

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И.Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ПАКЕТ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛУ "РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН"  
КУРСА ТМО**

Методические указания

Иваново 2013

Составители: В.В.БУХМИРОВ,  
Т.Е. СОЗИНОВА

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

Методические указания предназначены для студентов дневного и заочного факультетов, обучающихся по направлениям 140100 «Теплотехника и теплоэнергетика», 141100 «Энергетическое машиностроение», 140700 «Ядерная энергетика и теплофизика».

Методические указания могут быть полезны при самостоятельной работе студентов во время подготовки к текущему контролю и экзамену.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ.

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА</b>	<b>4</b>
<i>1.1. Основные понятия радиационного теплообмена</i>	4
<i>1.2. Основные законы излучения АЧТ</i>	5
<i>1.3. Излучение серых тел</i>	6
<i>1.4. Излучение в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой</i>	7
<i>1.5. Лучистый теплообмен при наличии экранов</i>	9
<i>1.6. Излучение газов</i>	10
<i>1.7. Расчет лучисто-конвективной теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи излучением</i>	12
<b>2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН»</b>	<b>13</b>
<i>2.1. Основные законы излучения АЧТ</i>	13
<i>2.2. Излучение серых тел</i>	15
<i>2.3. Теплообмен излучением в замкнутой системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой</i>	19
<i>2.4. Лучистый теплообмен при наличии экранов</i>	34
<i>2.5. Излучение газов</i>	43
<i>2.6. Расчет лучисто-конвективной теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи излучением</i>	48
<b>3. ЗАДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ</b>	<b>57</b>
<i>Приложение 1</i>	60
<i>Приложение 2</i>	63
<i>Приложение 3</i>	66
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>67</b>

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА

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

## 1.1. 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/м<sup>2</sup>, тела называют его *лучеиспускательной (излучательной) способностью*. Этот параметр излучения в пределах элементарного участка длин волн  $d\lambda$  называют спектральной плотностью потока собственного излучения  $E_{\lambda}$ , Вт/м<sup>3</sup>, 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*:

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

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

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

## 1.2. 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·м<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,4387 \cdot 10^{-2}$  м·К.

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

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

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

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

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура поверхности абсолютно черного тела, К;  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

### 1.3. 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 ( $E_\lambda$ ) составляет одну и ту же долю  $\varepsilon_\lambda$  от спектральной плотности потока излучения абсолютно черного тела ( $E_{\lambda 0}$ ), называют *серым телом*:

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

где  $\varepsilon_\lambda$  – спектральная степень черноты.

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

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

где  $E$  – лучеиспускательная способность серого тела;  $E_0$  – лучеиспускательная способность АЧТ;  $\varepsilon$  – 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:

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

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:

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

где  $c$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>):

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

Значение коэффициента излучения лежит в пределах  $c = 0 \div 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), а интегральная степень черноты изменяется от 0 до 1. В инженерных расчетах величину  $\varepsilon$  принимают по справочным данным, например, из табл. П1.

#### ***1.4. 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:

$$Q_{w,1} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_2^4 - T_1^4) \varphi_{21} F_2; \quad (15)$$

$$Q_{w,2} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1 \quad (16)$$

или

$$Q_{w,1} = c_{np} \left[ \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \right] \varphi_{21} F_2; \quad (17)$$

$$Q_{w,2} = c_{np} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \varphi_{12} F_1. \quad (18)$$

Для замкнутой системы из закона сохранения энергии следует очевидное равенство:

$$Q_{w,2} = -Q_{w,1}, \quad (19)$$

В формулах (15) ÷ (19)  $Q_{w,1}$ ,  $Q_{w,2}$  – результирующие тепловые потоки излучением со второго тела на первое тело и с первого тела на второе тело соответственно, Вт;  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты в системе 2-х серых тел;  $\varphi_{21}$ ,  $\varphi_{12}$  – 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,  $K$ ;  $c_{np}$  – 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:

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

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

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

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

Угловые коэффициенты излучения можно найти, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости:

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

б) свойство взаимности:

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

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



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

*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

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

*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

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

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

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

или

$$Q_{w,2} = c_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1. \quad (30)$$

### ***1.5. 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

$$q_{w,2}^{\varepsilon} = \varepsilon_{np}^{\varepsilon n} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4), \quad (31)$$

где  $\varepsilon_{np}^{\varepsilon n}$  – приведенная степень черноты при наличии экранов

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{np}} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon i}} - 1 \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{np}} + \sum_{i=1}^n \frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon i}} - n \right]^{-1}, \quad (32)$$

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

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

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left( \frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon}} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (33)$$

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

### 1.6. 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  $T_2$  рассчитывают по формуле

$$E_2 = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4. \quad (34)$$

Степень черноты газа  $\varepsilon_2$ , состоящего из смеси излучающих и поглощающих газов, равна сумме степеней черноты этих газов:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{SO_2} + \varepsilon_{CO}, \quad (35)$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  – степень черноты углекислого газа  $CO_2$ ;  $\varepsilon_{H_2O}$  – степень черноты водяного пара  $H_2O$ ;  $\varepsilon_{SO_2}$  – степень черноты двуокиси серы  $SO_2$ ;  $\varepsilon_{CO}$  – степень черноты окиси углерода  $CO$ .

Степень черноты водяного пара находят по формуле

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

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

Значения  $\varepsilon_{CO_2}$ ,  $\varepsilon_{H_2O}^*$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon_{SO_2}$ ,  $\varepsilon_{CO}$  находят при помощи номограмм.

При сгорании энергетического топлива в продуктах сгорания содержатся в основном углекислый газ и водяной пар. Номограммы для  $\varepsilon_{CO_2}$ ,  $\varepsilon_{H_2O}^*$  и  $\beta$  приведены в прил. 2.

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

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

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  $\varepsilon_w$ , ограничивающей газовую среду с температурой  $T_z$ , равен

а) по формуле Нуссельта (при допущении  $\varepsilon_z = A_z$ )

$$Q_w = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_z^4 - T_w^4) F_w, \quad (38)$$

где

$$\varepsilon_{np} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right]^{-1}; \quad (39)$$

б) по формуле Поляка (с учетом неравенства  $\varepsilon_z \neq A_z$ )

$$Q_w = \varepsilon_{np} \sigma_o \left( \frac{\varepsilon_z}{A_z} T_z^4 - T_w^4 \right) F_w, \quad (40)$$

где

$$\varepsilon_{np} = \left[ \frac{1}{A_z} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right]^{-1}; \quad (41)$$

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

Поглощательные способности газов находят по номограммам при температуре стенки  $T_w$ . Поглощательные способности  $A_{CO_2}$ ,  $A_{H_2O}^*$  можно найти по номограммам прил. 2.

### **1.7. 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

$$Q_{\Sigma} = Q_{\kappa} + Q_{\lambda}, \quad (43)$$

где

$$Q_{\kappa} = \alpha_{\kappa} (T_f - T_w) F_w; \quad (44)$$

$$Q_{\lambda} = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_f^4 - T_w^4) F_w. \quad (45)$$

В формулах (43) ÷ (45)  $Q_{\kappa}$  – конвективный тепловой поток;  $Q_{\lambda}$  – лучистый тепловой поток;  $\alpha_{\kappa}$  – 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:

$$Q_{\lambda} = \alpha_{\lambda} (T_f - T_w) F_w, \quad (46)$$

где  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{Q_{\lambda}}{(T_f - T_w) F_w}. \quad (47)$$

С учетом записи  $Q_{\lambda}$  в виде формулы (46) суммарный тепловой поток теплоотдачи будет равен:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\kappa} + Q_{\lambda} = (\alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda})(T_f - T_w) F_w. \quad (48)$$

## 2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН»

В данном разделе приведены задачи по разделу «Радиационный теплообмен». Все задачи снабжены ответами. Для каждой группы задач, объединенных одной темой, предложены типовые задачи с решением.

### 2.1. Основные законы излучения АЧТ

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

*Решение.*

Из закона Стефана – Больцмана (8) следует, что

$$T = \sqrt[4]{\frac{E_0}{\sigma_0}} = \sqrt[4]{\frac{1000}{5,67 \cdot 10^{-8}}} = 364 \text{ К} = 91 \text{ }^\circ\text{С}.$$

*Ответ:*  $91 \text{ }^\circ\text{С}$ .

2. Определить расход электроэнергии, необходимой для поддержания температуры  $2800 \text{ К}$ , 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.

*Решение.*

Вся электрическая энергия идет на преобразование её в теплоту и теплоотдачу излучением от поверхности металлической нити, т.к. конвективная теплоотдача в вакууме отсутствует:

$$W = Q = \sigma_0 T^4 F = \sigma_0 T^4 \pi d l = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2800^4 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 = 438,0 \text{ Вт}.$$

*Ответ:*  $438,0 \text{ Вт}$ .

3. Определить силу тока, необходимую для поддержания температуры  $3000 \text{ К}$  металлической нити ( $d = 0,1 \text{ мм}$ ,  $l = 100 \text{ мм}$ ,  $R = 0,1 \text{ Ом}$ ) со степенью черноты  $\varepsilon = 1$ , находящейся в вакууме. Падающим на нить лучистым потоком пренебречь.

*Решение.*

Вся мощность, создаваемая электрическим током в металлической нити, идет на излучение от поверхности нити, поэтому

$$W = Q,$$

или

$$I^2 R = \sigma_0 T^4 F,$$

где  $F = \pi d l$ .

Тогда

$$I = \sqrt{\frac{\sigma_0 T^4 \pi d l}{R}} = \sqrt{\frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3000^4 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1}{0,1}} = 38,08 \text{ А.}$$

*Ответ:* 38,0 А.

4. Температура поверхности металлической пластины равна 500 °С. Определить длину волны, соответствующую максимальному значению спектральной интенсивности излучения.

*Решение.*

Из закона Вина (7) следует, что

$$\lambda_{\max} = 2898/T = 2898/(500+273) = 3,75 \text{ мкм.}$$

*Ответ:* 3,75 мкм.

5. Плотность потока собственного излучение абсолютно черного тела равна 3500 кВт/м<sup>2</sup>. Определите температуру тела.

*Ответ:* 225 °С.

6. Температура абсолютно черного тела уменьшилась на 1%. На сколько процентов уменьшилась плотность потока собственного излучения АЧТ?

*Ответ:* на 4%.

7. Определить длину волны, соответствующую максимальному значению спектральной плотности потока излучения от поверхности металлического листа с температурой 600 °С.

*Ответ:* 3,32 мкм.

8. Найти температуру излучающего тела, если  $\lambda_{\max} = 1,2$  мкм.

*Решение.*

Из закона Вина (7) следует, что

$$T = 2898 / \lambda_{\max} = 2898 / 1,2 = 2415 \text{ К} = 2142 \text{ }^\circ\text{С}.$$

*Ответ:* 2142 °С.

9. Определить температуру излучающего тела, если  $\lambda_{\max} = 2,9$  мкм.

*Ответ:* 726 °С.

## 2.2. Излучение серых тел

1. Определить плотность теплового потока, излучаемого медным матовым листом, если температура поверхности листа 40 °С, а коэффициент излучения 3,5 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

*Решение.*

По формуле (13) лучеиспускательная способность серого тела равна:

$$E = c \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 = 3,5 \cdot ((40 + 273) / 100)^4 = 335,9 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:* 335,9 Вт/м<sup>2</sup>.

2. Определить лучеиспускательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения 4,54 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), если температура излучающей поверхности стенки 1000 °С. Найти также степень черноты стенки и длину волны, соответствующую максимуму интенсивности излучения.

*Решение.*

По формуле (13) лучеиспускательная способность серого тела равна:

$$E = c \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 = 4,54 \cdot (1273 / 100)^4 = 119,23 \text{ кВт/м}^2.$$

Из формулы (14) следует, что интегральная степень черноты стенки

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

Из закона Вина (7) находим длину волны, соответствующую максимуму спектральной интенсивности излучения,

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

*Ответ:* 2,28 мкм.

3. Найти потери тепла излучением 1 м паропровода диаметром  $d = 250$  мм, наружная температура которого равна  $500$  °С, степень черноты  $0,92$ .

*Решение.*

По формуле (13) находим

$$Q = \varepsilon \sigma_0 T^4 F = 0,92 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 773^4 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 1 = 14,6 \text{ кВт.}$$

*Ответ:* 14,63 кВт.

4. Площадь поверхности нити 60-ваттной вольфрамовой лампы накаливания равна  $0,5 \text{ см}^2$ . Поглощательная способность вольфрама равна  $0,6$ . Определить температуру нити накала.

*Решение.*

В соответствии со следствием из закона Кирхгофа для серого тела (12)

$$A = \varepsilon.$$

Тогда из формулы (13) получаем

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q}{\varepsilon \cdot \sigma_0 F}} = \sqrt[4]{\frac{60}{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}} = 2437 \text{ К} = 2164 \text{ °С.}$$

*Ответ:* 2164 °С.

5. Рассчитать температуру поверхности детали из окисленной латуни, если плотность потока собственного излучения тела равна  $30 \text{ кВт/м}^2$ .

*Решение.*

Из табл. П1 находим степень черноты окисленной латуни, равную  $0,6$ .

Тогда

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{E}{\varepsilon \cdot \sigma_0}} = \sqrt[4]{\frac{30 \cdot 10^3}{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} = 969 \text{ К} = 696 \text{ °С.}$$

*Ответ:* 696 °С.

6. Плотность потока падающего излучения на серое лученепрозрачное тело при температуре  $800 \text{ К}$  равна  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Найти  $E_{\text{соб}}$ ,  $E_{\text{погл}}$ ,  $E_{\text{отр}}$ ,  $E_{\text{эфф}}$ ,  $E_{\text{рез}}$ , если  $A = 0,7$ .

*Решение.*

В соответствии с определением поглощательная способность серого тела

$$A = E_{\text{погл}} / E_{\text{пад}}.$$

Следовательно, плотность потока поглощенной части энергии равна:



$$E_{\text{погл}} = A E_{\text{над}} = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ кВт/м}^2.$$

Для твердых тел плотность потока отраженной части энергии составляет:

$$E_{\text{отр}} = E_{\text{над}} - E_{\text{погл}} = 50 - 35 = 15 \text{ кВт/м}^2.$$

Согласно следствию из закона Кирхгофа (12)

$$\varepsilon = A = 0,7.$$

Тогда лучеиспускательная способность серого тела равна:

$$E_{\text{соб}} = \varepsilon \sigma_0 T^4 = 0,7 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 800^4 = 16,257 \text{ кВт/м}^2.$$

По определению эффективного излучения (4) плотность потока эффективного излучения равна:

$$E_{\text{эфф}} = E_{\text{соб}} + E_{\text{отр}} = 16,257 + 15 = 31,257 \text{ кВт/м}^2.$$

Плотность потока результирующего излучения (5)

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{соб}} - E_{\text{погл}} = E_{\text{эфф}} - E_{\text{над}} = 16,257 - 35 = -18,743 \text{ кВт/м}^2.$$

*Ответ:*  $E_{\text{соб}} = 16,257 \text{ кВт/м}^2$ ;  $E_{\text{погл}} = 35 \text{ кВт/м}^2$ ;  $E_{\text{отр}} = 15 \text{ кВт/м}^2$ ;  
 $E_{\text{эфф}} = 31,257 \text{ кВт/м}^2$ ;  $E_{\text{рез}} = -18,743 \text{ кВт/м}^2$ .

7. Металлическая поверхность нагрета до температуры  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  с коэффициентом излучения  $c = 3,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . Определить плотность потока собственного излучения поверхности, степень черноты поверхности и длину волны, которая соответствует максимуму интенсивности излучения.

*Ответ:*  $3,67 \text{ кВт/м}^2$ ;  $0,6$ ;  $5,06 \text{ мкм}$ .

8. Рассчитать плотность потока собственного излучения поверхности стального изделия с температурой  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  и степенью черноты  $0,7$ . Также найти длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной интенсивности излучения.

*Ответ:*  $52,6 \text{ кВт/м}^2$ ;  $2,70 \text{ мкм}$ .

9. Во сколько раз увеличится излучательная способность поверхности твердого тела, если её температура возрастает от  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

*Ответ:*  $5,57$ .

10. Обмуровку печи из красного шероховатого кирпича со степенью черноты 0,93 покрыли алюминиевым лаком со степенью черноты 0,39. Во сколько раз изменилось количество теплоты, отдаваемое излучением поверхностью обмуровки в окружающую среду?

*Ответ:* 2,38.

11. Найти температуру поверхности, у которой плотность потока собственного излучения  $E_{соб} = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, а степень черноты 0,2.

*Ответ:* 1450 °С.

12. Чему равна степень черноты поверхности, если плотность потока теплового излучения 20 кВт/м<sup>2</sup>, а температура поверхности 700 °С?

*Ответ:* 0,39.

13. Плотность потока собственного излучения серого тела при температуре 1000 К равна  $3,402 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Найти поглощательную способность тела?

*Ответ:* 0,60.

14. Рассчитать плотность потока собственного излучения серого тела, если известно, что при температуре 900 К  $E_{над} = 60$  кВт/м<sup>2</sup>,  $E_{погл} = 42$  кВт/м<sup>2</sup>.

*Ответ:* 26,04 кВт/м<sup>2</sup>.

15. Найти степень черноты серого тела и плотность потока собственного излучения тела при температуре 1200 К, если  $E_{над} = 7 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_{погл} = 6,3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

*Ответ:* 0,9; 105,8 кВт/м<sup>2</sup>.

16. Рассчитать плотность потока собственного излучения серого тела, если известно, что при температуре 150 °С  $E_{над} = 50$  кВт/м<sup>2</sup>,  $E_{погл} = 30$  кВт/м<sup>2</sup>.

*Ответ:* 1,1 кВт/м<sup>2</sup>.

17. Найти плотность потока эффективного излучения  $E_{эфф}$ , если известно, что при температуре 800 К плотность падающего теплового потока равна 15 кВт/м<sup>2</sup>. Поглощательная способность тела равна 0,7.

*Ответ:* 27 кВт/ м<sup>2</sup>.

18. Найти плотность отраженного теплового потока излучением  $E_{отр}$ , если известно, что при температуре 800 °С плотность падающего теплового потока равна 18 кВт/м<sup>2</sup>. Поглощательная способность тела равна 0,5.

*Ответ:* 9 кВт/ м<sup>2</sup>.

19. Найти плотность результирующего излучения  $E_{рез}$ , если известно, что при температуре 500 °С плотность падающего теплового потока равна 10 кВт/м<sup>2</sup>. Поглощательная способность тела равна 0,6.

*Ответ:* 2,1 кВт/ м<sup>2</sup>.

20. Тело при температуре 927 °С излучает с 1 см<sup>2</sup> поверхности в секунду 8,2 Дж энергии. Определить поглощательную способность тела.

*Ответ:* 0,70.

21. Твердое тело при температуре 600 °С излучает с 1 см<sup>2</sup> поверхности в секунду 2,8 Дж энергии. Определить отражательную способность тела.

*Ответ:* 0,15.

### ***2.3. Теплообмен излучением в замкнутой системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой***

1. Определить плотность результирующего потока излучением в системе двух плоских параллельных поверхностей, если известно, что  $T_1 = 800$  °С;  $\varepsilon_1 = 0,8$ ;  $T_2 = 600$  °С;  $\varepsilon_2 = 0,4$ .

*Решение.*

Плотность результирующего теплового потока излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой,

$$q_{w,2} = \varepsilon_{np} \cdot \sigma_0 \cdot (T_1^4 - T_2^4) = 0,3636 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1073^4 - 873^4) = 15353 \text{ Вт/м}^2,$$

где приведенную степень черноты для двух плоских параллельных поверхностей рассчитывают по формуле (26):

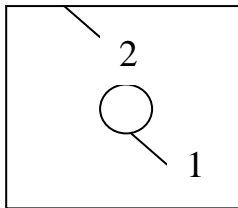
$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,4} - 1} = 0,3636.$$

Ответ: 15353 Вт/м<sup>2</sup>.

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

Решение.

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



Тогда по свойству невогнутости (25)  $\varphi_{1-1} = 0$ .

Используя свойство замкнутости (23) для первого тела

$$\varphi_{1-1} + \varphi_{1-2} = 1,$$

получим  $\varphi_{1-2} = 1$ .

Из свойства взаимности (24)

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

следует, что

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

Таким образом, для расчета углового коэффициента  $\varphi_{2-1}$  необходимо найти площади поверхности теплообмена 1-го и 2-го тел:

$$F_1 = \pi dl, \quad F_2 = 4al.$$

$$\text{Тогда } \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi dl}{4al} = \frac{\pi d}{4a}.$$

Приведенную степень черноты в системе двух серых тел находим по формуле (20):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,72} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,85} - 1\right) \cdot \frac{\pi \cdot 0,1}{4 \cdot 0,5}} = 0,706.$$

Ответ: 0,706.

3. Определить приведенный коэффициент излучения системы «труба в трубе», если наружный диаметр внутренней трубы  $d_1 = 50$  мм с коэффициентом излучения  $4,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), а внутренний диаметр наружной трубы  $d_2 = 250$  мм и её коэффициент излучения равен  $5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

*Решение.*

Составим систему уравнений для определения угловых коэффициентов, используя их свойства:

$$\begin{cases} \varphi_{11} = 0, \\ \varphi_{11} + \varphi_{12} = 1 \Rightarrow \varphi_{12} = 1, \\ \varphi_{22} + \varphi_{21} = 1 \Rightarrow \varphi_{22} = 1 - \varphi_{21}, \\ \varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2 \Rightarrow \varphi_{21} = \varphi_{12} \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{F_2}. \end{cases}$$

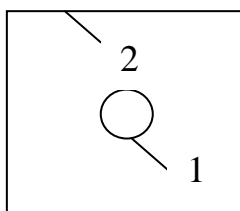
Приведенный коэффициент излучения системы из двух тел рассчитаем по формуле (21):

$$\begin{aligned} c_{np} &= \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0}\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right)\varphi_{21}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{5,67} + \left(\frac{1}{4,2} - \frac{1}{5,67}\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{5,67}\right) \cdot \frac{50}{250}} = 4,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \end{aligned}$$

*Ответ:* 4,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

4. 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.

*Решение.*



Пусть тело 1 – трубопровод, а тело 2 – канал прямоугольного сечения.

Тогда по свойству невогнутости (25)  $\varphi_{11} = 0$ .

Используя свойство замкнутости для первого тела (23)

$\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1$ , получаем, что  $\varphi_{12} = 1$ .

Из свойства взаимности (24)  $\varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2$

следует, что

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

Таким образом, для расчета углового коэффициента  $\varphi_{2-1}$  необходимо найти площади поверхности теплообмена 1-го и 2-го тел:

$$F_1 = \pi dl, \quad F_2 = 4al.$$

$$\text{Тогда } \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi dl}{4al} = \frac{\pi d}{4a} = \frac{\pi \cdot 0,1}{4 \cdot 0,3} = 0,262.$$

Приведенную степень черноты в системе двух серых тел находим по формуле (20):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,7} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 0,262} = 0,669.$$

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

$$\begin{aligned} q_l &= \frac{Q_{w,1}}{l} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} \pi d = \\ &= 0,669 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot ((150+273)^4 - (37+273)^4) \cdot 1,0 \cdot \pi \cdot 0,1 = 271,5 \text{ Вт/м.} \end{aligned}$$

*Ответ:* 271,5 Вт/м.

5. Изолированный и окрашенный масляной краской рассольный трубопровод диаметром 100 мм длиной 8 м проложен в кожухе сечением 200×200 мм, внутренняя поверхность которого покрыта алюминиевым лаком, а температура кожуха равна 27 °С. Найти потерю холода, вызванную радиацией, если температура на поверхности трубопровода равна 7 °С, степень черноты масляной краски 0,9; степень черноты алюминиевого лака 0,39.

*Решение.*

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

Найдем приведенную степень черноты по формуле (20).

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,9} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,39} - 1\right) \cdot \frac{\pi \cdot 0,1}{4 \cdot 0,2}} = 0,580,$$

где  $\varphi_{12} = 1$ , а  $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi dl}{4al} = \frac{\pi d}{4a}$  получили, используя свойства угловых коэффициентов.

Определим результирующий тепловой поток излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой (потеря холода) по формуле (16):

$$\begin{aligned} Q_{w,2} &= \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1 = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \pi dl = \\ &= 0,58 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} ((7+273)^4 - (27+273)^4) \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 8 = -161,5 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

*Ответ:* -161,5 Вт.

6. 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/(м<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>). Рассчитать приведенный коэффициент излучения и потери теплоты излучением с 1 м трубопровода.

*Решение.*

Расчет угловых коэффициентов подробно изложен при решении задачи 4. Приведенный коэффициент излучения рассчитываем по формуле (21).

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

$$= \frac{1}{\frac{1}{5,67} + \left(\frac{1}{5,67 \cdot 0,75} - \frac{1}{5,67}\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{5,22} - \frac{1}{5,67}\right) \cdot \frac{\pi \cdot 0,4}{2(0,6 + 0,8)}} = 4,133 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Результирующий тепловой поток излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой (потерю теплоты с 1 м трубопровода излучением) находим по формуле (18):

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

$$= 4,133 \cdot \left[ \left(\frac{(500 + 273)}{100}\right)^4 - \left(\frac{(100 + 273)}{100}\right)^4 \right] \cdot 1,0 \cdot \pi \cdot 0,4 = 17538,2 \text{ Вт}/\text{м}.$$

*Ответ:* 17538,2 Вт/м.

7. По оси трубы внутренним диаметром 16 мм и длиной 1 м натянута проволока из нихрома диаметром 0,5 мм. По проволоке пропускается электрический ток 4,5 А. Степень черноты проволоки 0,75, удельное электрическое сопротивление 1,1·10<sup>-6</sup> Ом·м. Степень черноты трубы 0,8, температура трубы 25 °С. Найти температуру проволоки.

*Решение.*

Если проволока находится внутри трубы, то используя свойства угловых коэффициентов, получаем (см. решение задачи 1)

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

где тело 1 – проволока, тело 2 – труба.

Таким образом,

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\pi d_1 l}{\pi d_2 l} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{0,5}{16} = 0,03125.$$

Приведенную степень черноты в системе двух серых тел рассчитываем по формуле (20):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,75} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 0,03125} = 0,7456.$$

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

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

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:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{4I^2 \rho_{эл}}{\varepsilon \sigma_0 \pi^2 d_1^3} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 4,5^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,7456 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 0,0005^3} + 298^4} =$$

$$= 1145 \text{ К} = 872 \text{ }^\circ\text{C}$$

*Ответ:* 872 °С.

8. 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.

*Решение.*

Угловые коэффициенты излучения в системе двух тел, из которых тело 1 (подогреватель) невогнуто, а тело 2 – стены помещения – вогнутое, равны (см. решение задачи 1):

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



Находим площади поверхности 1-го и 2-го тел:

$$F_1 = \pi dl + 2\pi d^2/4 = 7,854 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot b \cdot h + 2 \cdot a \cdot h = 304 \text{ м}^2.$$

$$\text{Тогда } \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{7,854}{304} = 0,0258.$$

Приведенную степень черноты в системе двух серых тел рассчитываем по формуле (20):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,92} - 1\right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{0,62} - 1\right) \cdot 0,0258} = 0,907.$$

Результирующий тепловой поток излучением в системе двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой, находим по формуле (16):

$$\begin{aligned} Q_{w,2} &= \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1 = \\ &= 0,907 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (430^4 - 300^4) \cdot 1 \cdot 7,854 = 10,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

*Ответ:* 10,5 кВт.

9. Определить тепловой поток излучением с  $1 \text{ м}^2$  поверхности в окружающую среду с температурой  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , если температура излучающей поверхности  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , а степень черноты ее  $0,75$ .

*Решение.*

Плотность результирующего лучистого теплового потока рассчитываем по формуле (29):

$$q_{w,2} = \frac{Q_{w,2}}{F_1} = \varepsilon_1 \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) = 0,75 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (423^4 - 283^4) = 1068,9 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:*  $1068,9 \text{ Вт/м}^2$ .

10. В помещении большого объема находится стальная неизолированная труба, по которой протекает горячая вода. Наружный диаметр трубы  $150 \text{ мм}$ . Температура наружной стенки трубы  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура стен помещения  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент излучения стальной поверхности трубы  $4,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . Определить потерю теплоты излучением с  $1$  погонного метра трубы.

*Решение.*

По формуле (29) рассчитываем лучистый тепловой поток с  $1 \text{ м}$  трубы:

$$q_l = \frac{Q_{w,2}}{l} = c_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \pi d =$$

$$= 4,5 \cdot \left[ \left( \frac{170+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20+273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,14 \cdot 0,15 = 660,4 \text{ Вт/м.}$$

*Ответ:* 660,4 Вт/м.

11. 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.

*Решение.*

В этом случае результирующий тепловой поток рассчитываем по формуле (29):

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

$$= 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} ((7+273)^4 - (27+273)^4) \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 8 = -264,5 \text{ Вт.}$$

*Ответ:* -264,5 Вт.

12. Определить потерю теплоты в час поверхностью паропровода ( $c = 2,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ) 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  $10^6 \text{ Па}$ , температура наружной поверхности трубы на 20 °С ниже температуры насыщения.

*Решение.*

Насыщенный водяной пар при давлении  $10^6 \text{ Па}$  имеет температуру 179,89 °С [1]. Таким образом, температура наружной поверхности трубы равна

$$T_1 = 180 - 20 = 160 \text{ °С.}$$

Лучистый тепловой поток от наружной поверхности трубы к стенам цехового помещения найдем по формуле (29):

$$Q_{w,2} = c_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \pi d l =$$

$$= 2,6 \cdot \left[ \left( \frac{160+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25+273}{100} \right)^4 \right] \cdot \pi \cdot 0,15 \cdot 200 = 66,814 \text{ кВт.}$$

Потеря теплоты в час будет равна

$$Q_{\tau} = Q_{w,2} \cdot \tau = 66,814 \cdot 3600 = 240,5 \text{ МДж.}$$

*Ответ:* 240,5 МДж.

13. 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.

*Решение.*

Для определения температуры поверхности провода необходимо использовать формулу (29):

$$Q_{w,2} = \varepsilon_1 \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) F_1 = \varepsilon \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \pi d l,$$

из которой следует, что

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{Q}{\varepsilon \cdot \sigma_o F} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{300}{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3} + 293^4} =$$

$$= 1880 \text{ К} = 1607 \text{ °С.}$$

*Ответ:* 1607 °С.

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

*Решение.*

Электрический ток силой  $I$  создает тепловой поток, который отводится от провода посредством лучистого теплообмена, поэтому уравнение баланса энергии имеет вид

$$W = Q,$$

$$\text{или } I^2 \frac{\rho_{эл} l}{f} = \varepsilon \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) F.$$

Подставляя формулы для расчета площади поперечного сечения проволоки  $f$  и поверхности теплообмена  $F$ , получим

$$I^2 \frac{\rho_{эл} l}{\pi d^2} = \varepsilon \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \pi d l.$$

Выражая искомую температуру проволоки находим

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{4I^2 \rho_{эл}}{\varepsilon \sigma_0 \pi^2 d^3} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 8^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 0,001^3} + 283^4} = 893 \text{ K} = 620 \text{ }^\circ\text{C}.$$

*Ответ:* 620 °С.

15. 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.

*Решение.*

Запишем уравнение теплового баланса шара, в котором действует внутренний источник теплоты мощностью  $q_v$ , а теплота от его поверхности отводится излучением:

$$Q_v = Q_{w,2}$$

или в развернутом виде

$$q_v \cdot V_1 = \varepsilon_1 \cdot \sigma_0 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot F_1;$$

$$q_v \frac{\pi d_1^3}{6} = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \pi d_1^2.$$

Выражаем искомую температуру шара:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{q_v d_1}{6 \varepsilon_1 \cdot \sigma_0} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{320000 \cdot 0,1}{6 \cdot 0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} + 300^4} = 1013 \text{ K} = 740^\circ\text{C}.$$

*Ответ:* 740°С.

16. Рассчитать плотность результирующего теплового потока излучением в системе, состоящей из двух стальных листов, если известно, что  $T_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  и поверхности имеют одинаковые степени черноты  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ .

*Ответ:* 13224 Вт/м<sup>2</sup>.

17. Две кирпичные поверхности расположены параллельно относительно друг друга. Степени черноты обеих поверхностей равны 0,8. Во сколько раз изменится тепловой поток, если более нагретую поверхность покрыть алюминиевым листом со степенью черноты 0,05?

*Ответ:* Уменьшится в 13,5 раз.

18. 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 в окружающую среду с единицы поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности обмуровки  $120^{\circ}\text{C}$ , а температура стальной обшивки  $50^{\circ}\text{C}$ . Степень черноты шамота 0,75 и листовой стали 0,52.

*Ответ:* 325, 8 кВт.

19. На близком расстоянии друг от друга параллельно расположены две пластины. Более нагретая пластина из окисленной меди с температурой 600 К и передает 216 Вт излучением с  $1\text{ м}^2$  поверхности на вторую пластину, изготовленную из шероховатой стали. Определить температуру поверхности стальной пластины.

*Ответ:* 593 К.

20. Двустенный сосуд Дьюара с посеребренными поверхностями наполнен жидким кислородом при температуре  $-183^{\circ}\text{C}$ . Снаружи сосуд окружает воздушная среда с температурой  $27^{\circ}\text{C}$ . Найти тепловой поток, передаваемый излучением между стенками сосуда, если принять, что стенки приобретают температуру сред, с которыми они соприкасаются, а поверхность теплообмена равна  $0,05\text{ м}^2$ . Степень черноты серебряного слоя принять равной 0,04.

*Ответ:* 0,46 Вт.

21. Цилиндрический сосуд для хранения жидкого кислорода выполнен с двойными стенками, покрытыми слоем серебра, коэффициент поглощения которого  $A_1=A_2=0,02$ . На наружной поверхности внутренней стенки температура  $-183^{\circ}\text{C}$ , а на внутренней поверхности наружной стенки температура  $20^{\circ}\text{C}$ . Расстояние между стенками мало и поверхность  $F_1$  можно считать равной поверхности  $F_2$ . Рассчитать тепловой поток, проникающий в сосуд через стенки путем лучистого теплообмена, если площадь теплоотдающей поверхности равна  $0,2\text{ м}^2$ .

*Ответ:* 0,83 Вт.

22. Определить лучистый тепловой поток между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки сосуда температура  $-183^{\circ}\text{C}$ , а на внутренней

поверхности наружной стенки температура  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого  $0,02$ . Площади поверхностей стенок равны  $F_1 = F_2 = 0,1\text{ м}^2$ .

*Ответ:*  $0,4\text{ Вт}$ .

23. Определить плотность теплового потока на стенке сосуда Дьюара, внутри которого налит жидкий кислород ( $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Температура наружной поверхности сосуда  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а степень черноты серебряного слоя  $0,04$ .

*Ответ:*  $4,59\text{ Вт/м}^2$ .

24. Определить приведенную степень черноты системы, если одна труба с наружным диаметром  $d_1 = 80\text{ мм}$  находится внутри другой с внутренним диаметром  $d_2 = 200\text{ мм}$ . Степени черноты труб одинаковы и равны  $0,65$ .

*Ответ:*  $0,57$ .

25. Определить приведенный коэффициент излучения для трубопровода с наружным диаметром  $0,08\text{ м}$ , расположенного в центре кирпичного канала прямоугольного сечения со сторонами  $0,5 \times 0,4\text{ м}$ . Коэффициент излучения трубы  $4,6\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , коэффициент излучения стенок канала  $5,2\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

*Ответ:*  $4,6\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

26. Определить потери тепла излучением с одного погонного метра трубопровода ( $d = 200\text{ мм}$ ), который проходит в канале прямоугольного поперечного сечения  $400 \times 500\text{ мм}$ . Степень черноты стенок канала и трубы равны соответственно  $0,92$  и  $0,735$ . Температуры стенок канала и трубы равны соответственно  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $527\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $9,8\text{ кВт/м}$ .

27. Найти потери тепла излучением с  $1$  погонного метра паропровода диаметром  $300\text{ мм}$ , расположенного в канале прямоугольного сечения  $600 \times 700\text{ мм}$ . Наружная температура паропровода равна  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , степень черноты –  $0,93$ . Стенки канала выложены огнеупорным кирпичом со степенью черноты  $0,8$  и его температура равна  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

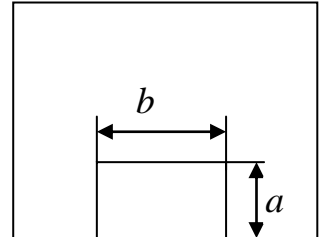
*Ответ:*  $23\ 581,4\text{ Вт/м}$ .

28. Две трубы ( $d_1 = 50\text{ мм}$ ,  $d_2 = 80\text{ мм}$ ,  $l = 2\text{ м}$ ) расположены соосно одна внутри другой. Температура внутренней трубы  $T_1 = 2000\text{ К}$ . Степени чер-

ноты поверхности труб:  $\varepsilon_1 = 0,9$ ,  $\varepsilon_2 = 0,5$ . Рассчитать тепловой поток, который необходимо отводить от наружной трубы, чтобы ее температура была равна 1500 К? Конвективным теплообменом пренебречь.

*Ответ:* 112,2 кВт.

29. В муфельной печи нагревается металлическая заготовка прямоугольного сечения  $a \times b = 0,2 \times 0,3$  м длиной 0,4 м. Заготовка лежит на поду печи. Высота печи 0,6 м, ширина 0,5 м, длина 0,8 м. Температура стенок печи 900 °С, степень черноты поверхности печи 0,7. Температура металлической заготовки 400 °С, степень черноты заготовки 0,85. Определить плотность результирующего теплового потока от стенок печи к поверхности заготовки.



*Указание.*

В теплообмене излучением участвуют поверхности печи и заготовки, за исключением нижней грани заготовки, стоящей на поду печи. Следовательно, площади поверхности металлической заготовки и муфельной печи необходимо рассчитать по формулам соответственно:

$$F_1 = 2a \times b + 2a \times l + b \times l = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,2 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,4 = 0,4 \text{ м}^2.$$

$$F_2 = 2A \times B + 2A \times H + 2B \times H - b \times l = 2 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,6 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,8 - 0,3 \cdot 0,4 = 2,24 \text{ м}^2.$$

*Ответ:* 76377,9 Вт/м<sup>2</sup>.

30. Определить тепловой поток излучением от стальной неизолированной окисленной трубы длиной 6 м с наружным диаметром 0,1 м, находящейся в канале, площадь поверхности которого 20 м<sup>2</sup>. Температура наружной поверхности трубы 85 °С, температура стенок канала 15 °С. Степень черноты поверхности трубы 0,8 и поверхности стенок канала 0,62.

*Ответ:* 780,2 Вт.

31. Стальная заготовка с начальной температурой 20°С поставлена в муфельную электрическую печь, температура стенок которой 900°С. Определить, какой тепловой поток воспринимается 1 м<sup>2</sup> заготовки (в начальный период) за счет лучистой энергии, если отношение поверхностей заготовки и муфельной печи  $F_1/F_2 = 1/30$ , а степени черноты заготовки и стенок печи соответственно равны 0,7 и 0,85.

*Ответ:* 74541 Вт/м<sup>2</sup>.

32. Стальной брусок нагревается в электропечи. Температура внутренней поверхности печи  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , степень черноты  $0,82$ . Температура поверхности бруска  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , степень черноты  $0,65$ . Заготовка лежит на поду печи. Площадь излучающей поверхности бруска меньше внутренней излучающей поверхности печи в 4 раза. Определить плотность результирующего лучистого потока от стенок печи на поверхность бруска.

*Ответ:*  $41810\text{ Вт/м}^2$ .

33. Фарфоровый тигель (степень черноты  $0,7$ ) с начальной температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  поставлен в муфельную печь (степень черноты  $0,92$ ), температура стенок которой равна  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равна плотность теплового потока излучением, воспринимаемая тиглем в начальный момент теплообмена, если отношение поверхностей тигля и печи  $F_2/F_1 = 1/20$ ?

*Ответ:*  $52169,4\text{ Вт/м}^2$ .

34. В муфельной электрической печи с температурой стенок  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  нагревается стальная заготовка. Степень черноты поверхности стальной болванки  $0,8$  (средняя за период нагрева) и степень черноты шамотной стенки муфельной печи  $0,85$ . Площадь поверхности печи  $F_2$ , участвующей в лучистом теплообмене, существенно превышает площадь поверхности болванки  $F_1$ , т.е.  $F_2 \gg F_1$ . Рассчитать плотность теплового потока излучением с  $1\text{ м}^2$  поверхности муфельной электрической печи на стальную болванку в момент, когда её температура равна  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $118242,5\text{ Вт/м}^2$ .

35. Определить тепловые потери излучением с  $1\text{ м}$  длины паропровода наружным диаметром  $0,12\text{ м}$ , если температура поверхности трубы  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , степень черноты  $0,85$ , а температура окружающей среды  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $944,8\text{ Вт/м}$ .

36. Рассчитать тепловой поток, который отдает посредством лучистого теплообмена  $1\text{ м}$  оголенного паропровода. Температуры поверхности паропровода и ограждений соответственно равны  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Степень черноты поверхности трубы  $0,8$  и диаметр трубы  $0,3\text{ м}$ .

*Ответ:*  $11216\text{ Вт/м}$ .

37. Температура поверхности выходного коллектора пароперегревателя высокого давления равна  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вычислить тепловые потери с  $1\text{ м}$  неизо-



лированного коллектора путем лучистого теплообмена, если наружный диаметр коллектора 275 мм, коэффициент поглощения 0,8, а температура ограждений  $30^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:* 13654 Вт/м.

38. Определить тепловой поток, излучаемый стальной трубкой с окисленной поверхностью наружным диаметром 60 мм и длиной 10 м. Температура поверхности трубки  $220^{\circ}\text{C}$ . Трубка расположена в помещении на большом удалении от стен, температура которых равна  $20^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:* 4420,7 Вт.

39. Определить количество тепла, теряемого в час за счет излучения паропроводом без тепловой изоляции, проложенного внутри большого цехового помещения. Наружный диаметр паропровода 100 мм, длина 150 м. По паропроводу течет насыщенный пар давлением 10 бар, температура наружной поверхности труб паропровода на  $20^{\circ}\text{C}$  ниже температуры насыщения, температура воздуха в помещении  $18^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент поглощения материала труб  $A=0,46$ .

*Ответ:* 121,1 МДж.

40. По проволоке из нихрома диаметром 0,5 мм течет электрический ток силой 4,5 А. Степень черноты проволоки 0,75, удельное электрическое сопротивление  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Температура ограждающих конструкций  $20^{\circ}\text{C}$ . Найти температуру проволоки. Теплота от проволоки отводится излучением.

*Ответ:*  $895^{\circ}\text{C}$ .

41. Определить температуру провода электронагревателя, если его диаметр и длина соответственно равны 0,5 мм и 2,5 м. Степень черноты поверхности провода 0,9, а температура ограждающей арматуры  $15^{\circ}\text{C}$ . Мощность, потребляемая нагревателем, равна 0,4 кВт. Конвективным теплообменом пренебречь.

*Ответ:*  $917^{\circ}\text{C}$ .

42. Тело цилиндрической формы длиной 2 м и диаметром 200 мм имеет степень черноты поверхности 0,85. В теле действуют внутренние источники теплоты мощностью  $45 \text{ кВт/м}^3$ . Выделяемая теплота излучением уходит

с поверхности тела в окружающую среду с температурой 15 °С. Найти температуру поверхности тела.

*Ответ:* 169 °С.

43. В опытной установке для определения степени черноты вольфрамовой проволоки потребляется электрическая мощность 20 Вт. Диаметр и длина проволоки соответственно равны 3 мм 200 мм. Площадь поверхности вакуумной камеры, в которую помещена проволока, велика по сравнению с площадью поверхности проволоки. Температура поверхности стенок вакуумной камеры равна 30 °С. Определить степень черноты вольфрамовой проволоки при температуре 800 °С.

*Ответ:* 0,142.

#### 2.4. Лучистый теплообмен при наличии экранов

1. 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.

*Решение.*

В соответствии с формулой (31) при наличии экранов

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

где  $\varepsilon_{np}^{\circ}$  для двух параллельных пластин с расположенным между ними одним экраном рассчитываем, используя формулу (26) и формулу (33):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{np}^{\circ} &= \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n \left( \frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{2}{\varepsilon_3} - 2 \right]^{-1} = \\ &= \left[ \frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,92} + \frac{2}{0,13} - 2 \right]^{-1} = 0,06361. \end{aligned}$$

Тогда плотность теплового потока излучением на поверхности кирпичной стенки равна:

$$q_{w,2}^{\circ} = 0,06361 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (423^4 - 323^4) = 76,2 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:* 76,2 Вт/м<sup>2</sup>.

2. 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.

*Решение.*

Степень черноты листовой стали, окисленного никеля и хрома мы можем принять по справочным данным (прил. 1). Принимаем для листовой стали степень черноты равной 0,55, для окисленного никеля – 0,39, для хрома – 0,17.

По формуле (31) рассчитываем плотность радиационного теплового потока при наличии экранов:

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

где приведенную степень черноты  $\varepsilon_{np}^{\varepsilon n}$  для двух параллельных пластин с расположенным между ними одним экраном рассчитываем по формулам (26) и (33):

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n \left( \frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{2}{\varepsilon_3} - 2 \right]^{-1}.$$

Если использовать в качестве экрана окисленный никель, то

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{0,55} + \frac{1}{0,55} + \frac{2}{0,39} - 2 \right]^{-1} = 0,1478,$$

если использовать в качестве экрана хром, то

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{0,55} + \frac{1}{0,55} + \frac{2}{0,17} - 2 \right]^{-1} = 0,07462.$$

Плотности теплового потока излучением равны:

– при использовании никелевого экрана

$$q_{w,2}^{\varepsilon} = 0,1478 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (693^4 - 393^4) = 1732,9 \text{ Вт/м}^2;$$

– при использовании хромового экрана

$$q_{w,2}^{\circ} = 0,07462 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (693^4 - 393^4) = 874,9 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:* 1732,9 Вт/м<sup>2</sup>; 874,9 Вт/м<sup>2</sup>.

3. 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 м<sup>2</sup> 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?

*Решение.*

При отсутствии экранов плотность теплового потока между двумя параллельными пластинами

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

где приведенная степень черноты  $\varepsilon_{np}$  для двух параллельных пластин находят по формуле (26):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,75} + \frac{1}{0,55} - 1} = 0,4648.$$

При наличии экранов плотность лучистого теплового потока находят по формуле (31):

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

где  $\varepsilon_{np}^{\varepsilon n}$  для двух параллельных пластин с расположенными между ними экранами рассчитывается по формуле (33):

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left( \frac{2}{\varepsilon_s} - 1 \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{0,4648} + 1 \left( \frac{2}{0,55} - 1 \right) \right]^{-1} = 0,2089.$$

Потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени без экрана равны

$$q_{w,2} = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) = 0,4648 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (393^4 - 318^4) = 359,17 \text{ Вт/м}^2.$$

Потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени при наличии экрана

$$q_{w,2}^{\varepsilon} = \varepsilon_{np}^{\varepsilon n} \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) = 0,2089 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (393^4 - 318^4) = 161,42 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, при использовании стального экрана тепловые потери излучением уменьшились в  $359,17/161,42 = 2,2$  раза.

*Ответ:* потери уменьшились в 2,2 раза.

4. 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?

*Решение.*

При отсутствии экранов плотность радиационного теплового потока между двумя параллельными пластинами рассчитывают по формуле

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

где приведенную степень черноты  $\varepsilon_{np}$  для двух параллельных пластин рассчитывают по формуле (26):

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

При наличии  $n$  экранов плотность радиационного теплового потока находят по формуле (31):

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

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 (33):

$$\varepsilon_{np}^{\varepsilon n} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left( \frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right) \right]^{-1}.$$

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

$$\begin{aligned} \frac{q_{w,2}}{q_{w,2}^{\varepsilon}} &= \frac{\frac{1}{\varepsilon_{np}} + n \left( \frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_{np}}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + n \left( \frac{2}{\varepsilon_3} - 1 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \\ &= \frac{\frac{1}{0,83} + \frac{1}{0,83} - 1 + 1 \cdot \left( \frac{2}{0,2} - 1 \right)}{\frac{1}{0,83} + \frac{1}{0,83} - 1} = 7,38 \text{ раз.} \end{aligned}$$

*Ответ:* уменьшится в 7,38 раз.

5. 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.

*Решение.*

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  $\varepsilon_{np}$  для двух параллельных пластин рассчитывают по формуле (26):

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

При наличии экранов плотность лучистого теплового потока определяют по формуле (31):

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

где  $\varepsilon_{np}^{\varepsilon n}$  для двух параллельных пластин с расположенными между ними экранами рассчитывают по формуле (33):

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

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

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

Выражаем число экранов  $n$ :

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

Найдем значение  $1/\varepsilon_{np}$ :

$$\frac{1}{\varepsilon_{np}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 = \frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1 = 1,5.$$

Тогда

$$n = 1,5 \frac{105 - 1}{\frac{2}{0,05} - 1} = 4 \text{ экрана.}$$

*Ответ:* 4 экрана.

6. Между кирпичной обмуровкой топочной камеры и металлической обшивкой помещен экран из латуни. Степень черноты: кирпичной обму-

ровки 0,85; металлической обшивки 0,62; латуни 0,35. Температура на поверхности обмуровки 150 °С, а на металлической обшивке 30 °С. Определить плотность результирующего потока излучением на металлической обшивке при наличии экрана.

*Ответ:* 205,6 Вт/м<sup>2</sup>.

7. Определить плотность теплового потока излучением для двух стальных листов, расположенных параллельно, при температурах 500 °С и 20°С. Расстояние между листами мало по сравнению с их высотой и шириной. Между стальными листами расположен стальной экран. Степень черноты стальных листов и экрана  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,8$ .

*Ответ:* 6608,8 Вт/м<sup>2</sup>.

8. Определить плотность теплового потока излучением для двух стальных листов, расположенных параллельно, при температурах 500 °С и 20°С. Расстояние между листами мало по сравнению с их высотой и шириной. Между стальными экранами расположен экран из алюминиевой фольги со степенью черноты  $\varepsilon_3=0,05$ . Степень черноты стальных листов  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ .

*Ответ:* 489,5 Вт/м<sup>2</sup>.

9. В целях уменьшения тепловых потерь нагревательную печь окружили стальным экраном. Размеры печи велики по сравнению с расстоянием между ее наружной поверхностью и экраном. В результате измерений было получено, что температура наружной поверхности кладки печи равна 120°С, а температура окружающей среды 25°С. Найти плотность лучистого потока от поверхности кладки в окружающую среду. Степень черноты кладки равна 0,8; степень черноты стен помещения 0,9; температура стен равна температуре окружающей среды; степень черноты экрана равна 0,2.

*Ответ:* 87,4 Вт/м<sup>2</sup>.

10. Температуры поверхности паропровода и ограждений равны 500°С и 30°С. Степени черноты поверхности паропровода и ограждений равны 0,8.

а) Определить плотность теплового потока, который отдает излучением оголенный паропровод.

б) Определить, как изменится плотность радиационного теплового потока, если паропровод окружен экраном. Степень черноты экрана 0,5.

в) Определить, как изменится плотность радиационного теплового потока, если паропровод окружен десятью экранами. Степень черноты экранов 0,5.



г) Определить, насколько уменьшится плотность радиационного теплового потока, если паропровод окружен десятью экранами, выполненными из алюминиевой фольги со степенью черноты 0,05.

Во всех случаях считать, что температуры трубы и ограждений после установки экранов не изменились.

*Ответ:* а) 13177,5 Вт/м<sup>2</sup>; б) 4392,5 Вт/м<sup>2</sup> (потери излучением уменьшились в 3 раза); в) 644,6 Вт/м<sup>2</sup> (потери излучением уменьшились в 20 раз); г) 50,6 Вт/м<sup>2</sup> (потери излучением уменьшились в 260 раз).

11. Какова должна быть степень черноты защитного экрана коллектора пароперегревателя, чтобы тепловые потери излучением с поверхности этого коллектора не превышали 40 Вт/м<sup>2</sup> и температура поверхности коллектора не превышала 90°С? Температура ограждений 20°С. Степень черноты поверхности коллектора равна 0,8, а степень черноты поверхности ограждений равна 0,9.

*Ответ:* 0,145.

12. Во сколько раз уменьшится лучистый тепловой поток между двумя параллельными пластинами, если между ними поместить два экрана из прокатной латуни. Одна пластина изготовлена из необработанного листового железа, а другая – из окисленной стали. Принять, что температуры поверхностей после установки экранов не изменяются.

*Указание.*

Степень черноты листового железа, окисленной стали и прокатной латуни следует принять по справочным данным (прил. 1). Принимаем для листового железа степень черноты равной 0,37, для окисленной стали – 0,80, для прокатной латуни – 0,06.

*Ответ:* уменьшится в 22,9 раз.

13. В канале круглого сечения соосно расположен горячий трубопровод. Материал канала – полированная сталь, материал трубопровода – обточенный чугун. Между каналом и трубопроводом располагают цилиндрический экран из полированного алюминия. Во сколько раз уменьшится лучистый тепловой поток от трубопровода к стенкам канала при наличии экрана? Принять, что температуры поверхностей после установки экрана не изменяются.

*Указание.*

Степень черноты полированной стали, обточенного чугуна и алюминия следует принять по справочным данным (Приложение 1). Принимаем для

полированной стали степень черноты равной 0,55; для обточенного чугуна – 0,70; для алюминия – 0,055.

*Ответ:* уменьшится в 16,7 раза.

14. Две трубы из окисленной стали расположены соосно относительно друг друга. Между ними концентрически расположены два экрана на одинаковых расстояниях друг от друга и от труб. Экраны сделаны из окисленного никеля. Определить, во сколько раз уменьшится лучистый тепловой поток от горячей трубы при её экранировании по сравнению с трубой без экранов. Температуры труб после установки экранов не изменяются.

*Указание.*

Степень черноты окисленной стали и окисленного никеля следует принять по справочным данным (прил. 1). Принимаем для окисленной стали степень черноты равной 0,80; для окисленного никеля – 0,4.

*Ответ:* уменьшится в 6,3 раза.

15. 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 99 раз. Принять, что температуры поверхностей после установки экранов не изменяются. Степень черноты экранов 0,04.

*Ответ:* 3 экрана.

16. Лучистый теплообмен происходит между двумя параллельными пластинами из листовой стали. При установке между пластинами экранов со степенью черноты 0,04, результирующий лучистый тепловой поток уменьшился в 106 раз. Определить количество установленных экранов, считая, что температуры поверхностей пластин после установки экранов остаются неизменными.

*Указание.*

Степень черноты листовой стали принять по справочным данным (прил. 1). Принимаем 0,6.

*Ответ:* 5 экранов.

## 2.5. Излучение газов

1. 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.

*Решение.*

Плотность потока собственного излучения газов рассчитывают по формуле (34):

$$E_2 = \varepsilon_2 \sigma_o T_2^4 .$$

Степень черноты собственного излучения углекислого газа и водяного пара

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}^* ,$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$ ,  $\varepsilon_{H_2O}^*$  и  $\beta$  определяются по номограммам (прил. 2).

При использовании номограмм необходимо знать произведение парциальных давлений углекислого газа и водяного пара на эффективную длину пути луча:

$$p_{CO_2} l = r_{CO_2} p l = 0,10 \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,15 \text{ МПа} \cdot \text{м};$$

$$p_{H_2O} l = r_{H_2O} p l = 0,05 \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 0,75 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,075 \text{ МПа} \cdot \text{м}.$$

По номограммам прил. 2 при температуре газов 900 °С находим  $\varepsilon_{CO_2} = 0,22$ ;  $\varepsilon_{H_2O}^* = 0,092$ ,  $\beta = 1,05$ .

Тогда степень черноты газовой смеси равна:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}^* = 0,22 + 0,092 \cdot 1,05 = 0,3166,$$

а плотность потока собственного излучения газов

$$E_2 = \varepsilon_2 \sigma_o T_2^4 = 0,3166 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1173^4 = 339844,9 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:* 339844,9 Вт/м<sup>2</sup>.

2. Через газопровод прямоугольного сечения 0,3×0,4 м проходят продукты сгорания, содержащие по объему 10 % водяного пара и 15 % двуокиси уг-

лерода. Общее давление газовой смеси 0,1 МПа. Температура продуктов сгорания 500 °С. Температура стенок газохода 100 °С. Степень черноты стенок газохода 0,85. Определить плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенке газохода.

*Решение.*

При использовании номограмм необходимо знать парциальные давления углекислого газа и водяного пара, а также длину пути луча (37):

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{ABL}{2AL + 2BL} = 3,6 \frac{AB}{2A + 2B} = 3,6 \frac{0,3 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,4} = 0,309 \text{ м.}$$

Произведения парциальных давлений двуокиси углерода и водяного пара на длину пути луча:

$$p_{CO_2} l = 15 \cdot 0,309 = 4,629 \text{ м} \cdot \text{кПа};$$

$$p_{H_2O} l = 10 \cdot 0,309 = 3,09 \text{ м} \cdot \text{кПа}.$$

По номограммам прил. 2 определяем:

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,08; \varepsilon_{H_2O}^* = 0,08, \beta = 1,1.$$

Тогда степень черноты смеси газов

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}^* = 0,08 + 1,1 \cdot 0,08 = 0,168.$$

Для определения приведенной степени черноты в системе газ–оболочка используем выражение (37):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,168} + \frac{1}{0,85} - 1} = 0,163.$$

Тогда плотность результирующего теплового потока от продуктов сгорания к стенке газохода составит

$$q_w = \varepsilon_{np} \sigma_o (T_z^4 - T_w^4) = 0,163 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (773^4 - 373^4) = 3120,9 \text{ Вт/м}^2.$$

*Ответ:* 3120,9 Вт/м<sup>2</sup>.

3. Определить плотность потока собственного излучения изотермического слоя газа толщиной 0,25 м при температуре 1000°С. Газ содержит 12% CO<sub>2</sub> и 6% H<sub>2</sub>O. Общее давление газа 1 бар.

*Ответ:* 14368,9 Вт/м<sup>2</sup>.

4. Рассчитать плотность лучистого теплового потока от дымовых газов к поверхности прямоугольного газохода со сторонами  $A = 0,8$  м и  $B = 1,5$  м. Газы содержат 7,5 % H<sub>2</sub>O и 16 % CO<sub>2</sub>. Общее давление газов 100 кПа. Средняя температура газов 600°С.

*Указание.*

Длину пути луча рассчитывают по формуле

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{ABL}{2AL + 2BL} = 1,8 \frac{AB}{A + B}.$$

*Ответ:* 8510 Вт/м<sup>2</sup>.

5. Камера, имеющая форму параллелепипеда со сторонами  $A = 2$  м,  $B = 3$  м и  $L = 5$  м, заполнена продуктами сгорания. Температура газов 1400 °С. Давление смеси газов 0,1 МПа, парциальное давление углекислого газа 11,5 кПа, парциальное давление водяного пара 23 кПа. Найти плотность потока собственного излучения данной газовой смеси.

*Указание.*

Длину пути луча рассчитывают по формуле

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{ABL}{2AL + 2BL + 2AB}.$$

*Ответ:* 65584 Вт/м<sup>2</sup>.

6. Рассчитать плотность потока собственного излучения продуктов сгорания природного газа на экранную поверхность топки парового котла размерами 6×8×12 м. Температура продуктов сгорания 2000 °С. Состав продуктов сгорания:  $r_{CO_2} = 0,015$ ,  $r_{H_2O} = 0,09$ . Общее давление продуктов сгорания 1 бар.

*Ответ:* 300,4 кВт/м<sup>2</sup>.

7. В трубе диаметром 200 мм и длиной 1 м находится смесь сухого воздуха и двуокиси углерода. Полное давление и температура смеси равны

соответственно 100 кПа и 900 °С. Парциальное давление двуокиси углерода равно 9 кПа. Найти степень черноты находящейся в трубе смеси газов.

*Указание.*

Поскольку смесь состоит из лучепрозрачного сухого воздуха и  $\text{CO}_2$ , то степень черноты смеси газов будет равна степени черноты двуокиси углерода, которую найдем по рис.1 П2 при соответствующих парциальном давлении и длине пути луча

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{\frac{\pi d^2}{4} l}{\pi d l} = 0,9d .$$

*Ответ:* 0,06.

8. В нагревательной печи температура газов по всему объему постоянна и равна 1200 °С. Объем печи 12 м<sup>3</sup>, площадь поверхности ограждений 32 м<sup>2</sup>. Общее давление продуктов сгорания 100 кПа, парциальные давления водяных паров 14,5 кПа и углекислого газа 7,4 кПа. Рассчитать степень черноты излучающей газовой смеси и плотность потока собственного излучения продуктов сгорания.

*Ответ:* 0,226; 60432 Вт/м<sup>2</sup>.

9. Водяной пар с температурой 873 К и давлением 0,3 МПа заполняет сосуд в форме параллелепипеда с размерами 200×300×400 мм. Определить степень черноты собственного излучения пара.

*Указание.*

Степень черноты водяного пара найдем по рис.2 П2 при соответствующих температуре и произведении парциального давления на длину пути луча.

*Ответ:* 0,30.

10. Водяной пар с температурой 250 °С при давлении 0,1 МПа проходит по трубопроводу диаметром 100 мм. Определить степень черноты собственного излучения пара.

*Ответ:* 0,26.

11. Определить плотность результирующего теплового потока от газовой среды к стенке газохода, если температура газов 800 °С. Диаметр газохода 0,4 м. Температура стенок газохода 200 °С. Степень черноты газохода

0,75. Продукты сгорания содержат по объему 12 % двуокиси углерода и 7,5 % водяного пара. Общее давление газовой смеси 0,1 МПа.

*Указание.*

Длину пути луча находят по формуле:

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{\frac{\pi d^2}{4} l}{\pi d l} = 0,9d.$$

*Ответ:* 9835,7 Вт/м<sup>2</sup>.

12. В хлебопекарной печи 2,5×3×6 м температура газов равна 250 °С. В газах содержится 10% CO<sub>2</sub> и 7% водяных паров. Определить плотность теплового потока, излучаемого газами к поверхности хлеба, если температура этой поверхности 190 °С, а ее степень черноты – 0,9. Общее давление газа 1 бар.

*Указание.*

Длину пути луча находят по формуле:

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{ABL}{2AL + 2BL + 2AB}.$$

*Ответ:* 552,9 Вт/м<sup>2</sup>.

13. Цилиндрическая камера сгорания диаметром 1,5 м и длиной 4 м заполнена светящимся пламенем жидкого топлива со средней температурой газов 1473 К. Считая излучение пламени серым со степенью черноты 0,4, определить тепловой поток, воспринимаемый боковой поверхностью камеры сгорания. Температура металлической стенки камеры сгорания, охлаждаемой водой, равна 423 К, степень черноты стенки 0,85.

*Ответ:* 1,9 МВт.

14. Средняя температура дымовых газов в газоходе нагревательной печи 900 °С. Степень черноты обмуровки газохода 0,8. Определить температуру внутренней поверхности газохода, если плотность теплового потока излучением составляет 3400 Вт/м<sup>2</sup> при степени черноты газа 0,16.

*Ответ:* 834 °С.

## 2.6. Расчет лучисто-конвективной теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи излучением

1. Сколько тепла теряет в час  $1 \text{ м}^2$  вертикальной поверхности обмуровки котла, если температура стенки  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом коэффициент конвективной теплоотдачи  $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Степень черноты обмуровки котла  $0,78$ .

*Решение.*

Обмуровка котла теряет тепло за счет излучения и свободной конвекции:

$$q_{\Sigma} = q_l + q_k.$$

При условии  $F_1 \ll F_2$  приведенная степень черноты системы тел равна степени черноты обмуровки

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_1.$$

Тепловые потери излучением

$$q_l = q_{w,2} = \varepsilon_1 \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) = 0,78 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (373^4 - 303^4) = 483,3 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Тепловые потери конвекцией

$$q_k = \alpha(T_1 - T_2) = 4,5 (373 - 303) = 315 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Суммарные тепловые потери с  $1 \text{ м}^2$  поверхности обмуровки котла

$$q_{\Sigma} = q_l + q_k = 483,3 + 315 = 798,3 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

За 1 час  $1 \text{ м}^2$  вертикальной поверхности обмуровки котла теряет теплоты:

$$Q_{\tau\Sigma} = q_{\Sigma} \cdot F \cdot \tau = 798,3 \cdot 1 \cdot 3600 = 2,9 \text{ МДж}.$$

*Ответ:* 2,9 МДж.

2. Паропровод наружным диаметром  $150 \text{ мм}$  расположен в большом помещении с температурой воздуха  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура поверхности паропровода  $325 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить тепловые потери с единицы длины паропровода за счет излучения и конвекции. Степень черноты поверхности паропровода  $0,8$ . Температуру стен помещения можно принять равной температуре воздуха.



*Решение.*

Тепловые потери излучением с 1 м паропровода

$$q_{l,l} = \varepsilon_1 \sigma_o (T_1^4 - T_2^4) \pi d = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (598^4 - 298^4) \cdot 3,14 \cdot 0,15 = 2564,9 \text{ Вт/м.}$$

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией применим формулу для свободной конвекции около горизонтальной трубы при ламинарном режиме течения ( $Ra = 10^3 \div 10^8$ ) [3]:

$$Nu = 0,5 Ra^{0,25} \varepsilon_t.$$

Критерий Рэлея рассчитывают по формуле

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g R_o^3}{\nu^2} \beta (T_w - T_f) \cdot Pr,$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа;  $Pr$  – критерий Прандтля;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R_o = d_n$  – определяющий размер;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $T_w = T_1$  – температура поверхности паропровода;  $T_f = T_2$  – температура воздуха в помещении (равна температуре стен помещения);  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, для газов рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T_o + 273},$$

где  $T_o = T_f$  – определяющая температура.

Поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25},$$

где  $Pr_f$  – критерий Прандтля, определяется при температуре текучей среды (температуре воздуха в помещении);  $Pr_w$  – критерий Прандтля, определяется при температуре поверхности стенки (температуре поверхности паропровода).

Найдем критерий Рэлея:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{gR_o^3}{\nu^2} \beta(T_1 - T_2) \cdot Pr =$$

$$= \frac{9,81 \cdot 0,15^3}{(15,53 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{25 + 273} (325 - 25) \cdot 0,702 = 97015690,$$

где  $\nu = 15,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $Pr = 0,702$  найдем по табл. ПЗ.

Тогда критерий Нуссельта равен:

$$Nu = 0,5 Ra^{0,25} \varepsilon_t = 0,5 \cdot 97015690^{0,25} \left( \frac{0,702}{0,678} \right)^{0,25} = 49,6.$$

Заметим, что для газов поправка  $\varepsilon_t \approx 1$ .

Коэффициент конвективной теплоотдачи находим, зная критерий  $Nu$ :

$$\alpha_\kappa = \frac{Nu \cdot \lambda}{R_o} = \frac{49,6 \cdot 2,63 \cdot 10^{-2}}{0,15} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, определяется при температуре текущей среды (см. по табл. ПЗ).

Тепловые потери конвекцией с 1 м паропровода

$$q_{l\kappa} = \alpha_\kappa (T_1 - T_2) \pi d = 8,7 (325 - 25) \cdot 3,14 \cdot 0,15 = 1229,3 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Суммарные тепловые потери с 1 м паропровода

$$q_\Sigma = q_{l\lambda} + q_{l\kappa} = 2564,9 + 1229,3 = 3794,2 \text{ Вт}/\text{м}.$$

*Ответ:* 3794,2 Вт/м.

3. Плоская стенка с температурой  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  теряет теплоту излучением и конвекцией  $2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Определить коэффициент теплоотдачи излучением, если коэффициент теплоотдачи конвекцией  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Температура окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Решение.*

Суммарные тепловые потери рассчитывают по формуле

$$q_\Sigma = \alpha_\Sigma (T_1 - T_2).$$

Следовательно, суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением

$$\alpha_{\Sigma} = q_{\Sigma} / (T_1 - T_2) = 2000 / (100 - 20) = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Зная коэффициент теплоотдачи конвекцией, найдем коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\Sigma} - \alpha_{\text{к}} = 25 - 10 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

*Ответ:* 15 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4. Определить коэффициент теплоотдачи излучением от нагретой проволоки с температурой 600 °С и степенью черноты 0,7, если температура ограждений равна 30 °С.

*Решение.*

Коэффициент теплоотдачи излучением рассчитаем по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon \sigma_o (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} = \frac{0,7 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (873^4 - 303^4)}{600 - 30} = 39,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

*Ответ:* 39,9 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

5. Для измерения температуры горячего воздуха, протекающего по каналу, в поток помещена термопара. Вторичный прибор, присоединенный к термопаре, показывает 200 °С. Степень черноты спая термопары и стенок канала одинаковы и равны 0,8, а температура стенок канала 100 °С. Коэффициент конвективной теплоотдачи от потока к спаю равен 45 Вт/(м<sup>2</sup> К). Определить ошибку в показаниях термопары, которая возникает в результате лучистого теплообмена между спаем и стенками и действительную температуру горячего воздуха.

*Решение.*

Для стационарного теплового состояния горячего спая термопары уравнение теплового баланса записывается следующим образом:

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{л}}$$

или

$$\alpha(T_f - T_1)F = \varepsilon \sigma_o (T_1^4 - T_2^4)F,$$

где  $F$  – площадь поверхности горячего спая.

Таким образом, ошибка в показаниях термопары составляет:

$$\delta T = T_f - T_1 = \frac{\varepsilon \sigma_o}{\alpha} (T_1^4 - T_2^4) = \frac{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}{45} (473^4 - 373^4) = 30,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тогда истинная температура горячего воздуха

$$T_f = T_1 + \delta T = 200 + 30,9 = 230,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

*Ответ:* 30,9 °С; 230,9 °С.

6. Изолированный паропровод с наружным диаметром изоляции 200 мм расположен в большом помещении. Температура стен помещения принимается равной температуре воздуха в помещении и составляет 25 °С. Температура поверхности изоляции паропровода 150 °С. Степень черноты изоляции 0,7. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху равен 8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить суммарные тепловые потери с единицы длины паропровода за счет излучения и конвекции.

*Ответ:* 1230,1 Вт/м.

7. Определить долю теплоотдачи излучением в составе суммарной теплоотдачи (конвекцией и излучением) при нагревании помещения с температурой 25 °С радиатором водяного отопления. Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура поверхности радиатора 70 °С, степень черноты радиатора 0,75.

*Ответ:* 0,36.

8. Определить, какую долю от общей теплоотдачи (излучением и конвекцией) 660 Вт/м<sup>2</sup> составляет плотность теплового потока излучением от отопительного паропровода, если температура его поверхности 90 °С, степень черноты 0,85, а температура стен помещения большой площади 20 °С.

*Ответ:* 0,73.

9. Аппарат цилиндрической формы диаметром 1 м и длиной 2 м с шероховатой стальной поверхностью находится в помещении, стены которого выкрашены масляной краской. Размеры помещения 3×8×5 м, температура воздуха в помещении 20°С; температура на поверхности аппарата 65°С. Найти потерю теплоты аппаратом путем излучения, считая температуру стен помещения равной температуре воздуха. Определить суммарную потерю теплоты за счет излучения и конвекции.

*Указание.*

Степень черноты стен помещения, выкрашенных масляной краской, принимают по справочным данным (прил. 1). Принимаем 0,92. Сталь шероховатая (прил. 1) имеет степень черноты 0,96.

*Ответ:*  $Q_l = 2418,8 \text{ Вт}$ ;  $Q_\Sigma = 3378,7 \text{ Вт}$ .

10. Две горизонтальные стальные трубы с шероховатой поверхностью длиной 5 м диаметром 300 и 150 мм соответственно нагреты до одинаковой температуры  $400^\circ\text{C}$ . Найти потери теплоты излучением от каждой трубы, если температура окружающего воздуха и ограждений равна  $20^\circ\text{C}$ . Сравните тепловые потери излучением с тепловыми потерями за счет свободной конвекции воздуха около труб.

*Указание.*

Степень черноты шероховатой стали принимают по справочным данным (прил. 1). Принимаем 0,96.

*Ответ:*  $Q_{л1} = 50730,1 \text{ Вт}$ ;  $Q_{л2} = 2511,5 \text{ Вт}$ ;  $Q_{к1} = 14079,7 \text{ Вт}$ ;  
 $Q_{к2} = 8371,6 \text{ Вт}$ .

11. Внутри холодильной камеры с температурой  $T_1 = -3^\circ\text{C}$  проложен трубопровод, по которому циркулирует холодильный агент. Трубопровод покрыт инеем, на поверхности которого температура равна  $T_2 = -23^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи излучением от воздуха к трубе. Для инея степень черноты принять равной 0,83.

*Ответ:*  $3,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

12. Степень черноты вольфрамовой проволоки при температуре 2200 К равна 0,3. Определить, каким был коэффициент лучистой теплоотдачи при этой температуре на поверхности проволоки, если поверхность ограждения имела температуру 290 К. Поверхность проволоки мала по сравнению с поверхностью ограждения.

*Ответ:*  $208,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

13. Нихромовая проволока нагрета до температуры  $980^\circ\text{C}$ . Рассчитать коэффициент теплоотдачи излучением с поверхности проволоки, если нагреватель расположен в большом помещении, а температура ограждений  $22^\circ\text{C}$ . Степень черноты нихромовой проволоки принять равной 0,82.

*Ответ:*  $119,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

14. Определить коэффициент теплоотдачи излучением от нагретой проволоки, если ее температура и степень черноты соответственно равны  $700^{\circ}\text{C}$  и  $0,75$ , а температура ограждений  $30^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $56,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

15. Найти коэффициент теплоотдачи излучением в критическом сечении сопла жидкостного реактивного двигателя, если известно, что критический диаметр равен  $100 \text{ мм}$ . Общее давление газов  $100 \text{ кПа}$ , парциальные давления водяных паров  $6,7 \text{ кПа}$  и углекислого газа  $2,2 \text{ кПа}$ . Средняя температура газов по сечению  $1800^{\circ}\text{C}$ , средняя температура стенки сопла  $600^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $52,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

16. Определить коэффициент лучисто-конвективной теплоотдачи и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром  $200 \text{ мм}$ , если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны  $500^{\circ}\text{C}$  и  $0,79$ , а температура стен и окружающего воздуха  $25^{\circ}\text{C}$ .

*Ответ:*  $42,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

17. Горизонтальный нихромовый электропровод охлаждается посредством лучистого теплообмена и теплоотдачи при естественной конвекции воздуха. Определить силу тока  $I$ , протекающего в проводе, если температура провода  $1000^{\circ}\text{C}$ , его степень черноты  $0,85$ , диаметр провода  $3 \text{ мм}$ , температура окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и удельное сопротивление нихрома  $1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

*Указание.*

Электрический ток силой  $I$  создает тепловой поток, который отводится от провода посредством лучистого теплообмена и теплоотдачи при естественной конвекции воздуха. По закону сохранения энергии

$$W = Q;$$

$$W = I^2 R = I^2 \frac{\rho_{эл} l}{f};$$

$$Q = (q_{л} + q_{к}) F.$$

Таким образом,

$$I^2 \frac{\rho_{эл} l}{f} = (q_l + q_k) \pi d l,$$

$$\text{или } I^2 \frac{\rho_{эл}}{\frac{\pi d^2}{4}} = (q_l + q_k) \pi d .$$

Из последнего выражения необходимо выразить силу тока.

*Ответ:* 95,1 А.

18. По условиям эксплуатации температура горизонтального нихромового неизолированного провода с диаметром 4 мм не должна превышать 600°C. Провод охлаждается за счет лучисто-конвективного теплообмена. Определить максимально допустимую силу тока, если температура воздуха 30°C, удельное сопротивление нихромового провода 1,2 Ом·мм<sup>2</sup>/м, степень черноты 0,9.

*Ответ:* 75,7 А.

19. Ртутный термометр в холодильной камере показал температуру –20°C. Степень черноты стекла термометра 0,88. Температура стенки холодильной камеры равна –15°C. Определить ошибку в показаниях термометра, которая возникает в результате лучистого теплообмена между стенками термометра и холодильной камеры, и действительную температуру воздуха. Принять коэффициент конвективной теплоотдачи между термометром и воздухом в камере 5,5 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

*Ответ:* 3,0 °С; –17 °С.

20. Температура воздуха в помещении измеряется ртутным термометром. Термометр показывает 23 °С. Температура стен помещения равна 20 °С. Оценить ошибку в показаниях термометра, которая возникает за счет лучистого теплообмена между термометром и стенами помещения, и действительную температуру воздуха, приняв степень черноты стекла равной 0,94, а коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности термометра 5,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

*Ответ:* 3,0 °С; 26,0 °С.

21. Для измерения температуры горячего газа, движущегося по каналу, установлена термопара. Вторичный прибор, присоединенный к термопаре, показывает 450°C, степень черноты горячего спая термопары 0,8; температура стенок канала при стационарном режиме 350°C. Коэффициент теплоотдачи от потока газа к поверхности спая 55,6 Вт/( м<sup>2</sup>·К). Определить

ошибку в показании термопары, которая возникает вследствие лучистого теплообмена между спаем и стенками канала, и действительную температуру газа.

*Ответ:* 100,0 °C; 550,0 °C.



### 3. ЗАДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

В данном разделе приведены задачи повышенной сложности из различных пособий, которые нам показались особенно интересными для решения студентами теплоэнергетических специальностей.

1. В теплообменном аппарате кипит раствор при температуре  $120^{\circ}\text{C}$ . Стенка аппарата сделана из титанового листа толщиной 2 мм и изолирована снаружи слоем асбослюда толщиной 45 мм. Определить температуру воздуха в помещении, если температура на внешней поверхности изоляции  $40^{\circ}\text{C}$ , а теплота передается от неё излучением и конвекцией. Принять температуру на внутренней поверхности стенки равной температуре раствора [6].

*Ответ:*  $9,0^{\circ}\text{C}$ .

2. Плоская вертикальная стена сушилки, находящейся в закрытом помещении, изготовлена из стального листа толщиной 5 мм и длиной 3 м. Внутренняя поверхность стенки омывается продольным потоком воздуха, нагретым до средней температуры  $85^{\circ}\text{C}$ . Скорость воздуха 2,5 м/с. Чтобы уменьшить теплопотери в окружающую среду, температура которой  $18^{\circ}\text{C}$ , стенка снаружи изолирована 30-миллиметровым слоем ньювеля, так что на внешней поверхности изоляции установилась температура  $45^{\circ}\text{C}$ . Определить в условиях лучисто-конвективного теплообмена коэффициент теплопередачи через изолированную стенку и потери теплоты с  $1\text{ м}^2$  стенки в окружающую среду [6].

*Ответ:*  $2,12\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ ;  $314\text{ Вт}/\text{м}^2$ .

3. Электрический ток проходит по проводу диаметром 2 мм, нагревая его до  $440^{\circ}\text{C}$ . Приборы показали силу тока 20 А и сопротивление провода 0,8 Ом. Провод охлаждается за счет теплообмена излучением, а также поперечным потоком воздуха, обдувающим провод со скоростью 3 м/с. Температура воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ . Найти степень черноты провода, считая температуру окружающего провод ограждения  $20^{\circ}\text{C}$  [6].

*Ответ:* 0,794.

4. Сосуд, имеющий двойные стенки, наполнен жидким кислородом. Обе стенки покрыты слоем серебра, степень черноты которого 0,02. Воздух из объема между этими стенками откачан. Температуры внутренней поверхности внешней стенки и внешней поверхности внутренней стенки равны соответственно  $20^{\circ}\text{C}$  и  $-183^{\circ}\text{C}$ .

Определить тепловой поток через стенки сосуда, если площадь его поверхности равна  $0,03 \text{ м}^2$ . Определить эквивалентную толщину цилиндрического слоя пробковой теплоизоляции, если диаметр сосуда равен  $100 \text{ мм}$  [7].

*Ответ:*  $0,126 \text{ Вт}$ ;  $0,33 \text{ м}$ .

5. Жидкость при температуре  $370 \text{ К}$  налита в сосуд Дьюара. Стенки сосуда, отражение между которыми можно считать зеркальным, покрыты алюминием со степенью черноты  $0,04$ . Температура внутренней поверхности стенки равна температуре жидкости, температура наружной поверхности стенки равна  $290 \text{ К}$ . Найти толщину изоляционного слоя, которым можно было бы заменить излучающие стенки, чтобы теплоизоляционные свойства сосуда остались без изменений для трех случаев: а) изоляционный материал – войлок ( $\lambda = 0,0377 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ); б) изоляционный материал – пробка прессованная ( $\lambda = 0,066 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ); в) изоляционный материал – асбестовая ткань ( $\lambda = 0,126 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) [8].

*Ответ:*  $223 \text{ мм}$ ;  $391 \text{ мм}$ ;  $747 \text{ мм}$ .

6. В сосуд Дьюара налита жидкость с температурой  $87^\circ\text{С}$ . Стенки сосуда посеребрены: степень черноты серебра  $0,02$ .

Температура внутренней поверхности равна температуре жидкости, температура внешней стенки равна температуре наружной среды  $17^\circ\text{С}$ . Полагая, что отражение между стенками зеркальное, определить толщину изоляционного слоя, которым можно было бы заменить посеребренные стенки, чтобы теплоизоляционные свойства остались без изменений. Материал слоя изоляции – шерстяной войлок ( $\lambda = 0,055 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) [11].

*Ответ:*  $0,705 \text{ м}$ .

7. В термосе ( $d_1 = 80 \text{ мм}$ ,  $d_2 = 90 \text{ мм}$ ,  $l = 300 \text{ мм}$ ) находится вода с температурой  $95^\circ\text{С}$ . Степень черноты стенок термоса  $0,02$ . Температура окружающего воздуха  $20^\circ\text{С}$ . Коэффициенты конвективной теплоотдачи со стороны воды  $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , суммарный (за счет конвекции и излучения) со стороны воздуха  $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Найти потери теплоты через боковую поверхность термоса [12].

*Ответ:*  $0,5 \text{ Вт}$ .

8. Изделие, ограниченное плоскими поверхностями ( $A=0,02$ ), необходимо изолировать так, чтобы тепловые потери не превышали  $50,85 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , а температура на внешней поверхности изоляции ( $A=0,02$ ) была равна  $30^\circ\text{С}$ . Температура изделия  $700^\circ\text{С}$ . Рассчитать число экранов экранно-вакуумной

тепловой изоляции. Какой должна быть при этом толщина изоляции из асбеста, если  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [12].

*Ответ:* 10, 2,6 м.

9. Температура дымовых газов в циклонной цилиндрической камере диаметром 1,6 м равна 1700 К, а их состав следующий: 16 % углекислого газа, 9 % водяного пара. Обмуровка камеры выполнена из материала с коэффициентом теплопроводности  $0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Толщина обмуровки 500 мм, а её степень черноты 0,7. Приняв допущение о том, что газ является серой средой, а цилиндр бесконечно длинный, найти температуру внутренней и наружной поверхностей обмуровки. Температура воздуха в помещении  $30^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи к воздуху  $18 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Конвективный теплообмен внутри камеры не учитывать. Давление газов 0,1 МПа [12].

*Ответ:*  $1417^\circ\text{C}$ ;  $50^\circ\text{C}$ .

## Приложения

### Приложение 1

Интегральная степень черноты для различных материалов [5, 9]

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

Продолжение табл. П1

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
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 Окисленный при 600 °С	225–375 200–600	0,07–0,087 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 Лента Нить Проволока	225–625 925–1115 25–1230 225–1375	0,054–0,104 0,12–0,17 0,036–0,192 0,073–0,182
Ртуть очень чистая	0–100	0,092–0,12
Свинец: Серый окисленный Окисленный при 200 °С	25 200	0,281 0,63
Серебро полированное чистое	225–625	0,0198– 0,0324
Хром	100–1000	0,08–0,26
Цинк (99,1%): Полированный Окисленный при 400 °С	225–325 400	0,045–0,053 0,11
Оцинкованное листовое железо: Блестящее Серое окисленное	28 24	0,228 0,276
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 Динасовый неглазурованный, шероховатый Динасовый глазурованный, шероховатый Шамотный глазурованный Огнеупорный	20 100 1100 1100 –	0,93 0,80 0,85 0,75 0,8–0,9

Окончание табл. П1

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
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 $325^\circ\text{C}$	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

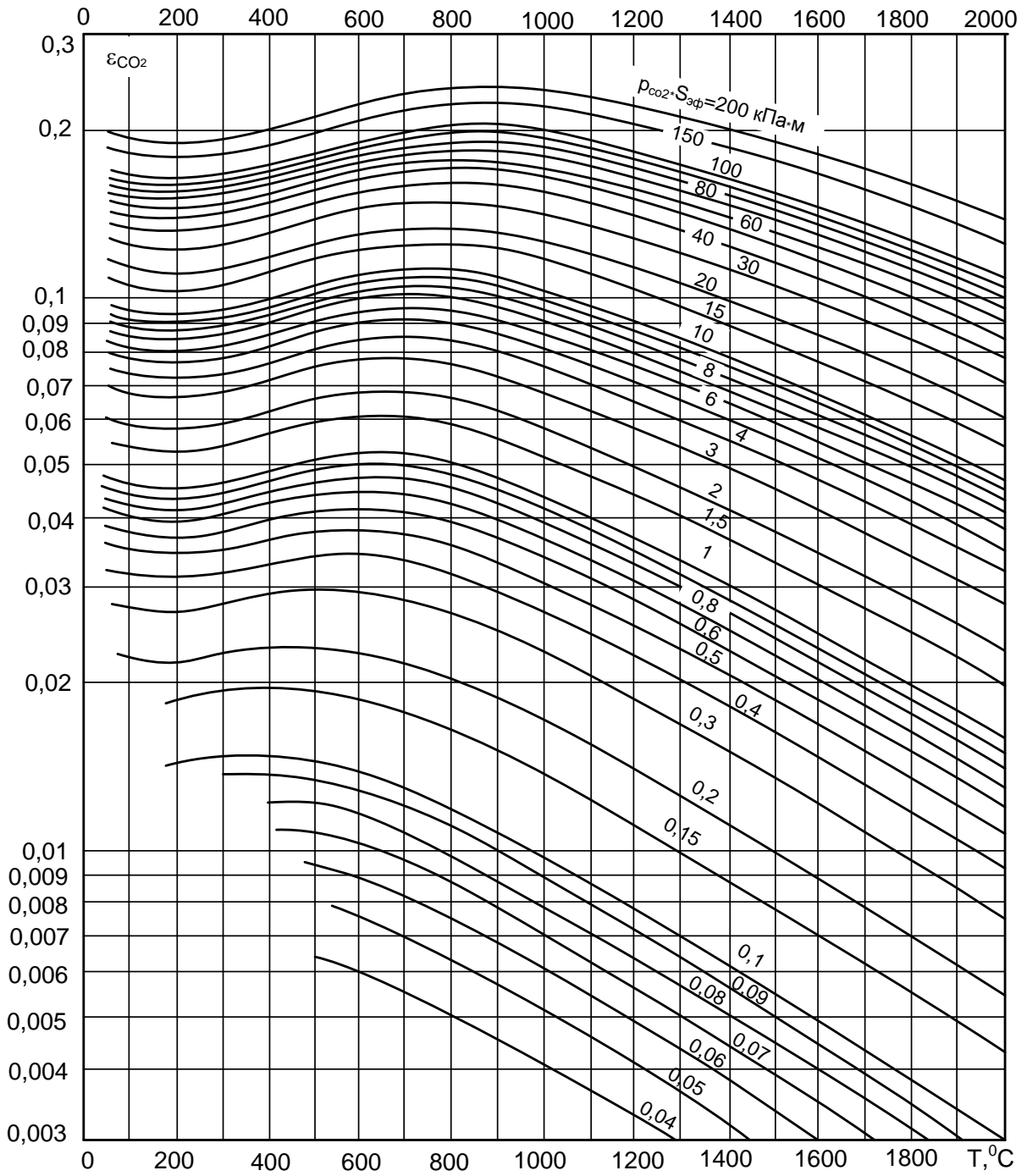


Рис. 1 П2. Степень черноты двуокиси углерода [13]

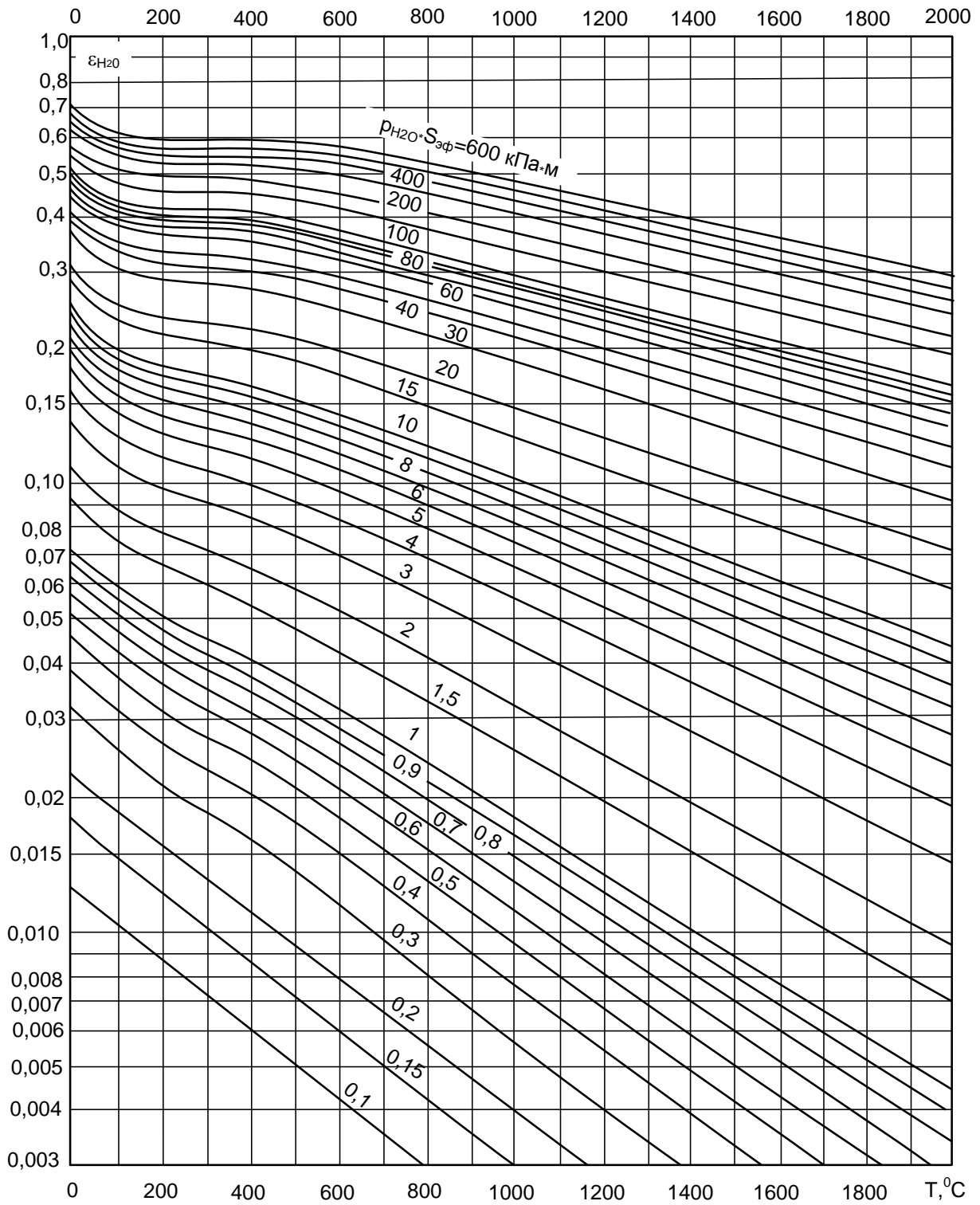


Рис. 2 П2. Степень черноты водяного пара [13]



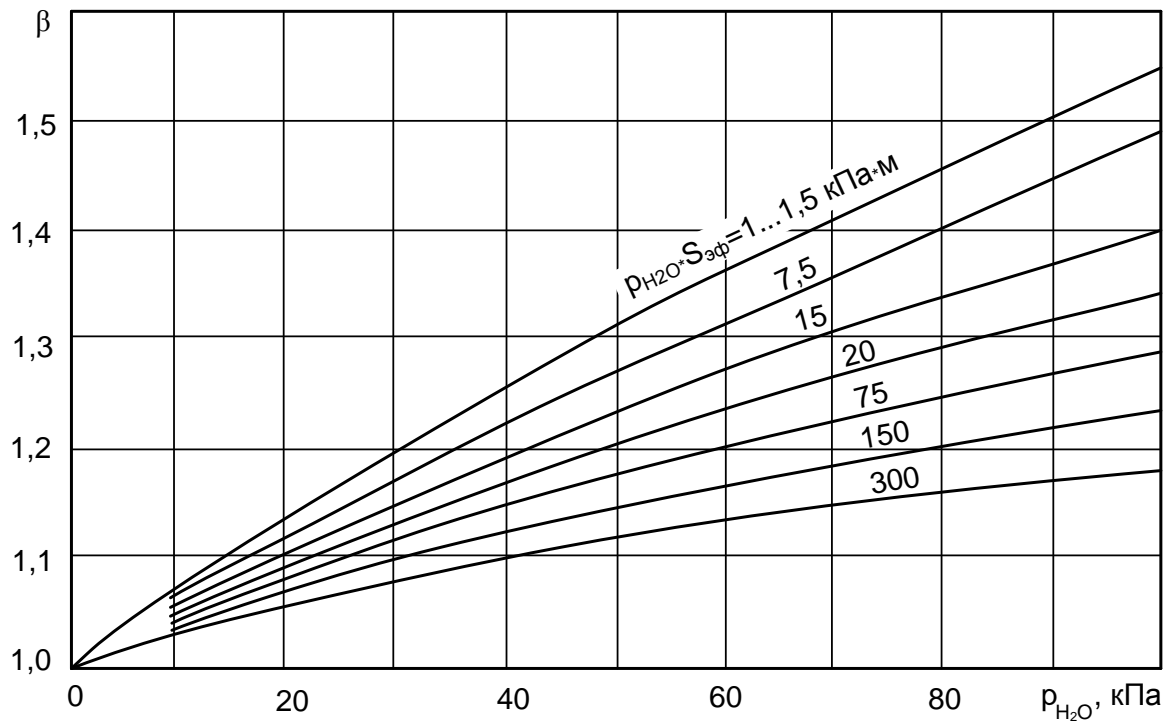


Рис.3 П2. Поправочный коэффициент  $\beta$  на парциальное давление для водяного пара [13]

*Приложение 3*

Физические свойства сухого воздуха при  $p_b = 760$  мм рт. ст. [5]

$T,$ $^{\circ}\text{C}$	$\rho,$ $\text{кг/м}^3$	$c_p,$ $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda\cdot 10^2,$ $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a\cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\mu\cdot 10^6,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu\cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$Pr$
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,06	1,005	2,9	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,1	0,69
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,8	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26	34,85	0,68
250	0,674	1,038	4,27	61	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,6	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,5	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,21	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

## Список литературы

1. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос.службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.
2. Бухмиров В.В. Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново, 2011. – 68 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. 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.
5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. ред. чл.- корр. РАН А.В.Клименко и проф. В.М.Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 564 с. – (Теплотехника и теплоэнергетика; Кн. 2)
6. Авчухов В.В., Паюсте Б.Я. Задачник по процессам тепломассообмена: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
7. Воскресенский К.Д. Сборник расчетов и задач по теплопередаче. – М., 1959. – 336 с.
8. 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.
9. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
10. Сборник задач и расчетов по теплопередаче/ Данилова Г.Н., Филаткин В.Н. и др. – М.: Государственное издательство торговой литературы. – 1961. – 272 с.
11. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче/ под. ред. Юдаева Б.Н., изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Изд. «Высшая школа», 1968. – 371 с.
12. 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.
13. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.

ПАКЕТ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛУ "РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН"  
КУРСА ТМО

Методические указания

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович  
СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна  
Редактор Соловьева Т.В.

Подписано в печать . Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать плоская. Усл.печ.л. 3,95. Тираж 100 экз. . Заказ № .  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И.Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34