

**Киселева Е. С.**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики,  
Кубанский государственный технологический университет

**Федоров А. А.**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики,  
Кубанский государственный технологический университет

## **ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН В БЕЗИНЕРЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ**

### **Аннотация**

*В данной работе проведено исследование работы печи эллиптического сечения и выполнены численные расчеты для второй смешанной и фундаментальной постановок задач о лучистом теплообмене, а также оценена роль прямого и косвенного излучения в работе электропечи.*

*Применение указанного метода позволяет произвести численное исследование и всесторонний анализ тепловой работы нагревательных устройств. Разнообразие математических методов, используемых в теории лучистого теплообмена, определяется многообразием ее применения в различных областях естествознания и техники и прежде всего в астрофизике, высокотемпературной теплофизике, теплоэнергетике, теплотехнике различного рода промышленных печей, ядерной энергетике, авиационной и космической технике.*

**Ключевые слова:** лучистый теплообмен, электропечь сопротивления, замкнутая излучающая система.

**Keywords:** radiant heat exchange, resistance electric furnace, the closed radiating system.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Теория переноса излучения и лучистого теплообмена представляет собой одну из важнейших областей общей теории необратимых процессов. В России разработана математическая строгая общая теория переноса излучения и лучистого теплообмена. В связи с разработкой проблем теории переноса излучения и лучистого теплообмена, связанных с различными и многообразными ее приложениями, созданы научные школы, разрабатывающие и развивающие научные направления в этой области.

К числу основных и важнейших направлений дальнейших теоретических исследований проблем лучистого теплообмена следует отнести развитие и широкое применение обобщенного зонального метода теории лучистого теплообмена к определению основных характеристик поля излучения в излучающих системах различной конфигурации, заполненных диатермической, поглощающей и анизотропно рассеивающей средой.

### 1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПЕЧИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рабочее пространство исследуемой электропечи сопротивления представляет собой полый цилиндр эллиптического сечения конечной высоты (рис. 1).

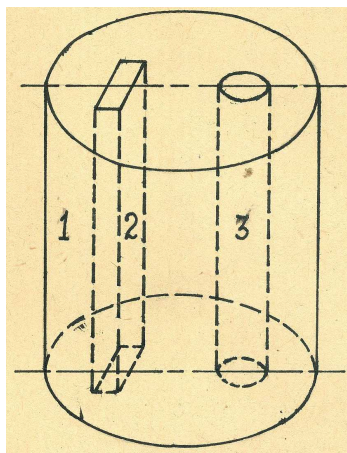


Рисунок 1 – Электропечь эллиптического сечения.

В одном из фокусов размещен нагреватель 3 в виде стержня круглого

сечения, образующие которого параллельны образующим эллиптического цилиндра. В другом фокусе – изделие 2 в виде полосы прямоугольного сечения, параллельной образующим нагревателя. Внутренняя поверхность эллиптического цилиндра (футеровка 1) выполнена из полированной меди, которая с внешней стороны обмывается проточной водой при постоянной температуре  $T_1$ . Нагреватель представляет собой графитовый стержень, через который пропускается переменный электрический ток. Он нагревается до температуры  $T_3$ . Лучистая энергия, излучаемая нагревателем, передается непосредственно прямым излучением и косвенно – посредством отражения от футеровки к изделию, которое находится под действием сжатия или растяжения.

Температура футеровки  $T_1$  посредством регулировки потока воды через ее полые стенки поддерживается постоянной порядка 300-320 К. По расходу воды, температуре входа и выхода ее можно определить потери тепла через футеровку  $Q_{рез.1}$ , а по потребляемой мощности нагревателем можно определить результирующий поток нагревателя  $Q_{рез.3}$ .

На основании закона сохранения энергии легко определить результирующий тепловой поток  $Q_{рез.2}$ , а следовательно, и коэффициент полезного действия печи и коэффициент потерь тепла через футеровку. Рабочее пространство электропечи вакуумируется до давления  $133 \cdot 10^{-4}$  Па, а также может быть заполнено различными инертными газами.

Исследовалась электропечь предназначенная для экспериментального исследования зависимости упругих свойств металлов и сплавов от температуры. Её следовало бы рассматривать как замкнутую излучающую систему тел, состоящую из зеркальных диффузных поверхностей, обладающих селективными свойствами, разделенных как диатермической, так и селективно поглощающей и изотропно рассеивающей средой. Решение задачи в такой общей постановке связано со сложными расчетами. Однако, решение данной задачи можно выполнить и в упрощенной постановке.

Электропечь рассматривается как замкнутая излучающая система, состоящая из трех оптически однородных серых тел, разделенных диатермической средой.

## 2. ИСХОДНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ И ВЫРАЖЕНИЯ

На основании зонального метода расчета лучистого теплообмена в высокотемпературных промышленных электрических печах в работе [1] дан анализ тепловой работы безинерционной электропечи сопротивления. В данной работе проведено исследование работы печи эллиптического сечения и выполнены численные расчеты для второй смешанной и фундаментальной постановок задач о лучистом теплообмене, а также оценена роль прямого и косвенного излучения в работе электропечи.

Вторая постановка смешанной задачи о лучистом теплообмене заключается в том, что по заданным температуре футеровки  $T_1$ , результирующих лучистых потоков всех трех тел системы ( $Q_{рез.1}$ ,  $Q_{рез.2}$ ,  $Q_{рез.3}$ ), оптических констант тел  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), геометрическим размерам и взаимным расположениям тел печи требуется определить температуру изделия  $T_1$  и нагревателя  $T_3$ . Такая постановка задачи сформулирована и решена в работах [2-3] для излучающей системы произвольной геометрической конфигурации. В этом случае с учетом вогнутости тела 1 для температуры изделия  $T_2$  и нагревателя  $T_3$  получены расчетные формулы [3]:

$$T_2 = \sqrt[4]{\frac{A_1 \gamma_1 \tilde{D}_{31} Q_{рез.2} - A_2 D_{32} Q_{рез.1}}{G_0 A_1 A_2 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{21} F_2} + T_1^4} ; \quad (1)$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{A_3 \tilde{D}_{23} Q_{рез.2} - A_2 D_{12} Q_{рез.2}}{G_0 A_1 A_3 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{23} F_3} + T_1^4} , \quad (2)$$

где  $D_{12} = \varphi_{12} + R_3 \varphi_{23} \varphi_{31}$ ;  $D_{32} = \varphi_{32} + R_2 \varphi_{32} \varphi_{12}$ ;  $\tilde{D}_{23} = \varphi_{23} + R_1 \gamma_1 \varphi_{12} \varphi_{23}$ ;

$$\tilde{D}_{31} = \varphi_{31} + \gamma_1 R \varphi_{31} \varphi_{12}; \quad (3)$$

$$\tilde{\varphi}_{21} = \varphi_{21}(\varphi_{31} + \varphi_{32}) + \varphi_{23} \varphi_{31}; \quad \tilde{\varphi}_{23} = \varphi_{23}(\varphi_{12} + \varphi_{13}) + \varphi_{21} \varphi_{13},$$

где  $\gamma_l = \frac{1}{1-R_l\varphi_{11}}$  – коэффициент многократных отражений футеровки;

$\varphi_{ik}$  – осредненный коэффициент излучения между телами  $i$  и  $k$ .

$A_1, A_2, A_3$  ( $R_1, R_2, R_3$ ) – поглощательные и, соответственно, отражательные способности тел;

$F_1, F_2, F_3$  – поверхности соответствующих тел печи;

$G_0$  – постоянная Стефана-Больцмана.

По закону сохранения энергии для результативных тепловых потоков тел имеем:

$$Q_{рез.3} = - Q_{рез.1} - Q_{рез.2} \quad (4)$$

или

$$I = L + \beta, \quad (5)$$

где  $\alpha = -\frac{Q_{рез.2}}{Q_{рез.3}}$  коэффициент полезного действия печи; (6)

$\beta = -\frac{Q_{рез.1}}{Q_{рез.3}}$  коэффициент потерь тепла через футеровку. (7)

Формулы (1) и (2) с учетом (6) и (7) можно записать в виде:

$$T_2 = \sqrt[4]{\frac{A_2 \tilde{D}_{32}(\alpha-1) + A_1 \gamma_1 \alpha D_{31}}{G_0 A_1 A_2 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{12}} Q_{рез.3} + T_1^4}; \quad (8)$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{A_3 \tilde{D}_{23}(\alpha-1) + A_1 \gamma_1 \alpha D_{21}}{G_0 A_1 A_3 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{13}} Q_{рез.3} + T_1^4}. \quad (9)$$

В безразмерной (критериальной) форме формулы (8) и (9) принимают вид:

$$\vartheta_{21} = \frac{G_0(T_2^4 - T_1^4)}{E_{рез.3}} = \frac{A_2 \tilde{D}_{32}(\alpha-1) + A_1 \gamma_1 \alpha D_{31}}{A_1 A_2 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{12}}; \quad (10)$$

$$\vartheta_{31} = \frac{G_0(T_3^4 - T_1^4)}{E_{рез.3}} = \frac{A_3 \tilde{D}_{23}(\alpha-1) + A_1 \gamma_1 \alpha D_{21}}{A_1 A_3 \gamma_1 \tilde{\varphi}_{12}}, \quad (11)$$

где  $E_{рез.3} = \frac{Q_{рез.3}}{F_3}$  – поверхностная плотность результирующего

излучения нагревателя.

Учитывая (10) и (11) формулам для температур изделия  $T_2$  и нагревателя  $T_3$  можно придать компактный вид:

$$T_2 = \sqrt[4]{\frac{\vartheta_{21}}{G_0} E_{рез.3} + T_1^4}; \quad (12)$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{\vartheta_{31}}{G_0} E_{рез.3} + T_1^4}. \quad (13)$$

Фундаментальная постановка задачи заключается в том, что по заданным температурам футеровки  $T_1$ , изделия  $T_2$  и нагревателя  $T_3$ , а также оптическим константам и геометрическим размерам необходимо определить поверхностные плотности результирующих излучений всех трех тел системы

$$E_{рез.1}, E_{рез.2}, E_{рез.3}.$$

Ниже приведены расчетные формулы для поверхностных плотностей результирующего излучения всех трех тел электропечи с учетом вогнутости футеровки:

$$E_{рез.1} = \frac{A_1 \gamma_1}{D_n} (A_2 D_{12} E_{21} + A_3 D_{13} E_{31}); \quad (14)$$

$$E_{рез.2} = \frac{A_2}{D_n} (A_1 \gamma_1 D_{21} E_{12} + A_3 D_{23} E_{32}); \quad (15)$$

$$E_{рез.3} = \frac{A_3}{D_n} (A_2 D_{32} E_{23} + A_1 \gamma_1 D_{31} E_{13}), \quad (16)$$

где  $D_{12} = \varphi_{12} + R_3 \varphi_{13} \varphi_{32}; \quad D_{23} = \varphi_{23} + R_1 \gamma_1 \varphi_{21} \varphi_{13};$

$$D_{13} = \varphi_{13} + R_2 \gamma_{12} \varphi_{12} \varphi_{23}; \quad D_{32} = \varphi_{32} + R_1 \gamma_1 \varphi_{12} \varphi_{31}; \quad (17)$$

$$D_{21} = \varphi_{21} + R_3 \varphi_{23} \varphi_{31}; \quad D_{31} = \varphi_{31} + R_2 \varphi_{21} \varphi_{32};$$

$$D_n = 1 - R_1 R_2 \gamma_1 \varphi_{21} \varphi_{12} - R_2 R_3 \varphi_{32} D_{23} - R_1 \gamma_1 R_3 \varphi_{31} D_{13}.$$

Формулы (14), (15), (16) можно записать в безразмерном виде для безразмерных плотностей результирующего излучения:

$$Q_{рез.1} = \frac{E_{рез.1}}{E_{32}} = \frac{A_1 \gamma_1}{D_n} (A_3 D_{13} \vartheta_{31} + A_2 D_{12} \vartheta_{21}); \quad (18)$$

$$Q_{рез.2} = \frac{E_{рез.2}}{E_{32}} = \frac{A_2}{D_n} (A_1 \gamma_1 D_{21} \vartheta_{12} + A_3 D_{23}); \quad (19)$$

$$Q_{рез.3} = \frac{E_{рез.3}}{E_{32}} = \frac{A_3}{D_n} (A_1 \gamma_1 D_{31} \vartheta_{13} - A_2 D_{32}), \quad (20)$$

$$\text{где } \vartheta_{21} = \frac{T_2^4 - T_1^4}{T_3^4 - T_2^4}; \quad \vartheta_{31} = \frac{T_3^4 - T_1^4}{T_3^4 - T_2^4}; \quad \vartheta_{12} = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_3^4 - T_2^4}.$$

По известным безразмерным результирующим плотностям излучения  $Q_{рез.i}$  легко определить поверхностные плотности результирующего излучения:

$$E_{рез.i} = G_0 Q_{рез.i} (T_3^4 - T_2^4). \quad (21)$$

Пользуясь полученными выше расчетными формулами, можно произвести расчет и исследовать отдельные составляющие части результирующего лучистого потока изделия  $Q_{рез.2}$ : прямой отдачи от источника излучения (нагревателя)  $Q_{рез.2}^I$ , косвенной отдачи посредством отражения от футеровки  $Q_{рез.2}^{II}$  и уменьшения результирующего потока в связи с потерями тепла через футеровку  $Q_{рез.2}^{III}$ :

$$Q_{рез.2} = Q_{рез.2}^I + Q_{рез.2}^{II} + Q_{рез.2}^{III}. \quad (22)$$

Для этого выражение  $Q_{рез.2}$  представим в виде:

$$Q_{рез.2} = \frac{A_2 A_3}{D_n} (\varphi_{12} + \varphi_{13}) \varphi_{23} F_2 E_{32} - \frac{A_2 A_3}{D_n} \varphi_{31} \varphi_{13} F_2 E_{32} + \frac{A_2 \tilde{D}_{12}}{D_n} F_1 E_{рез.1} \quad (23)$$

Отсюда находим коэффициенты прямой  $\rho_I$ , косвенной  $\rho_{II}$  отдачи и коэффициент уменьшения лучистой отдачи  $\rho_{III}$ , определяемые выражениями:

$$\rho_I = \frac{Q_{рез.2}^I}{Q_{рез.2}} = \frac{\varphi_{23} (\varphi_{12} + \varphi_{13})}{\tilde{\varphi}_{23}} \left( 1 + A_2 \varphi_{12} \frac{\beta}{1 - \beta} \right); \quad (24)$$

$$\rho_{II} = \frac{Q_{рез.2}^{II}}{Q_{рез.2}} = \frac{\varphi_{21} \varphi_{13}}{\tilde{\varphi}_{23}} \left( 1 + A_2 \varphi_{12} \frac{\beta}{1 - \beta} \right); \quad (25)$$

$$\rho_{III} = \frac{Q_{рез.2}^{III}}{Q_{рез.2}} = -A_2 \Phi_{12} \frac{\beta}{1 - \beta}; \quad \Phi_{12} = \frac{D_{12}}{D_n}, \quad (26)$$

$$\text{где } \tilde{\varphi}_{23} = \varphi_{23} (\varphi_{12} + \varphi_{13}) + \varphi_{21} \varphi_{13}; \quad \Phi_{12} = \frac{\varphi_{12} + R_3 \varphi_{13} \varphi_{32}}{A_2 D_{12} + A_3 D_{13}};$$

$$D_{13} = \varphi_{13} + R_1 \varphi_{12} \gamma_1 \varphi_{23}; \quad D_{12} = \varphi_{12} + R_3 \varphi_{13} \varphi_{32}.$$

Коэффициенты лучистой отдачи удовлетворяют равенству:

$$\rho_I + \rho_{II} + \rho_{III} = 1. \quad (27)$$

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕЖДУ ТЕЛАМИ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Угловой коэффициент излучения между изделием 2 и нагревателем 3  $\varphi_{23}$  можно рассмотреть как угловой коэффициент излучения между прямоугольником конечных размеров  $(d, h)$  и круглым цилиндром конечных размеров  $(\tau, h)$ , образующие которого параллельны плоскости прямоугольника и отстоят на расстоянии  $\delta = 2C$  от оси цилиндра. Упомянутый угловой коэффициент излучения определяется выражением:

$$\varphi_{23} = \frac{2}{Y} \int_0^{Y/2} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (28)$$

где

$$f(\varepsilon) = \frac{X}{X^2 + \varepsilon^2} - \frac{X}{\pi(X^2 + \varepsilon^2)} \left\{ \arccos \frac{B}{A} - \frac{1}{2Z} \left[ \sqrt{A^2 + 4Z^2} \arccos \left( \frac{B}{A\sqrt{X^2 + \varepsilon^2}} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \text{Barcsin} \left( \frac{1}{\sqrt{X^2 + \varepsilon^2}} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (29)$$

Здесь введем обозначения:

$$A = Z^2 + X^2 + \varepsilon^2 - 1; \quad B = Z^2 - X^2 - \varepsilon^2 + 1; \\ X = \frac{\delta}{\tau} = \frac{2C}{\tau}; \quad Y = \frac{d}{\tau}; \quad Z = \frac{h}{\tau}. \quad (30)$$

Остальные осредненные угловые коэффициенты излучения между телами электропечи легко определить на основании уравнения замкнутости и условия взаимности, которые имеют следующий вид [4]:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ k=1}}^3 \varphi_{ik} = 1; \quad \varphi_{ik} F_i = \varphi_{ki} F_k. \quad (31)$$

Угловые коэффициенты излучения в нашем случае определяются выражениями:



$$\begin{aligned}\varphi_{21} &= 1 - \varphi_{23}; & \varphi_{12} &= \frac{F_2}{F_1} \varphi_{21} = \frac{F_2}{F_1} (1 - \varphi_{23}); \\ \varphi_{32} &= \frac{F_2}{F_3} \varphi_{23}; & \varphi_{13} &= \frac{F_3}{F_1} \varphi_{31} = \frac{F_3}{F_1} \left(1 - \frac{F_2}{F_3} \varphi_{23}\right); \end{aligned} \quad (32)$$

$$\varphi_{31} = 1 - \varphi_{32} = 1 - \frac{F_2}{F_3} \varphi_{23}; \quad \varphi_{11} = 1 - (\varphi_{12} + \varphi_{13}) = 1 - \frac{F_2}{F_1} \left(1 + \frac{F_3}{F_2} - 2\varphi_{23}\right).$$

Таким образом, все угловые коэффициенты излучения между телами электропечи выражаются через угловой коэффициент излучения  $\varphi_{23}$  между изделием, нагревателем и поверхностями тел.

Поверхности тел электропечи  $F_1, F_2, F_3$  в нашем случае определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}F_1 &= 2\pi av - 2\pi\tau^2 + Lh = 2\pi(av - \tau^2) + Lh; \\ F_2 &= 2\pi dh; & F_3 &= 2\pi th, \end{aligned} \quad (33)$$

где  $L$  – периметр эллипса, определяемый выражением:

$$L = 2\pi a \left[ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \varepsilon^2 - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{\varepsilon^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \frac{\varepsilon^6}{5} - \dots \right] \quad (34)$$

или  $2\pi a L' = L,$

где

$$L' = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \varepsilon^2 - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{\varepsilon^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \frac{\varepsilon^6}{5} - \dots \quad (35)$$

Здесь  $\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$  – эксцентриситет эллипса.

Тогда для поверхности футеровки  $F_1$  можно получить выражение:

$$F_1 = 2\pi(av - \tau^2 + aL'h). \quad (36)$$

Если учесть, что радиус цилиндрического нагревателя  $r$  мал по сравнению с полуосями эллипса и высотой нагревателя  $h$ , то величиной  $\tau^2$  можно пренебречь, и получим:

$$F_1 = 2\pi a(b + L'h). \quad (37)$$

Для отношения поверхностей тел печи получим следующие выражения:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{dh}{a(\varepsilon + L'h)}; \quad \frac{F_2}{F_3} = \frac{d}{\tau}; \quad \frac{F_3}{F_1} = \frac{\tau h}{a(\varepsilon + L'h)}; \quad \frac{F_3}{F_2} = \frac{\tau}{h} \quad (38)$$

Выражения (32) с учетом (38) принимают вид:

$$\varphi_{21} = 1 - \varphi_{23}; \quad \varphi_{12} = \frac{dh}{a(\varepsilon + L'h)}(1 - \varphi_{23}); \quad \varphi_{32} = \frac{d}{\tau}\varphi_{23}; \quad \varphi_{13} = \frac{\tau h}{a(\varepsilon + L'h)}\left(1 - \frac{d}{\tau}\varphi_{23}\right);$$

$$\varphi_{31} = 1 - \frac{d}{\tau}\varphi_{23}; \quad \varphi_{11} = 1 - \frac{dh}{a(\varepsilon + L'h)}\left(1 + \frac{\tau}{h} - 2\varphi_{23}\right). \quad (39)$$

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Численные расчеты выполнены для следующих геометрических и энергетических параметров:

$$a = 10^{-1} \text{ м}, \quad r = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad A_1 = 0,2, \quad R_1 = 0,8,$$

$$\varepsilon = 8 \cdot 10^{-2}, \quad d = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad A_2 = 0,85, \quad R_2 = 0,15,$$

$$c = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad A_3 = 0,85, \quad R_3 = 0,15,$$

$$T_1 = 295 \text{ К} \approx 300 \text{ К}, \quad Q_{\text{рез.3}} = 10^3 \text{ Вт}.$$

Таблица 1. Коэффициент полезного действия печи  $\alpha$  и потерь тепла через футеровку  $\beta$  при  $A_2 = 0,85$ :

$\alpha$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\beta$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

$$F_1 = 0,8418, \quad F_2 = 0,00108, \quad F_3 = 0,001696,$$

$$\frac{F_2}{F_3} = 0,6366, \quad \frac{F_3}{F_2} = 1,57, \quad \frac{F_3}{F_1} = 0,02, \quad \frac{F_2}{F_1} = 0,01283.$$

Для осредненных угловых коэффициентов излучения получены следующие численные значения:

$$\varphi_{12} = 0,0127, \quad \varphi_{21} = 0,9886, \quad \varphi_{32} = 0,0072, \quad \varphi_{11} = 0,9673, \quad \varphi_{23} = 0,0114,$$

$$\varphi_{13} = 0,0200, \quad \varphi_{31} = 0,9928, \quad G_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}, \quad D_{21} = 0,9903,$$

$$D_{31} = 0,9938, \quad \tilde{D}_{23} = 0,08132, \quad \tilde{D}_{32} = 0,05177, \quad \tilde{\varphi}_{12} = 0,01283, \\ \tilde{\varphi}_{13} = 0,02015.$$

Таблица 2. Результаты численных расчетов температуры и результирующих потоков при  $Q_{рез.3} = 10^4 \text{ Вт}$

$\alpha$	$T_2, \text{ К}$	$T_3, \text{ К}$	$Q_{рез.1}, \text{ Вт}$	$Q_{рез.2}, \text{ Вт}$
0,1	873	1100	-1000	-9000
0,2	983	1178	-2000	-8000
0,3	1073	1191	-3000	-7000
0,4	1124	1224	-4000	-6000
0,5	1273	1323	-5000	-5000

Таблица 3. Результаты численных расчетов коэффициентов лучистой отдачи.

$\alpha$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
0,1	0,082	4,360	-3,442
0,2	0,047	2,483	-1,530
0,3	0,035	1,858	-0,893
0,4	0,029	1,545	-0,574
0,5	0,0254	1,357	-0,3824

## ВЫВОДЫ

По полученным формулам произведены численные расчеты. Сравнение теоретических и опытных данных, полученных на модели электрической печи сопротивления, согласованность результатов дают основание говорить о надежности и простоте обобщенного зонального метода. Результаты исследования имеют как научное, так и прикладное значение и могут быть использованы при проведении проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ, связанных с разработкой и расчетом рабочих камер

промышленных печей, топочных устройств и другой теплообменной аппаратуры промышленной теплоэнергетики.

#### **Литература:**

1. Суринов Ю.А., Киселева Е.С. Приближенный метод определения обобщенных угловых коэффициентов излучения. «Вопросы лучистого теплообмена». Труды КПИ. – Краснодар, 1989.
2. Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс. Теплообмен измерением. Ленинград: Изд-во «Энергия», 1971.
3. Суринов Ю.А. О зональном методе расчета лучистого теплообмена в высокотемпературных промышленных электрических печах. Труды УДН, том XII. Москва, 1965
4. Киселева Е.С., Федоров А.А. Исследования лучистого теплообмена в системах различных конфигураций. Технические науки в России и за рубежом. Материалы III международной научно-практической конференции (г. Москва) – 2014. – М.: Буки-Веди, 2014.