаемой стенкой и текучей средой происходит за счет конвективного и радиационного теплообмена, тогда

$$Q_{\Sigma} = Q_k + Q_l, \quad (43)$$

где

$$Q_k = \alpha_k T_f - T_w \cdot F_w; \quad (44)$$

$$Q_l = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_f^4 - T_w^4 \cdot F_w. \quad (45)$$

В формулах (43) ÷ (45) Q_k – конвективный тепловой поток; Q_l – лучистый тепловой поток; α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи; T_f – температура текучей среды; T_w – температура поверхности стенки.

В инженерных расчетах теплообмена бывает удобно для расчета радиационного теплового потока использовать закон теплоотдачи Ньютона:

$$Q_l = \alpha_l T_f - T_w \cdot F_w, \quad (46)$$

где α_l – коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_l = \frac{Q_l}{T_f - T_w \cdot F_w}. \quad (47)$$

С учетом записи Q_l в виде формулы (46) суммарный тепловой поток теплоотдачи будет равен:

$$Q_{\Sigma} = Q_k + Q_l = \alpha_k + \alpha_l \cdot T_f - T_w \cdot F_w. \quad (48)$$

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН»

Задача 1

Чему равны степень черноты серого тела и значение энергетической светимости E при температуре $T = 800$ К, если $E_{\text{пад}} = 60$ кВт/м², $E_{\text{погл}} = 48$ кВт/м²?

Порядок решения. Поглощательная способность данного тела

$$a = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}};$$

$$a = \frac{48}{60} = 0,8.$$

Степень черноты: $\varepsilon = a$.

Энергетическая светимость: $E = \varepsilon \sigma T^4$, Вт/м².

$$E = 0,8 \cdot 5,6710^{-8} \cdot 800^4 = 1,86 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Задача 2

В космическом пространстве на околоземной орбите вращается сферическая частица метеорита. Найти температуру частицы, когда она находится на солнечной стороне Земли. Плотность потока излучения Солнца на площадке, расположенной перпендикулярно лучам вблизи Земли, но за пределами атмосферы, равна 1.367 кВт/м^2 . Принять, что частица является серым телом. Степень черноты: $\varepsilon = a$.

Порядок решения. При установившемся состоянии количество энергии излучения поглощенной частицей и количеством энергии, излучаемой частицей, равны

$$aE_{\text{над}}F_N = \varepsilon \sigma F T^4,$$

где F_N – проекция облучаемой поверхности частицы на плоскость, нормальную к падающему излучению; F – поверхность частицы.

Для шара диаметром d

$$\frac{F_N}{F} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\pi d^2} = \frac{1}{4}.$$

Тогда

$$T = \sqrt[4]{\frac{aE_{\text{над}}F_N}{\varepsilon \sigma F}}.$$
$$T = \sqrt[4]{\frac{1,367 \cdot 10^3}{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 4}} = 279 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

Задача 3

Рассчитать теплообмен излучением между двумя параллельно расположенными поверхностями с температурами $T_1 = 800 \text{ К}$ и $T_2 = 400 \text{ К}$. Коэффициент излучения первой поверхности $C_1 = 5.1$, второй – $C_2 = 4.2$, $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Потерю тепла боковыми поверхностями не учитывать.

Порядок решения. Удельный лучистый поток между параллельными поверхностями определяется по уравнению

$$q_{1,2} = C_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right];$$
$$q_{1-2} = 3,88 \left[\left(\frac{800}{100} \right)^4 - \left(\frac{400}{100} \right)^4 \right] = 1,49 * 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Приведенный коэффициент излучения C_{np} определяется по формуле

$$C_{np} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 - 1/C_0};$$
$$C_{np} = \frac{1}{\frac{1}{5,1} + \frac{1}{4,2} - \frac{1}{5,67}} = 3,88 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

Задача 4

Определить лучеиспускающую способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения $4.54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, если температура излучающей поверхности стенки $1000 \text{ }^\circ\text{С}$. Найти также степень черноты стенки и длину волны, соответствующую максимуму интенсивности излучения.

Порядок решения. Согласно закону Стефана-Больцмана, лучеиспускающая способность серого тела E , $\text{Вт}/\text{м}^2$, равна:

$$E = c \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4;$$
$$E = 4,54 \cdot \left(\frac{1273}{100} \right)^4 = 119,226 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Интегральная степень черноты стенки

$$\varepsilon = c/c_0 = 4,54/5,67 = 0,80.$$

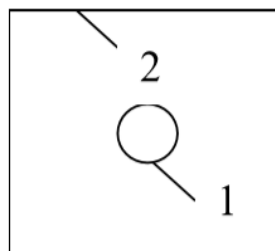
Из закона Вина находим длину волны, соответствующую максимуму спектральной интенсивности излучения, мкм,

$$\lambda_{\max} = 2898/T;$$
$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{1273} = 2,28 \text{ м}.$$

Задача 5

Определить приведенную степень черноты системы, состоящей из трубопровода с наружным диаметром $0,1 \text{ м}$, расположенного в центре кирпичного квадратного канала со стороной $0,5 \text{ м}$. Степень черноты трубы $0,72$, а степень черноты стенок канала $0,85$.

Порядок решения. Пусть тело 1 – трубопровод, а тело 2 – канал квадратного сечения.



Тогда по свойству невогнутости $\varphi_{1-1} = 0$. Используя свойство замкнутости для первого тела $\varphi_{1-1} + \varphi_{1-2} = 1$, получим $\varphi_{1-2} = 1$. Из свойства взаимности $\varphi_{1-2}F_1 = \varphi_{2-1}F_2$ следует, что

$$\varphi_{2-1} = \varphi_{1-2} \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{F_2}.$$

Таким образом, для расчета углового коэффициента φ_{1-2} необходимо найти площади поверхности теплообмена 1-го и 2-го тел: $F_1 = \pi dl$, $F_2 = 4al$. Тогда

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi dl}{4al} = \frac{\pi d}{4a};$$

$$\varphi_{2-1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{3,14 \cdot 0,1}{4 \cdot 0,5} = 0,157.$$

Приведенную степень черноты в системе двух серых тел находим по формуле

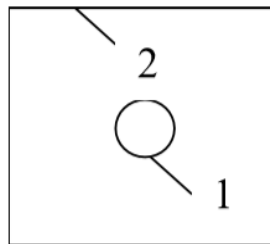
$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \varphi_{21}};$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,72} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,85} - 1\right) \cdot 0,157} = 0,71.$$

Задача 6

Стальная труба диаметром 100 мм находится в кирпичном канале размером 0.3×0.3 м. Температура поверхности трубы 150 °С, степень черноты наружной поверхности трубы 0.7. Температура внутренней поверхности кирпичной стенки 37 °С, степень черноты стенки 0,8. Определить потерю теплоты путем излучения одного погонного метра трубы. $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴).

Порядок решения. Пусть тело 1 – трубопровод, а тело 2 – канал квадратного сечения.



Приведенную степень черноты в системе двух серых тел находим по формуле

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \varphi_{21}},$$

где угловой коэффициент $\varphi_{1-2} = 1$,

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi dl}{4al} = \frac{\pi d}{4a},$$

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{3,14 \cdot 0,1}{4 \cdot 0,3} = 0,26,$$

(см. решение предыдущей задачи);

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,7} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 0,26} = 0,67.$$

Рассчитаем плотность результирующего теплового потока излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой (потеря теплоты путем излучения одного погонного метра трубы):

$$q_l = \frac{Q_{w,1}}{l} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} \pi d;$$

$$q_l = 0,67 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (23^4 - 310^4) \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 271 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Задача 7

Стенка трубопровода диаметром 400 мм нагрета до температуры 500 °С. Степень черноты трубы 0.75. Трубопровод помещен в канал сечением 600×800 мм, температура поверхности которого равна 100 °С. Коэффициент излучения канала 5.22 Вт/(м²·К²). Рассчитать приведенный коэффициент излучения и потери теплоты излучением с 1 м трубопровода.

Порядок решения. Приведенный коэффициент излучения рассчитываем по формуле

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{21}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_0 \cdot \varepsilon_1} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{21}},$$

в этой формуле $c_0 = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$, угловой коэффициент $\varphi_{12} = 1$. Согласно условию задачи $c_2 = 5.22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$.

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi d}{2(a+b)} = \frac{3,14 \cdot 0,4}{2(0,6 + 0,8)} = 0,45;$$

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{5,67} + \left(\frac{1}{5,67 \cdot 0,75} - \frac{1}{5,67} \right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{5,22} - \frac{1}{5,67} \right) \cdot 0,45} = 4,13.$$

$$q_l = \frac{Q_{w,2}}{l} = c_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} \pi d;$$

$$q_l = 4,13 \left[\left(\frac{773}{100} \right)^4 - \left(\frac{373}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,4 = 17,5 \cdot 10^3 \frac{Вт}{м}.$$

Задача 8

По оси трубы внутренним диаметром $d_2 = 16$ мм и длиной $l = 1$ м натянута проволока из нихрома диаметром $d_1 = 0,5$ мм. По проволоке пропускается электрический ток $I = 4,5$ А. Степень черноты проволоки $\varepsilon_1 = 0,75$, удельное электрическое сопротивление $\rho_{эл} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Степень черноты трубы $\varepsilon_2 = 0,8$, температура трубы $t_2 = 25$ °С. Найти температуру проволоки.

Порядок решения. Если проволока находится внутри трубы, то, используя свойства угловых коэффициентов, получаем

$$\varphi_{12} = 1, \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2},$$

где тело 1 – проволока, тело 2 – труба.

Таким образом,

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi d_1 l}{\pi d_2 l} = \frac{d_1}{d_2};$$

$$\varphi_{21} = \frac{0,0005}{0,016} = 0,03.$$

При прохождении электрического тока по проводнику выделяется теплота, которая отводится от провода излучением (при отсутствии конвекции). Запишем баланс энергии для проводника электрического тока:

$$I^2 \frac{\rho_{эл} l}{f} = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1,$$

где $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К), $f = \pi d^2 / 4$ – площадь поперечного сечения проволоки.

Тогда

$$I^2 \frac{\rho_{эл} l}{\pi d_1^2} = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \pi d_1 l.$$

Выражая из уравнения теплового баланса температуру проволоки, получаем:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{4I^2 \rho_{эл}}{\varepsilon \sigma_0 \pi^2 d_1^3} + T_2^4};$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \varphi_{21}};$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,75} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 0,03} = 0,75;$$

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 4,5^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,75 \cdot 3,14^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-4}}} + 298^4} = 1143 \text{ } ^\circ K.$$

Задача 9

Требуется рассчитать теплотери за счёт теплового излучения голой стальной трубой диаметром $d = 70$ мм. Труба проходит в помещении цеха. По трубе движется воздух-окислитель топлива. Температура поверхности трубы $t_1 = 27$ °С. Длина трубы – 13 п. м. Температура стенки составляет $t_2 = 227$ °С.

Порядок решения. Результирующий тепловой поток (теплотери) излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой, находим по формуле

$$Q = c_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} \pi dl, \text{ Вт/м}^2.$$

Приведенный коэффициент излучения рассчитываем по формуле

$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{21}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_0 \cdot \varepsilon_1} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right) \varphi_{21}},$$

в этой формуле $c_0 = 5.67$ Вт/(м²·К²), угловой коэффициент $\varphi_{12} = 1$, ε_1 – коэффициент черноты трубы.

Очевидно, что в данной системе горячей и холодной оболочек (труба и стены помещения цеха) $F_1 \ll F_2$. Тогда $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} \rightarrow 0$. Поэтому можно принять

$$c_{np} = \varepsilon_1 c_0.$$

Окончательно

$$Q = \varepsilon_1 c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \pi dl, \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q = 0,6 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{500}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,14 \cdot 0,07 \cdot 13 = 5,3 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Задача 10

Определить число экранов, которые необходимо поместить между двумя параллельными пластинами со степенью черноты 0,8, чтобы результирующий лучистый поток от одной поверхности к другой уменьшился в 105 раз. Принять, что температуры поверхностей после установки экранов не изменяются. Степень черноты экранов 0,05.

Порядок решения. При отсутствии экранов плотность теплового потока между двумя параллельными пластинами рассчитывают по формуле

$$q_{w,2} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4).$$

где приведенная степень черноты ε_{np} для двух параллельных пластин рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1};$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,67.$$

При наличии n экранов плотность радиационного теплового потока находят по формуле

$$q_{w,2}^{\varepsilon n} = \varepsilon_{np}^{\varepsilon n} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4),$$

где $\varepsilon_{np}^{\varepsilon n}$ – приведенная степень черноты для двух параллельных пластин с расположенными между ними экранами. При одинаковой степени черноты всех экранов используют в расчетах формулу

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[\frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left(\frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon}} - 1 \right) \right]^{-1}.$$

Находим отношение плотности радиационного теплового потока между двумя параллельными пластинами без экранов к плотности радиационного теплового потока между двумя параллельными пластинами при наличии экранов:

$$\frac{q_{w,2}}{q_{w,2}^{\varepsilon}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left(\frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon}} - 1 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_{np}}}.$$

Отсюда выражаем число экранов

$$n = \frac{\frac{q_{w,2}}{q_{w,2}^{\varepsilon}} - 1}{\varepsilon_{np} \left(\frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon}} - 1 \right)};$$

$$n = \frac{105 - 1}{0,67 \left(\frac{2}{0,05} - 1 \right)} = 4.$$

Задача 11

Стальной паропровод ($\varepsilon_1 = 0,8$) диаметром $d_1 = 300$ мм, температура наружной стенки которого $t_1 = 297^\circ\text{C}$, проложен в помещении. В целях уменьшения потерь теплоты паропровод закрыт двойным цилиндрическим кожухом (экраном). Первый кожух диаметром $d_2 = 320$ мм выполнен из тонких стальных листов ($\varepsilon_2 = 0,82$), второй кожух диаметром $d_3 = 340$ мм выполнен из тонких алюминиевых листов ($\varepsilon_3 = 0,055$).

Определить потерю теплоты на 1 пог.м оголенного и экранированного паропровода, а также температуру алюминиевого кожуха. Температура в помещении $t_4 = 25^\circ\text{C}$. Конвективным теплообменом пренебречь.

Как уменьшатся тепловые потери в результате установки экранов?

Порядок решения. Потеря теплоты оголенным паропроводом

$$Q = \varepsilon_{np} C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_4}{100} \right)^4 \right],$$

где приведенная степень черноты ε_{np}

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

коэффициент излучения абсолютно черного тела $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

При условии $F_1 \ll F_2$, $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1$.

$$F_1 = \pi d_1;$$

$$Q = 0,8 \cdot 5,314 \cdot 0,3 \left[\left(\frac{570}{100}\right)^4 - \left(\frac{298}{100}\right)^4 \right] = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

При плоских параллельных экранах эквивалентная степень черноты $\varepsilon_{экв}$

$$\varepsilon_{экв} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{1-2}} + \frac{1}{\varepsilon_{2-3}} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_{n-n+1}}},$$

где ε_{1-2} , ε_{2-3} и т. д. определяют по формуле для ε_{np} .

При экранировании цилиндрических труб

$$\varepsilon_{экв} = \frac{1}{\frac{F_1}{F_1 \cdot \varepsilon_{1-2}} + \frac{F_1}{F_2 \cdot \varepsilon_{2-3}} + \dots + \frac{F_1}{F_n \cdot \varepsilon_{n-n+1}}}.$$

Определим потерю теплоты при наличии двух экранов:

$$Q_1 = \varepsilon_{экв} C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right].$$

В этой формуле

$$\varepsilon_{экв} = \frac{1}{\frac{F_1}{F_1 \cdot \varepsilon_{1-2}} + \frac{F_1}{F_2 \cdot \varepsilon_{2-3}} + \frac{F_1}{F_3 \cdot \varepsilon_{3-4}}} = \frac{1}{d_1 \left(\frac{1}{d_1 \cdot \varepsilon_{1-2}} + \frac{1}{d_2 \cdot \varepsilon_{2-3}} + \frac{1}{d_3 \cdot \varepsilon_{3-4}} \right)},$$

где $\varepsilon_{3-4} = \varepsilon_3$, и

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \frac{\pi d_1}{\pi d_2}}; \quad \varepsilon_{2-3} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_3} - 1\right) \frac{\pi d_2}{\pi d_3}};$$

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \left(\frac{1}{0,82} - 1\right) \cdot \frac{0,3}{0,32}} = 0,69;$$

$$\varepsilon_{2-3} = \frac{1}{\frac{1}{0,82} + \left(\frac{1}{0,055} - 1\right) \cdot \frac{0,32}{0,34}} = 0,058;$$

$$\varepsilon_{\text{экв}} = \frac{1}{0,3 \cdot \left(\frac{1}{0,3 \cdot 0,69} + \frac{1}{0,32 \cdot 0,058} + \frac{1}{0,34 \cdot 0,055}\right)} = 0,0089;$$

$$Q_1 = 0,0089 \cdot 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot \left[\left(\frac{570}{100}\right)^4 - \left(\frac{298}{100}\right)^4 \right] = 46,7 \text{ Вт}.$$

Поскольку численное значение потери теплоты (теплового потока) нами уже найдено, температуру алюминиевого листа t_3 найдём из соотношения

$$Q_1 = \varepsilon_{\text{нп1}} C_0 F_3 \left[\left(\frac{T_3}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right],$$

где

$$F_3 = 3,14 \cdot 0,34 = 0,992 \text{ Вт},$$

$$\varepsilon_{\text{нп1}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right) \cdot \frac{F_1}{F_2}}.$$

При $F_1 \ll F_2$, $\varepsilon_{\text{нп1}} = \varepsilon_3$,

$$T_3 = 100 \cdot \left[\frac{Q_1}{\varepsilon_{\text{нп}} C_0 F_3} + \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right]^{\frac{1}{4}};$$

$$T_3 = 100 \cdot \left[\frac{46,7}{0,055 \cdot 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,34} + \left(\frac{298}{100}\right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} = 384 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

Задача 12

Камера, имеющая форму параллелепипеда со сторонами 1 м, 2 м и 3 м, заполнена продуктами сгорания CO_2 и H_2O . Температура газов $T = 1500 \text{ К}$.

Полное давление смеси 0.101 МПа, а парциальные давления $p_{CO_2}=10$ кПа, $p_{H_2O}=20$ кПа. Найти плотность потока собственного излучения данной среды на стенке камеры.

Порядок решения. Средний пробег луча (фотона) вычисляется по формуле:

$$l_{эф.д} = 0.9 \frac{4V}{F},$$

где V – излучающий объем газа; F – площадь поверхности его оболочки.

$$V = a \cdot b \cdot c = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6 \text{ м}^3,$$

$$F = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot a \cdot c + 2 \cdot b \cdot c = 2 \cdot (1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 2 \cdot 3) = 22 \text{ м}^2;$$

$$l_{эф.д} = 0.9 \frac{4 \cdot 6}{22} = 0,98 \text{ м}.$$

Далее предварительно находим величины $p_{H_2O} l_{эф.д}$ и $p_{CO_2} l_{эф.д}$. По этим найденным значениям и температуре газа с помощью **номограмм** находят коэффициент черноты газов ε'_{H_2O} и ε_{CO_2} :

$$p_{H_2O} l_{эф.д} = 20 \cdot 10^3 \cdot 0,98 = 19,6 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{м};$$

$$p_{CO_2} l_{эф.д} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,98 = 9,8 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{м};$$

Тогда $\varepsilon'_{H_2O} = 0,125$, $\varepsilon_{CO_2} = 0,068$.

Для водяного пара влияние в смеси CO_2 и H_2O несколько сильнее, поэтому значение коэффициента черноты ε_{H_2O} необходимо умножать на поправочный коэффициент β_{H_2O} :

$$\varepsilon_{H_2O} = \varepsilon'_{H_2O} \beta_{H_2O}.$$

Поправочный коэффициент β_{H_2O} находится из номограммы 2:

$$\frac{p_{H_2O}}{p_0} = \frac{20 \cdot 10^3}{0,981 \cdot 10^5} = 0,2,$$

тогда $\beta_{H_2O} = 1,1$.

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,125 \cdot 1,1 = 0,1375.$$

В продуктах сгорания топлива углекислый газ и водяной пар находятся обычно в смеси друг с другом. Из-за частичного перекрыwania полос излучения-поглощения этих газов коэффициент теплового излучения смеси газов, строго говоря, меньше суммы коэффициента излучения чистых газов

$$\varepsilon = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon,$$

где $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{CO_2} \varepsilon_{H_2O}$ – поправка, которая зависит от температуры в смеси, концентрации компонентов, давления, средней длины луча.

$$\varepsilon = 0,068 + 0,125 - 0,068 \cdot 0,125 = 0,1845.$$

По найденному значению коэффициента черноты рассчитывается собственное излучение газового объема по формуле

$$E = \varepsilon \sigma_0 T_{\Gamma}^4,$$

где T_{Γ} – температура газа.

$$E = 0,1845 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1500^4 = 53 \cdot 10^3 \frac{Вт}{м^2}.$$

Задача 13

Газообразные продукты сгорания ($p = 0.101$ МПа) омывают поверхность труб конвективного пароперегревателя парового котла. Объемная доля H_2O $r_{H_2O} = 0.11$, объемная доля $r_{CO_2} = 0.13$, температура продуктов сгорания $t_{\Gamma} = 950^{\circ} C$, температура труб $t_c = 500^{\circ} C$. Трубы расположены в шахматном порядке; их диаметр $d = 38$ мм, продольный и поперечный шаги равны $s_1/d = s_2/d = 2$. Степень черноты труб $\varepsilon_c = 0.8$. Найти плотность потока результирующего излучения на стенках труб и коэффициент теплоотдачи излучением.

Порядок решения. Эффективная длина в межтрубном пространстве, в котором трубы с диаметром d располагаются с шагами s_1 и s_2

$$l_{эфф} = 1.08d \left(\frac{s_1 s_2}{d^2} - 0.785 \right);$$

$$l_{эфф} = 1,08 \cdot 38 \cdot 10^{-3} \left(4 - 0,785 \right) = 0,13 \text{ м}.$$

Парциальные давления водяного пара и углекислого газа находятся из соотношений

$$p_{H_2O} = p \cdot r_{H_2O} \text{ и } p_{CO_2} = p \cdot r_{CO_2},$$

где p – давление газовой смеси, r_{H_2O} и r_{CO_2} – объемные доли водяного пара и углекислого газа соответственно.

$$p_{H_2O} = 0,101 \cdot 10^6 \cdot 0,11 = 1,111 \cdot 10^4 \text{ Па},$$

$$p_{CO_2} = 0,101 \cdot 10^6 \cdot 0,13 = 1,313 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Далее предварительно находим величины $p_{H_2O} l_{эфф}$ и $p_{CO_2} l_{эфф}$. С помощью номограмм (см. порядок решения предыдущей задачи) находим степень черноты по температуре газа

$$\varepsilon = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon;$$

$$p_{H_2O} l_{эфф} = 1,111 \cdot 10^4 \cdot 0,13 = 1,44 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{м};$$

$$p_{CO_2} l_{эфф} = 1,313 \cdot 10^4 \cdot 0,13 = 1,71 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{м}.$$

Тогда $\varepsilon'_{H_2O} = 0,014$, $\varepsilon_{CO_2} = 0,05$.

Для водяного пара влияние в смеси CO_2 и H_2O несколько сильнее, поэтому значение коэффициента черноты ε_{H_2O} необходимо умножать на поправочный коэффициент β_{H_2O} :

$$\varepsilon_{H_2O} = \varepsilon'_{H_2O} \beta_{H_2O}.$$

Поправочный коэффициент β_{H_2O} находится из номограммы 2:

$$\frac{p_{H_2O}}{p_0} = \frac{1,111 \cdot 10^4}{0,981 \cdot 10^5} = 0,11,$$

тогда $\beta_{H_2O} = 1,08$.

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,014 \cdot 1,08 = 0,015.$$

$$\varepsilon = 0,05 + 0,015 - 0,015 \cdot 0,05 = 0,064.$$

Затем рассчитываем коэффициент поглощения объема A газа. Для этого предварительно рассчитываем величины

$$p_{H_2O}^* l_{эфф} = p_{H_2O} \frac{T_C}{T_\Gamma} l_{эфф};$$

$$p_{CO_2}^* l_{эфф} = p_{CO_2} \frac{T_C}{T_\Gamma} l_{эфф};$$

$$p_{H_2O}^* l_{эфф} = 1,111 \cdot 10^4 \frac{773}{1223} \cdot 0,13 = 912,9 \text{ Па} \cdot \text{м};$$

$$p_{CO_2}^* l_{эфф} = 1,313 \cdot 10^4 \frac{773}{1223} \cdot 0,13 = 1079 \text{ Па} \cdot \text{м}.$$

По полученным значениям $p_{H_2O}^* l_{эфф}$, $p_{CO_2}^* l_{эфф}$ и температуре стенки T_c с помощью номограмм находят ε_{CO_2} , ε'_{H_2O} , β_{H_2O} а затем ε_{H_2O} .

Тогда $\varepsilon'_{H_2O} = 0,036$, $\varepsilon_{CO_2} = 0,19$.

Для водяного пара влияние в смеси CO_2 и H_2O несколько сильнее, поэтому значение коэффициента черноты ε_{H_2O} необходимо умножить на поправочный коэффициент β_{H_2O} :

$$\varepsilon_{H_2O} = \varepsilon'_{H_2O} \beta_{H_2O}.$$

Поправочный коэффициент β_{H_2O} находится из номограммы 2:

$$\frac{p_{H_2O}^*}{p_0} = \frac{p_{H_2O} \cdot T_c}{T_\Gamma \cdot p_0} = \frac{1,313 \cdot 10^4 \cdot 773}{1223 \cdot 0,981 \cdot 10^5} = 0,085,$$

тогда $\beta_{H_2O} = 1,06$;

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,036 \cdot 1,06 = 0,038.$$

Поглощательная способность газов CO_2 и H_2O :

$$A_{CO_2}(T_\Gamma, T_c) = \left(\frac{T_\Gamma}{T_c} \right)^{0,65} \varepsilon_{CO_2} p_{CO_2}^* l_{эфф}, T_c ;$$

$$A_{H_2O}(T_\Gamma, T_c) = \left(\frac{T_\Gamma}{T_c} \right)^{0,45} \varepsilon_{H_2O} p_{H_2O}^* l_{эфф}, T_c .$$

$$A_{CO_2}(T_\Gamma, T_c) = \left(\frac{1223}{773} \right)^{0,65} \cdot 0,19 = 0,26 ,$$

$$A_{H_2O}(T_\Gamma, T_c) = \left(\frac{1223}{773} \right)^{0,45} \cdot 0,038 = 0,047 .$$

Поглощательная способность продуктов сгорания

$$A_G = A_{CO_2+H_2O} = A_{CO_2} + A_{H_2O} - A_{CO_2} \cdot A_{H_2O} \\ A_G = 0,26 + 0,047 - 0,26 \cdot 0,047 = 0,29.$$

Результирующий поток излучения на стенках оболочки

$$Q_{рез.с} = \frac{\varepsilon_c + 1}{2} \sigma_0 F \left[\varepsilon_G \overline{T}_G^4 - A \varepsilon_{G,T_C} \overline{T}_C^4 \right],$$

где $F = \pi * d = 3,14 \cdot 0,038 = 0,119 \text{ м}$.

$$Q_{рез.с} = \frac{0,8+1}{2} 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,119 \left[0,064 \cdot 1223^4 - 0,29 \cdot 773^4 \right] = 240 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{изл} = \frac{q_{изл}}{T_G - T_C},$$

где

$$q_{изл} = \frac{Q_{рез.с}}{F}.$$

$$q_{изл} = \frac{240}{0,019} = 2014 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$\alpha_{изл} = \frac{2014}{1223 - 773} = 4,47 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Найдите температуру, при которой плотность потока собственного излучения абсолютно черного тела равна 1 кВт/м^2 .

Ответ: $91 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Определить расход электроэнергии, необходимой для поддержания температуры 2800 К , металлической нити, находящейся в вакууме, со следующими характеристиками: $d = 0,2 \text{ мм}$, $l = 200 \text{ мм}$, $\varepsilon = 1$. Падающим на нить лучистым потоком пренебречь.

Ответ: $438,0 \text{ Вт}$.

3. Определить лучеиспускательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения $4,54 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$, если температура излучающей поверхности стенки $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти также степень черноты стенки и длину волны, соответствующую максимуму интенсивности излучения.

Ответ: $2,28 \text{ мкм}$.

4. Определить плотность результирующего потока излучением в системе двух плоских параллельных поверхностей, если известно, что $T_1 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varepsilon_1 = 0,8$; $T_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varepsilon_2 = 0,4$.

Ответ: 15353 Вт/м^2 .

5. Определить приведенную степень черноты системы, состоящей из трубопровода с наружным диаметром $0,1 \text{ м}$, расположенного в центре кирпичного квадратного канала со стороной $0,5 \text{ м}$. Степень черноты трубы $0,72$, а степень черноты стенок канала $0,85$.

Ответ: $0,706$.

6. Определить приведенный коэффициент излучения системы «труба в трубе», если наружный диаметр внутренней трубы $d_1 = 50 \text{ мм}$ с коэффициентом излучения $4,2 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$, а внутренний диаметр наружной трубы $d_2 = 250 \text{ мм}$ и её коэффициент излучения равен $5 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$.

Ответ: $4,1 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$.

7. Стальная труба диаметром 100 мм находится в кирпичном канале размером $0,3 \times 0,3 \text{ м}$. Температура поверхности трубы $150 \text{ }^\circ\text{C}$, степень черноты наружной поверхности трубы $0,7$. Температура внутренней поверхности кирпичной стенки $37 \text{ }^\circ\text{C}$, степень черноты стенки $0,8$. Определить потерю теплоты путем излучения одного погонного метра трубы.

Ответ: $271,5 \text{ Вт/м}$.

8. Изолированный и окрашенный масляной краской рассольный трубопровод диаметром 100 мм , длиной 8 м проложен в кожухе сечением $200 \times 200 \text{ мм}$, внутренняя поверхность которого покрыта алюминиевым лаком, а температура кожуха равна $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти потерю холода, вызванную радиацией, если температура на поверхности трубопровода равна $7 \text{ }^\circ\text{C}$, степень черноты масляной краски $0,9$; степень черноты алюминиевого лака $0,39$.

Ответ: $-161,5 \text{ Вт}$.

9. Стенка трубопровода диаметром 400 мм нагрета до температуры $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Степень черноты трубы $0,75$. Трубопровод помещен в канал сечением $600 \times 800 \text{ мм}$, температура поверхности которого равна $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент излучения канала $5,22 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^2)$. Рассчитать приведенный коэффициент излучения и потери теплоты излучением с 1 м трубопровода.

Ответ: $17538,2 \text{ Вт/м}$.

10. По оси трубы внутренним диаметром 16 мм и длиной 1 м натянута проволока из нихрома диаметром $0,5 \text{ мм}$. По проволоке пропускается электрический ток $4,5 \text{ А}$. Степень черноты проволоки $0,75$, удельное электрическое сопротивление $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Степень черноты трубы $0,8$, температура трубы $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти температуру проволоки.

Ответ: $872 \text{ }^\circ\text{C}$.

11. В помещении установлен цилиндрический стальной подогреватель без изоляции. Поверхность подогревателя сильно окисленная со степенью черноты 0,92, температура наружной поверхности 177 °С, длина подогревателя 2 м, диаметр 1 м. Температура помещения 27 °С, степень черноты его стен 0,62, длина помещения 10 м, ширина 8 м и высота 4 м. Определить результирующий тепловой поток излучением, поступающий на стены помещения.

Ответ: 10,5 кВт.

12. Определить тепловой поток излучением с 1 м² поверхности в окружающую среду с температурой 15 °С, если температура излучающей поверхности 150 °С, а степень черноты ее 0,75.

Ответ: 1068,9 Вт/м².

13. В помещении большого объема находится стальная неизолированная труба, по которой протекает горячая вода. Наружный диаметр трубы 150 мм. Температура наружной стенки трубы 170 °С. Температура стен помещения 20 °С. Коэффициент излучения стальной поверхности трубы 4,5 Вт/(м²К⁴). Определить потерю теплоты излучением с 1 погонного метра трубы.

Ответ: 660,4 Вт/м.

14. Изолированный и окрашенный масляной краской рассольный трубопровод диаметром 100 мм, длиной 8 м проложен в помещении, температура которого равна 27 °С. Найти потерю холода, вызванную радиацией, если температура на поверхности трубопровода равна 7 °С. Принять степень черноты масляной краски, равной 0,95.

Ответ: -264,5 Вт.

15. Определить потерю теплоты в час поверхностью паропровода ($c = 2,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$) за счет лучеиспускания, проложенного внутри цехового помещения с температурой стен 25 °С. Наружный диаметр паропровода 150 мм, длина 200 м. По паропроводу течет насыщенный водяной пар с давлением 10⁶ Па, температура наружной поверхности трубы на 20 °С ниже температуры насыщения.

Ответ: 240,5 МДж.

16. Определить температуру поверхности электрического провода, на прогрев которого затрачивается 0,3 кВт. Диаметр провода 0,5 мм, длина провода 300 мм, степень черноты провода 0,9, а температура ограждений 20 °С. Тепло отводится от провода излучением.

Ответ: 1607 °С.

17. По нихромовой проволоке диаметром 1 мм проходит электрический ток силой 8 А, а выделяющаяся теплота отводится излучением. Удельное сопротивление проволоки $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Температура окружающей среды равна 10 °С. Рассчитать температуру проволоки. Степень черноты нихромовой проволоки принять равной 0,8.

Ответ: 620 °С.

18. Непрозрачный шар имеет диаметр 100 мм и степень черноты поверхности 0,9. В шаре действует внутренний источник тепла мощностью $q_v = 320 \text{ кВт/м}^3$. Выделенное тепло излучением отводится в окружающую среду с температурой 27 °С. Определить температуру поверхности шара.

Ответ: 740 °С.

19. Определить плотность теплового потока излучением между двумя параллельными поверхностями, одна из которых выполнена из шамотного кирпича со степенью черноты 0,8, а вторая из красного кирпича со степенью черноты 0,92. Температура поверхности шамотного кирпича 150 °С, а поверхности красного кирпича 50 °С. Между кирпичными поверхностями помещен плоский экран из алюминия со степенью черноты 0,13.

Ответ: 76,2 Вт/м².

20. Между двумя стальными листами с шероховатой поверхностью расположен экран из окисленного никеля. Температуры листов соответственно равны 420 и 120 °С. Найти плотность теплового потока излучением. Рассчитать плотность теплового потока излучением, если экран будет сделан из хрома.

Ответ: 1732,9 Вт/м²; 874,9 Вт/м².

21. Обмуровка топочной камеры парового котла выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка – из листовой стали. Расстояние между обшивкой и кирпичной кладкой можно считать малым по сравнению с размерами стен топки. Рассчитать потери теплоты с 1 м² поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности обмуровки 120°С, а температура стальной обшивки 45°С. Степень черноты шамота 0,75 и листовой стали 0,55. Как изменятся тепловые потери в окружающую среду, если между обмуровкой и обшивкой топочной камеры поместить стальной экран со степенью черноты 0,55?

Ответ: потери уменьшились в 2,2 раза.

22. Во сколько раз уменьшится плотность потока теплового излучения, если между двумя параллельными пластинами со степенью черноты 0,83 установлен один экран со степенью черноты 0,2?

Ответ: уменьшится в 7,38 раз.

23. Определить число экранов, которые необходимо поместить между двумя параллельными пластинами со степенью черноты 0,8, чтобы результирующий лучистый поток от одной поверхности к другой уменьшился в 105 раз. Принять, что температуры поверхностей после установки экранов не изменяются. Степень черноты экранов 0,05.

Ответ: 4 экрана.

24. Определить плотность потока собственного излучения газов, находящихся в нагревательной печи при температуре 900 °С, если в состав газов по объему входит 10 % углекислого газа и 5 % водяного пара. При этом полное давление газов составляет 0,1 МПа. Эффективная длина пути луча 1,5 м.

Ответ: 339844,9 Вт/м².

25. Через газоход прямоугольного сечения $0,3 \times 0,4$ м проходят продукты сгорания, содержащие по объему 10 % водяного пара и 15 % двуокиси углерода. Общее давление газовой смеси 0,1 МПа. Температура продуктов сгорания 500°C . Температура стенок газохода 100°C . Степень черноты стенок газохода 0,85. Определить плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенке газохода.

Ответ: $3120,9 \text{ Вт/м}^2$.

26. Определить плотность потока собственного излучения газов, находящихся в нагревательной печи при температуре 900°C , если в состав газов по объему входит 10 % углекислого газа и 5 % водяного пара. При этом полное давление газов составляет 0,1 МПа. Эффективная длина пути луча 1,5 м.

Ответ: $339844,9 \text{ Вт/м}^2$.

27. Через газоход прямоугольного сечения $0,3 \times 0,4$ м проходят продукты сгорания, содержащие по объему 10 % водяного пара и 15 % двуокиси углерода. Общее давление газовой смеси 0,1 МПа. Температура продуктов сгорания 500°C . Температура стенок газохода 100°C . Степень черноты стенок газохода 0,85. Определить плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенке газохода.

Ответ: $3120,9 \text{ Вт/м}^2$.

Контрольная задача 1. Теплообмен излучением: труба в помещении

Определить потерю теплоты одним погонным метром стального паропровода с наружным диаметром 100 мм в результате лучистого теплообмена. Паропровод расположен в кирпичном канале, имеющем поперечное сечение 300×300 мм. Температуру наружной поверхности паропровода t_1 и внутренней поверхности стенок канала t_2 . Степень черноты окисленной стали и красного кирпича найти из справочных данных.

Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности паропровода к воздуху и величину теплового потока на расчетном участке.

В конце задачи следует ответить письменно на следующие вопросы:

1. Что называется степенью черноты тела?
2. Чему равен коэффициент излучения абсолютно черного тела?
3. Как определяется коэффициент излучения серого тела?

Таблица 1 – Выбор варианта к контрольной задаче 1

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура поверхности паропровода $t_1, ^\circ\text{C}$	200	250	270	300	220	350	400	370	320	380
Температура поверхности стенок канала $t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	20	25	30	35	40	22	27	32	37	42

Контрольная задача 2. Теплообмен излучением: экраны

Определить удельный тепловой поток и коэффициент теплоотдачи излучения между двумя параллельно расположенными пластинами с температурой t_1 и t_2 и степенью черноты ε_1 и ε_2 .

Как изменится удельный тепловой поток, если между пластинами установить экран со степенью черноты ε_3 .

Таблица 2 – Выбор варианта к контрольной задаче 2

Параметры	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Последняя цифра шифра										
ε_1	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,7	0,65	0,75	0,8	0,65
ε_2	0,6	0,65	0,7	0,75	0,6	0,5	0,85	0,65	0,7	0,5
ε_3	0,04	0,06	0,07	0,08	0,1	0,08	0,05	0,06	0,07	0,1
Предпоследняя цифра шифра										
$t_1, ^\circ\text{C}$	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$t_2, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	50	40	30	70	50

Приложения

Таблица 1– Коэффициенты излучения (степени черноты) ε , в зависимости от материала поверхности

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	ε
Алюминий: Полированный Шероховатый Окисленный при 600 °С	225–575 26 200–600	0,039–0,057 0,055 0,11–0,19
Вольфрам полированный	40–540	0,04–0,08
Вольфрамовая нить	540–1100 2800	0,11–0,16 0,39
Железо: Электролитное, тщательно полированное Сварочное, тщательно полированное Полированное Свежеобработанное наждаком Окисленное Окисленное гладкое Литое необработанное	175–225 40–250 425–1020 20 100 125–525 925–1115	0,052–0,064 0,28 0,144–0,377 0,242 0,736 0,78–0,82 0,87–0,95
Стальное литье полированное	770–1040	0,52–0,56
Сталь: Листовая шлифованная Окисленная при 600 °С Листовая с плотным блестящим слоем оксида	940–1100 200–600 25	0,55–0,60 0,80 0,82

Продолжение таблицы

Чугун:		
Полированный	200	0,21
Обточенный	830–990	0,60–0,70
Окисленный при 600 °С	200–600	0,64–0,78
Шероховатый, сильно окисленный	40–250	0,96
Оксид железа	500–1200	0,85–0,95
Золото, тщательно полированное	225–635	0,018–0,035
Латунная пластина:		
Прокатная, с естественной поверхностью	22	0,06
Прокатная и обработанная грубым наждаком	22	0,20
Тусклая	50–350	0,22
Латунь, окисленная при 600 °С	200–600	0,61–0,59
Медь:		
Тщательно полированная, электролитная	80–115	0,018–0,023
Торговая, шабренная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
Окисленная при 600 °С	200–600	0,57–0,87
Расплавленная	1075–1275	0,16–0,13
Оксид меди	800–1100	0,66–0,54
Молибден полированный	40–260 540–1100	0,06–0,08 0,11–0,18
Молибденовая нить	725–2600	0,096–0,292
Никель:		
Технический чистый полированный	225–375	0,07–0,087
Окисленный при 600 °С	200–600	0,37–0,48
Никелированное травленое железо, неполированное	20	0,11
Никелевая проволока	185–1000	0,096–0,186
Оксид никеля	650–1255	0,59–0,86
Хромоникель	125–1034	0,64–0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	25	0,043–0,064
Платина:		
Полированная пластина	225–625 925–1115	0,054–0,104 0,12–0,17
Лента	25–1230	0,036–0,192
Нить Проволока	225–1375	0,073–0,182
Ртуть очень чистая	0–100	0,092–0,12
Свинец:		
Серый окисленный	25	0,281
Окисленный при 200 °С	200	0,63
Серебро полированное чистое	225–625	0,0198– 0,0324
Хром	100–1000	0,08–0,26
Цинк (99,1%):		
Полированный	225–325	0,045–0,053
Окисленный при 400 °С	400	0,11
Оцинкованное листовое железо:		
Блестящее	28	0,228
Серое окисленное	24	0,276

Продолжение таблицы

Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40–370	0,93–0,945
Бумага тонкая, наклеенная на металлическую пластину	19	0,924
Вода	0–100	0,95–0,963
Гипс	20	0,903
Дуб строганный	20	0,895
Кварц плавленный шероховатый	20	0,932
Кирпич:		
Красный шероховатый, но без больших неровностей	20	0,93
Динасовый неглазурованный, шероховатый	100	0,80
Динасовый глазурованный, шероховатый	1100	0,85
Шамотный глазурованный	1100	0,75
Огнеупорный	–	0,8–0,9
Лак:		
Белый эмалевый, на железной шероховатой пластине	23	0,906
Черный блестящий, распыленный на железной пластине	25	0,875
Черный матовый	40–95	0,96–0,98
Белый	40–95	0,80–0,95
Шеллак:		
Черный блестящий, на луженом железе	21	0,821
Черный матовый	75–145	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,92–0,96
Алюминиевые краски при различных сроках эксплуатации	100	0,27–0,67
Алюминиевый лак на шероховатой поверхности	20	0,39
Алюминиевая краска после нагрева до 325 °С	150–315	0,35
Мрамор сероватый, полированный	22	0,931
Огнеупорные материалы:		
Слабо излучающие	500–1000	0,65–0,75
Сильно излучающие	500–1000	0,80–0,90
Резиновая твердая лощеная пластина	23	0,945
Резина мягкая серая шероховатая (рафинированная)	24	0,859
Стекло гладкое	22	0,937
Сажа:		
Свечная копоть	95–270	0,952
С жидким стеклом	100–185	0,959–0,947
Ламповая толщиной 0,075 мм и больше	40–370	0,945
Толь	21	0,910
Уголь очищенный (0,9 % золы)	125–625	0,81–0,79
Угольная нить	1040–1405	0,526
Фарфор глазурованный	22	0,924
Штукатурка шероховатая известковая	10–88	0,91
Эмаль белая, приплавленная к железу	89	0,897

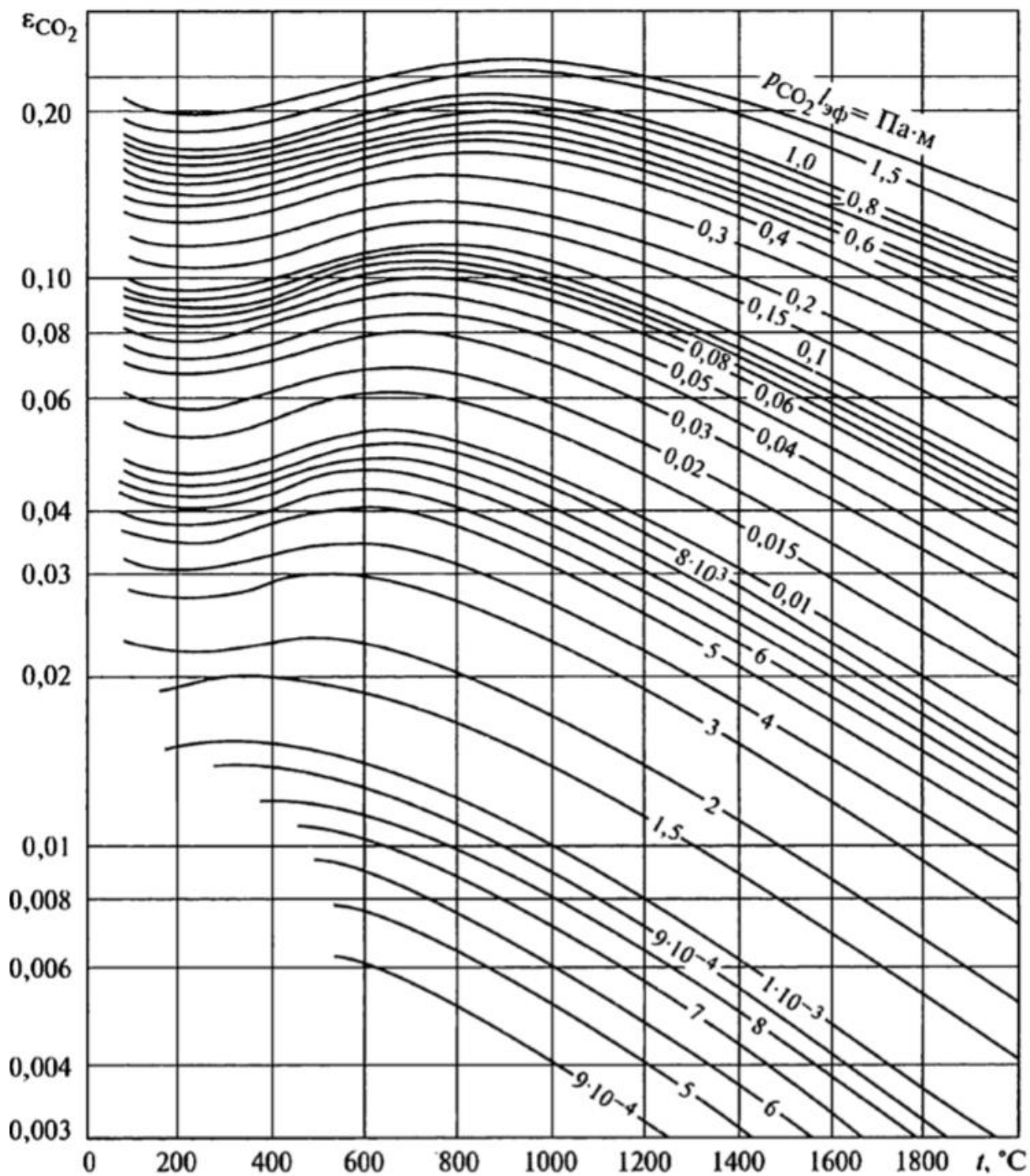


Рисунок 1 – Номограмма - зависимость ϵ_{CO_2} от температуры газа при различных значения $P_{CO_2} l_{эф}$

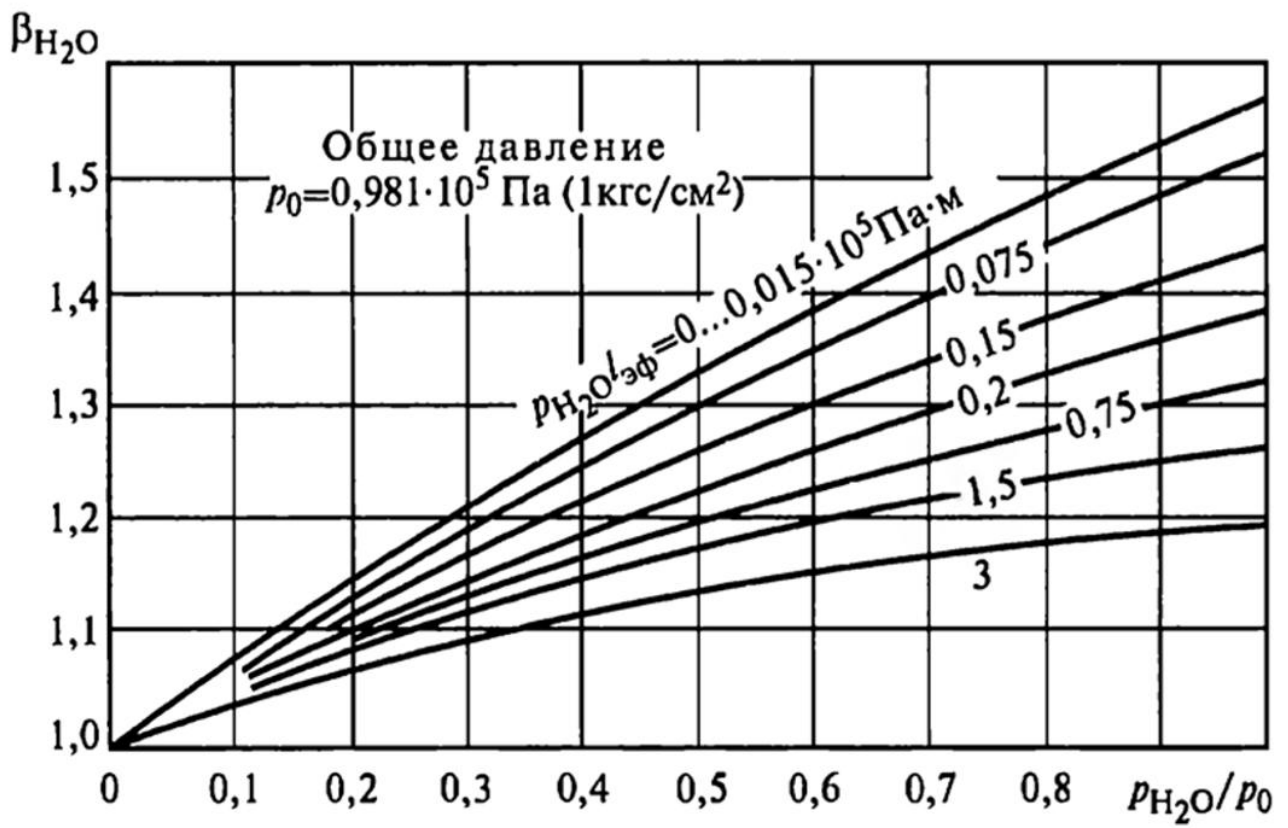


Рисунок 2 – Номограмма - поправочный коэффициент $\beta_{\text{H}_2\text{O}}$

для определения степени черноты $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$

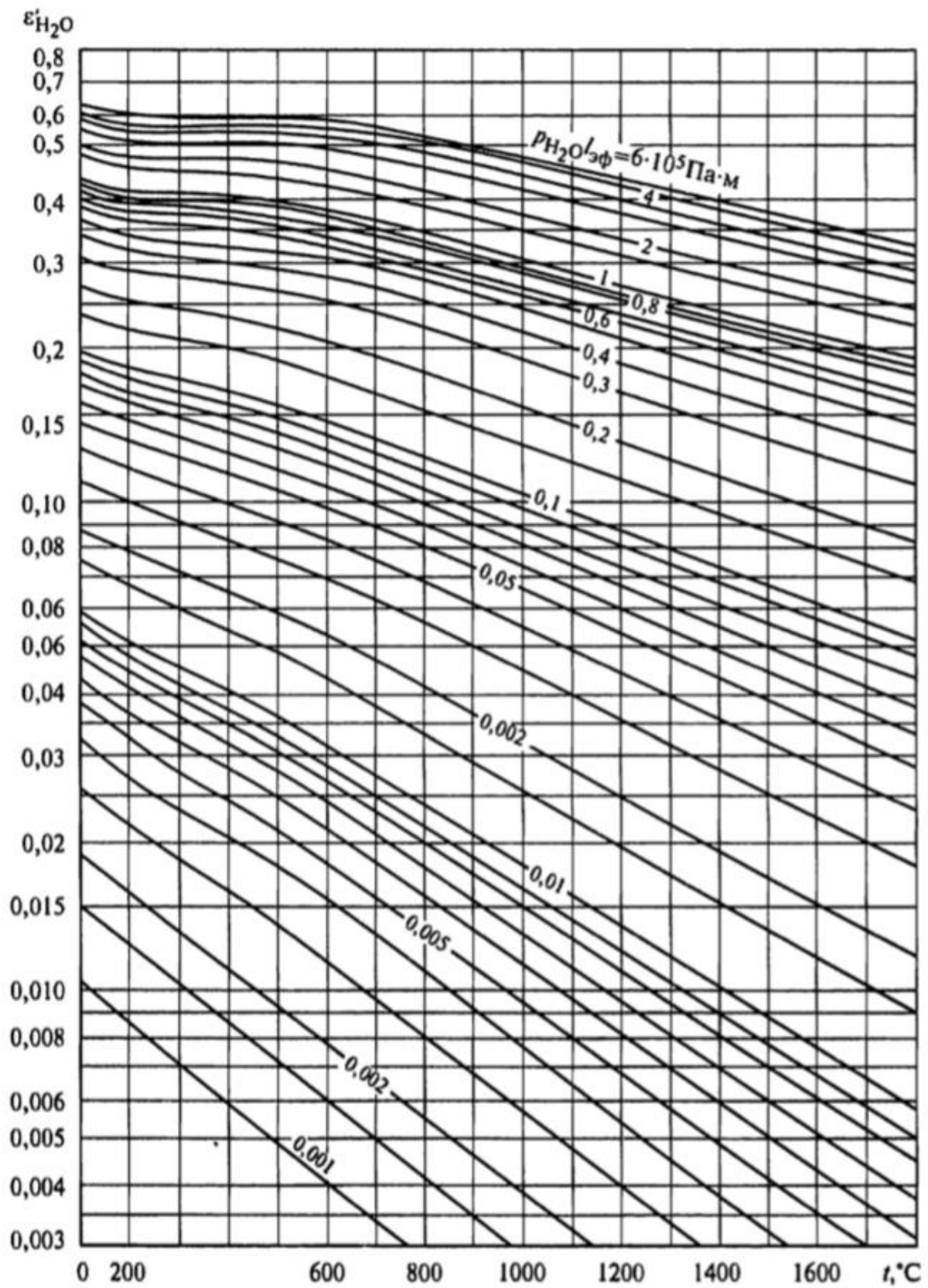


Рисунок 3 – Зависимость ϵ'_{H_2O} от температуры газа при различных значения $\rho_{H_2O} l_{эфф}$

Список литературы

1. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М. : Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.
2. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
3. Пакет задач по разделу "Радиационный теплообмен" курса «Тепломассообмен» метод. указания / Иван. гос. энерг. ун-т; Сост. Бухмиров В. В., Созинова Т. Е., Частухина М. И. – Иваново, 2000. – 16 с.
4. Авчухов, В. В. Задачник по процессам тепломассообмена: учеб. пособие для вузов / В. В. Авчухов, Б. Я. Паюсте – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
5. Воскресенский, К. Д. Сборник расчетов и задач по теплопередаче / Н. Д. Воскресенский. – М., 1959. – 336 с.
6. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / под. ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. – М. : Высш. шк. 1986. – 383 с.
7. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.
8. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / под. ред. Юдаева Б. Н., изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд. «Высшая шко-ла», 1968. – 371 с.
9. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену: учебное пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – 2-е изд., исправ. и доп. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 196 с.

Оглавление:

Введение	3
Теоретические сведения	4
Типовые задачи по разделу «Радиационный теплообмен».....	10
Задачи для самостоятельного решения	25
Приложения	30
Список литературы.....	36

Учебное издание

Составители:

Пинчук Александр Иванович

Борушко Вадим Васильевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕПЛОМАССОБМЕН»

для студентов специальностей:

1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»,

*1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного
производства»*

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Коноплёва О. В.

Корректор: Дударук С. А.

Подписано в печать 26.09.2022 г. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л.2.33. Уч. изд. л. 2.5. Заказ № 1058
Тираж 18 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский
государственный технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.

