

Анализ режимов работы СОП свидетельствует о том, что модели правильно отображают характерные режимы работы системы и позволяют выполнять расчеты с достаточной точностью. Таким образом, модели могут быть использованы при разработке СОП.

Анализ электромагнитных процессов в СОП показал, что требуемое качество электромагнитных процессов в сетях переменного и постоянного напряжения обеспечивается при использовании многотактных схем преобразования, при повышении частоты ШИМ и ШИП, а также при установке RC-цепей на входе и выходе СОП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Р. Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.
2. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями // Электротехника. 2007. № 10. С. 41–45.
3. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Терещенков В. В. Управление многотактным активным выпрямителем экскаватора ЭКГ-35К // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 29–33.
4. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Хон А. Ю. Управление сверхпроводящим индуктивным накопителем энергии // Информационно-управляющие системы (науч. журн.). 2012. № 4 (59). С. 20–24.
5. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications / EPE-2011. En. URL: <http://www.epe-association.org/epe/index.php?main=/epe/documents.php%3Fcurrent=1979>.
6. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / ОАО «Электросила» СПб., 2003.
7. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
8. Пронин, М. В. Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многотактным активным выпрямителем // Электротехника. 2006. № 5. С. 55–61.

A. R. Mamutov, M. V. Pronin, A. G. Vorontsov

SIMULATION OF REVERSIBLE MULTISTAGE STATIC AC/DC VOLTAGE CONVERTER

The paper presents the models of reversible multistage static AC/DC voltage converter, which includes an active rectifier inverter and a converter. When simulating, the model is built up by decomposing the system into subsystems and mathematical representation thereof. The model-based analysis of the reversible converter operating modes is described. Furthermore, provided are recommendations for choosing a power converter structure and control algorithms.

Reversible converter, static converter voltage inverter, modeling methodology, active rectifier

УДК 621.365.69

В. В. Царевский, А. Ю. Печенков, С. А. Галуни

Перенос тепла излучением в газовых средах

Предложен способ доопределения системы линейных уравнений, описывающих теплообмен излучением в замкнутых пространствах из серых поверхностей, заполненных газом. Уравнение, доопределяющее систему, получено путем использования аналогии между электрическими токами в цепях и тепловыми потоками излучения в замкнутых системах серых поверхностей. Дано схематическое представление процесса.

Теплообмен излучением, серые поверхности, тепловое сопротивление, газовая среда

В первом приближении, для упрощения расчета стационарного теплообмена излучением, принимают, что все излучающие поверхности

непрозрачны, т. е. падающее на эти поверхности излучение не проходит через них. Процесс можно схематически представить, используя аналогию

между электрическими током в цепях и тепловыми потоками излучения [1]. Однако такие рабочие среды и тела, как газы и стекла, прозрачны, что усложняет анализ радиационной задачи необходимостью учета переноса через них энергии излучением.

Определим три наиболее важных потока, используемых при анализе:

- Φ_{ij} – поток энергии излучения, испущенного поверхностью i и поглощенного поверхностью j ;
- $(\Phi_{ij})_{рез}$ – результирующий поток энергии, которую нужно подвести к поверхности i для поддержания ее температуры постоянной;
- $\Phi_{(ij)}$ – результирующий поток теплообмена излучением между поверхностями i и j .

Рассмотрим вначале заполненную диатермической средой замкнутую систему из трех серых изотермических диффузных непрозрачных поверхностей. На основании закона излучения Кирхгофа и учитывая непрозрачность поверхности, имеем

$$\tau = 0, \quad \varepsilon = \alpha = 1 - \rho, \quad (1)$$

где τ – коэффициент пропускания; ε – коэффициент черноты; α – коэффициент поглощения; ρ – коэффициент отражения.

Обозначим плотности потоков излучения (рис. 1): q_{Gi} – плотность падающего на поверхность i теплового излучения; $\rho_i q_{Gi}$ – плотность отраженного от поверхности i теплового излучения; $\varepsilon_i q_{0i}$ – плотность собственного теплового излучения поверхности i . Тогда

$$q_{Ji} = \varepsilon_i q_{0i} + \rho_i q_{Gi}. \quad (2)$$

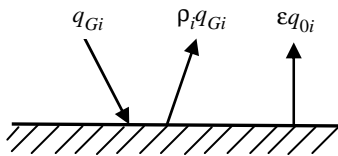


Рис. 1

Результирующий тепловой поток от серой поверхности i равен разности эффективного и падающего тепловых потоков:

$$(\Phi_i)_{рез} = A_i (q_{Ji} - q_{Gi}). \quad (3)$$

Подстановка (1) и (2) в (3) дает

$$(\Phi_i)_{рез} = \frac{q_{0i} - q_{Ji}}{\rho_i / (\varepsilon_i A_i)}, \quad (4)$$

где A_i – площадь поверхности i .

Если интерпретировать уравнение (4) как закон Ома, то его знаменатель представит собою тепловое сопротивление между двумя потенциалами q_{0i} и q_{Ji} (рис. 2). Сопротивление $R_{pi} = \rho_i / (\varepsilon_i A_i)$ обусловлено свойствами серой поверхности. Тепловая цепь для трех серых поверхностей, образующих замкнутую систему, изображена на рис. 3. Здесь тепловое сопротивление $R_{gij} = 1 / (A_i F_{ij})$ обусловлено тем, что не все излучение, идущее от поверхности i , достигает поверхности j .

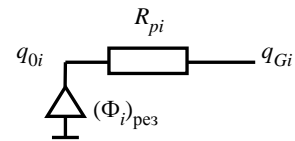


Рис. 2

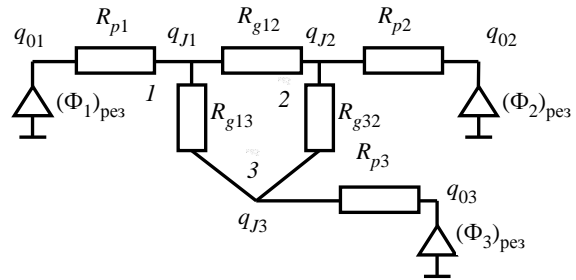


Рис. 3

Для развития описанного выше общего метода анализа теплообмена в замкнутых системах рассмотрим простой случай теплообмена излучением между двумя большими серыми непрозрачными поверхностями, разделенными частично пропускающей средой.

Допустим, что среда является изотермической и серой и не отражает падающего излучения. Это допущение, в частности, верно применительно к газам. Стекла и другие частично прозрачные твердые тела могут отражать часть падающего излучения. Геометрия задачи показана на рис. 4. Свойства пропускающего газа отмечены индексом g .

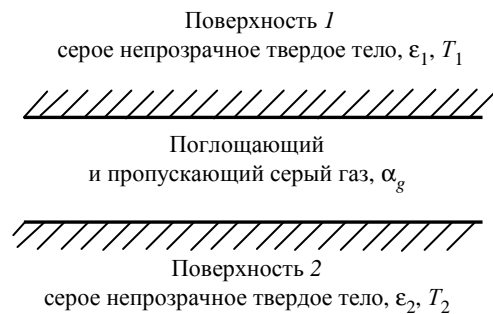


Рис. 4

Пусть свойства и температуры двух поверхностей 1 и 2 известны. Требуется определить результирующий тепловой поток на каждую из поверхностей и температуру газа. Закон излучения Кирхгофа, примененный к пропускающему газу, требует, чтобы $\alpha_g = \varepsilon_g$ и, так как отражательная способность среды равна нулю, $\tau_g = 1 - \alpha_g = 1 - \varepsilon_g$. Через τ_g , α_g , ε_g обозначены коэффициенты пропускания, черноты и поглощения газа соответственно. С учетом газовой среды поток излучения, падающего на поверхность 1, равен сумме потока эффективного излучения, идущего от поверхности 2 через газ, и потока собственно излучения газа:

$$q_{G1} = \tau_g q_{J2} + \varepsilon_g q_{0g}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (3) дает $(\Phi_1)_{\text{рез}} = A_1 (q_{J1} - \tau_g q_{J2} - \varepsilon_g q_{0g})$, что, с учетом (4), можно преобразовать к виду

$$(\Phi_1)_{\text{рез}} = \frac{q_{01} - q_{J1}}{\rho_1 / (A_1 \varepsilon_1)} = \frac{q_{J1} - q_{J2}}{\rho_1 / (A_1 \tau_g)} + \frac{q_{J1} - q_{0g}}{\rho_1 / (A_1 \varepsilon_g)}. \quad (6)$$

Аналогичный вывод для поверхности 2 дает следующее выражение для $(\Phi_2)_{\text{рез}}$:

$$(\Phi_2)_{\text{рез}} = \frac{q_{02} - q_{J2}}{\rho_2 / (A_2 \varepsilon_2)} = \frac{q_{J2} - q_{J1}}{1 / (A_2 \tau_g)} + \frac{q_{J1} - q_{0g}}{1 / (A_2 \varepsilon_g)}. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) составляют основу для электрической аналогии рассматриваемой задачи. Соответствующая схема представлена на рис. 5.

Тепловая цепь на рисунке показывает, что плотность потока черного излучения q_{0g} газа является плавающим потенциалом, и поэтому температура газа представляет собой функцию его свойств, а также температур и свойств двух непрозрачных поверхностей 1 и 2. Фактически газ является огнеупорным (адиабатическим) веществом, поскольку к нему не подводится внешняя энергия, или $(q_g)_{\text{рез}} = 0$.

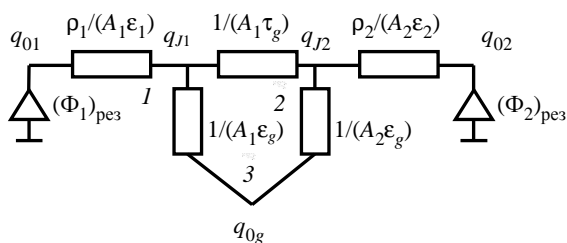


Рис. 5

Пока рассматривался теплообмен излучением между двумя большими серыми непрозрачными поверхностями, разделенными пропускающей средой, для которых угловой коэффициент можно принять равным единице. Если поверхности имеют конечные размеры, то схему тепловой цепи следует изменить для того, чтобы учесть угловой коэффициент F . При этом получим $A_1 q_{G1} = A_2 F_{21} \tau_g q_{J2} + A_1 \varepsilon_g q_{0g}$. После преобразований имеем:

$$(\Phi_1)_{\text{рез}} = \frac{q_{01} - q_{J1}}{\rho_1 / (A_1 \varepsilon_1)} = \frac{q_{J1} - q_{J2}}{1 / (A_1 F_{12} \tau_g)} + \frac{q_{J1} - q_{0g}}{1 / (A_1 \varepsilon_g)}. \quad (8)$$

Уравнение (8) также записано в форме закона Ома и, совместно с аналогичным уравнением для $(\Phi_2)_{\text{рез}}$, может быть представлено в виде тепловой цепи (рис. 6).

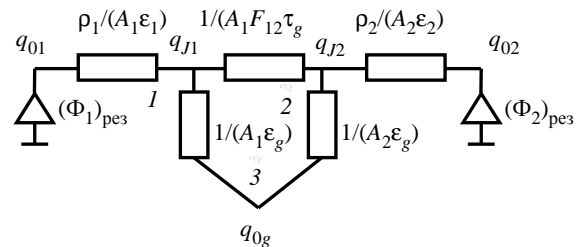


Рис. 6

Использование концепции теории электрических цепей для решения задач теплообмена излучением между четырьмя и более поверхностями в замкнутых системах с диатермической средой позволяет применять стандартные матричные методы расчета, а после их модернизации – и в системах с газовой средой.

В равновесных системах черных и серых поверхностей, участвующих в теплообмене излучением, связь между тепловыми потоками и температурами поверхностей определяется линейными алгебраическими уравнениями. Возможны три типа задач:

- **Фундаментальная.** Заданы геометрия системы, температуры и оптические константы всех составляющих систему тел. Необходимо определить результирующий тепловой поток на любое из тел, участвующих в теплообмене.
- **Обратная.** Заданы геометрия системы, результирующие потоки на участвующие в теплообмене тела и оптические константы последних. Найти температуры тел, образующих данную систему.
- **Смешанная.** Известны геометрия и оптические константы составляющих систему тел. Для части тел задаются температуры, для остальных – результирующие потоки. Требуется определить недостающие величины.

В каждом случае можно составить систему линейных алгебраических уравнений, преобразовать ее в матричное уравнение и, пользуясь стандартными программами, решить последнее.

Допустим, что температуры всех поверхностей известны. Требуется найти результирующие плотности тепловых потоков на всех поверхностях. Все поверхности – непрозрачные, серые, диффузные, изотермические и образуют замкнутую систему. Газ, заполняющий замкнутое пространство, пропускает и поглощает тепло, но не отражает его. Воспользовавшись выражениями (3) и (4), получаем равенство (9), с помощью которого выведем матричные уравнения для замкнутой системы с тремя поверхностями:

$$\varepsilon_1 (q_{0i} - q_{Ji}) / \rho_i = q_{Ji} - q_{Gi} \quad (9)$$

Падающее на первую поверхность излучение плотностью q_{Gi} обусловлено энергией эффективного излучения от самой себя (если она вогнута), от двух других поверхностей и от газа:

$$A_1 q_{Gi} = \tau_1 (A_1 F_{11} q_{J1} + A_2 F_{21} q_{J1} + A_3 F_{31} q_{J3}) + A_1 \varepsilon_g q_{0g} \quad (10)$$

Применив соотношение взаимности ко второму и третьему слагаемым выражения (10) и разделив обе части на A_1 , получим:

$$q_{Gi} = \tau_g (F_{11} q_{J1} + F_{12} q_{J2} + F_{13} q_{J3}) + \varepsilon_g q_{0g} \quad (11)$$

Подстановка (11) в (9) для $i = 1$ дает зависимость

$$\frac{\varepsilon_1}{\rho_1} (q_{01} - q_{J1}) = q_{J1} - \tau_g (F_{11} q_{J1} + F_{12} q_{J2} + F_{13} q_{J3}) - \varepsilon_g q_{0g},$$

которая может быть представлена в виде первого уравнения системы:

$$\left(1 - \tau_g F_{11} + \frac{\varepsilon_1}{\rho_1}\right) q_{J1} + (-\tau_g F_{12}) q_{J2} + (-\tau_g F_{13}) q_{J3} + (-\varepsilon_g) q_{0g} = \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} q_{01} \quad (12)$$

Уравнения для второй и третьей поверхностей аналогичны уравнению (12):

$$\begin{aligned} &(-\tau_g F_{21}) q_{J1} + \left(1 - \tau_g F_{22} + \frac{\varepsilon_2}{\rho_2}\right) q_{J2} + \\ &+ (-\tau_g F_{23}) q_{J3} + (-\varepsilon_g) q_{0g} = \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} q_{02}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(-\tau_g F_{31}) q_{J1} + (-\tau_g F_{32}) q_{J2} + \\ &+ \left(1 - \tau_g F_{33} + \frac{\varepsilon_3}{\rho_3}\right) q_{J3} + (-\varepsilon_g) q_{0g} = \frac{\varepsilon_3}{\rho_3} q_{03}. \quad (14) \end{aligned}$$

Уравнения типа (12)–(14) можно записать для любой замкнутой системы, содержащей конечное число поверхностей. Число уравнений будет равно количеству поверхностей, а число неизвестных на единицу больше, так как температура газа неизвестна и подлежит определению. Система уравнений недоопределена. Чтобы ее доопределить, воспользуемся первым законом Кирхгофа, положив потенциал (температуру) газовой среды узловым. Тогда для замкнутой системы из трех поверхностей имеем

$$\frac{q_{J1} - q_{0g}}{1/(A_1 \varepsilon_g)} + \frac{q_{J2} - q_{0g}}{1/(A_2 \varepsilon_g)} + \frac{q_{J3} - q_{0g}}{1/(A_3 \varepsilon_g)} = 0$$

или

$$\begin{aligned} &(\varepsilon_g) q_{J1} + \left(\frac{A_2}{A_1} \varepsilon_g\right) q_{J2} + \left(\frac{A_3}{A_1} \varepsilon_g\right) q_{J3} + \\ &+ \left(-\varepsilon_g - \frac{A_2}{A_1} \varepsilon_g - \frac{A_3}{A_1} \varepsilon_g\right) q_{0g} = 0. \quad (15) \end{aligned}$$

Таким образом, для замкнутой области из трех поверхностей, заполненной пропускающим и поглощающим газом, можно составить систему из четырех уравнений (12)–(15).

Переходя к матричной форме записи уравнений $\mathbf{AJ} = \mathbf{B}$ для системы из n поверхностей, будем иметь:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}; \quad J = \begin{vmatrix} g_{J1} \\ g_{J2} \\ \dots \\ g_{0g} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_1 \\ \dots \\ b_n \end{vmatrix}, \quad (16)$$

где

$$a_{ij} = -\tau_g F_{ij}, \quad i \neq j, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots (n-1);$$

$$a_{ij} = (\tau_g - 1), \quad i \neq j, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots n;$$

$$a_{ij} = 1 - \tau_g F_{ii} + \frac{\varepsilon_i}{\rho_i}, \quad i = j, \quad i = 1 \dots (n-1), \quad j = 1 \dots (n-1); \quad (17)$$

$$a_{in} = -(1 - \tau_g) \left(\frac{1}{A_i} \sum_i A_i \right), \quad i = 1 \dots n;$$

$$b_i = \frac{\varepsilon_i q_{0i}}{\rho_i}, \quad i = 1 \dots (n-1), \quad b_n = 0.$$

Для черной поверхности $q_{ji} = q_{0i}$. Следовательно, элементы матриц **A** и **B** для строки, соответствующей этой поверхности, запишутся в виде $q_{ij} = 0, i \neq j; a_{ii} = 1; b_i = q_{0i}$.

Если температуры всех поверхностей известны, то задача определения плотностей эффективных тепловых потоков поверхностей и газа сводится к вычислению матриц **A** и **B**. Все элементы матриц **A** и **B** известны, поскольку определены геометрия и свойства поверхностей, а также температуры. После нахождения значений плотностей эффективного теплового потока на всех поверхностях можно найти плотность результирующего теплового потока:

$$(\Phi_i/A_i)_{\text{рез}} = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i}(q_{0i} - q_{ji}).$$

Если поверхность i черная, то плотность результирующего потока определяется по формуле

$$(\Phi_i/A_i)_{\text{рез}} = q_{ji} - q_{Gi} = q_{ji} - \left(\varepsilon_g q_{0g} + \sum_{j=1}^n F_{ij} q_{ji} \right).$$

Температура газа определяется из закона Стефана–Больцмана $T_g = \sqrt[4]{q_{0g}/\sigma}$, где σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Допустим теперь, что температуры всех поверхностей, которые образуют замкнутую систему, неизвестны, но заданы плотности результирующего теплового потока на всех поверхностях. Тогда с помощью выражения $(\Phi_i)_{\text{рез}} = \frac{q_{0i} - q_{ji}}{\rho_i/(A_i \varepsilon_i)}$ можно преобразовать систему (12)–(15), исключив неизвестные q_{0i} и включив известные $(\Phi_i/A_i)_{\text{рез}} = (q_i)_{\text{рез}}$; $\varepsilon_i q_{0i} / \rho_i = (q_i)_{\text{рез}} + \varepsilon_i q_{ji} / \rho_i$. После подстановки полученного выражения в правую часть уравнения (15) и приведения подобных для первой поверхности замкнутой системы, состоящей из трех поверхностей, получим:

$$(1 - \tau_g F_{11})q_{J1} + (-\tau_g F_{12})q_{J2} + (-\tau_g F_{13})q_{J3} + (-\varepsilon_g)q_{0g} = (q_1)_{\text{рез}}.$$

В матричной форме запись системы уравнений остается прежней, но элементы матриц приобретают вид:

$$a_{ij} = -\tau_g F_{ij}, i \neq j, i = 1 \dots n, j = 1 \dots (n-1);$$

$$a_{ij} = -\varepsilon_g, i \neq j, i = 1 \dots n, j = 1 \dots n;$$

$$a_{ij} = 1 - \tau_g F_{ii}, i = j, i = 1 \dots (n-1), j = 1 \dots (n-1);$$

$$a_{in} = -\varepsilon_g \left(\frac{1}{A_i} \sum_i A_i \right), i = 1 \dots n;$$

$$b_i = (q_i)_{\text{рез}}, i = 1 \dots (n-1), b_n = 0.$$

Описанные методика и уравнения также могут быть использованы в задачах со смешанными граничными условиями. В качестве примера рассмотрим электрическую печь сопротивления камерного типа, которую представим в виде замкнутого пространства, ограниченного стенками, через которые нет потерь тепла. На поде печи находятся серые в оптическом отношении стальные слитки (ε_4). Начальная температура слитков 300 К. На своде печи располагаются радиационные нагреватели общей мощностью 100 кВт с излучательной способностью $\varepsilon_2 = 0.75$. Боковые стенки печи представляют собой огнеупорные (адиабатические) поверхности, формирующие внутреннее печное пространство в виде параллелепипеда высотой 1 м, шириной 2 м и глубиной 2 м. Среда в печи диатермическая. Присвоим внутренним поверхностям печи номера: левой стенке – 1; нагревателям – 2; правой стенке – 3; слиткам – 4; задней стенке – 5; передней стенке – 6. Соответственно этим номерам имеем:

$$q_{01} = q_{J1} - q_{G1}; (\Phi_2)_{\text{рез}} = 10^5 \text{ Вт};$$

$$\varepsilon_2 = 0.75; q_{03} = q_{J3} = q_{G3};$$

$$T_4 = 300 \text{ К}; \varepsilon_4 = 0.40;$$

$$q_{05} = q_{J5} = q_{G5}; q_{06} = q_{J6} = q_{G6}.$$

Угловые коэффициенты находятся из литературы, например [1]–[4], с учетом соотношений взаимности. После подстановки угловых коэффициентов, вычисления правых частей и решения системы уравнений получим $q_{ji}, i, j = 1, 2, \dots, 6$ с каждой поверхности, что позволяет найти неизвестные температуры поверхностей. Тепловой поток q_{02} находится из формулы $(\Phi_2/A_2)_{\text{рез}} = (q_{02} - q_{J2})\varepsilon_2 / \rho_2$, после чего можно определить температуру нагревателей $T_2 = \sqrt[4]{q_{02}/\sigma}$, которая оказывается равной 1091 К. С учетом нулевого значения результирующего потока для огнеупорных стенок находим, что температуры стенок $T_{\text{ст}} = \sqrt[4]{q_{J1}/\sigma}$ одинаковы и составляют 998 К.

Предположим теперь, что атмосфера в печи обладает пропускающей способностью ($\tau_g < 1$). При этом она частично поглощает излучение, но не отражает его ($\varepsilon_g = 1 - \tau_g$). Тогда матрицы **A** и **B** задачи теплообмена излучением в газовой среде будут иметь следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1.00 & -0.30\tau_g & -0.12\tau_g & -0.30\tau_g & -0.14\tau_g & -0.14\tau_g & (\tau_g - 1) \\ -0.15\tau_g & 1.00 & -0.15\tau_g & -0.40\tau_g & -0.15\tau_g & -0.15\tau_g & (\tau_g - 1) \\ -0.12\tau_g & -0.30\tau_g & 1.00 & -0.30\tau_g & -0.14\tau_g & -0.14\tau_g & (\tau_g - 1) \\ -0.15\tau_g & -0.40\tau_g & -0.14\tau_g & 1.66 & -0.15\tau_g & -0.15\tau_g & (\tau_g - 1) \\ -0.14\tau_g & -0.30\tau_g & -0.14\tau_g & -0.30\tau_g & 1.00 & -0.12\tau_g & (\tau_g - 1) \\ -0.14\tau_g & -0.30\tau_g & -0.14\tau_g & -0.30\tau_g & -0.12\tau_g & 1.00 & (\tau_g - 1) \\ (\tau_g - 1) & 2(\tau_g - 1) & (\tau_g - 1) & 2(\tau_g - 1) & (\tau_g - 1) & (\tau_g - 1) & 8(\tau_g - 1) \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 2.5 \cdot 10^4 \\ 0.0 \\ 3.1 \cdot 10^2 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{pmatrix}.$$

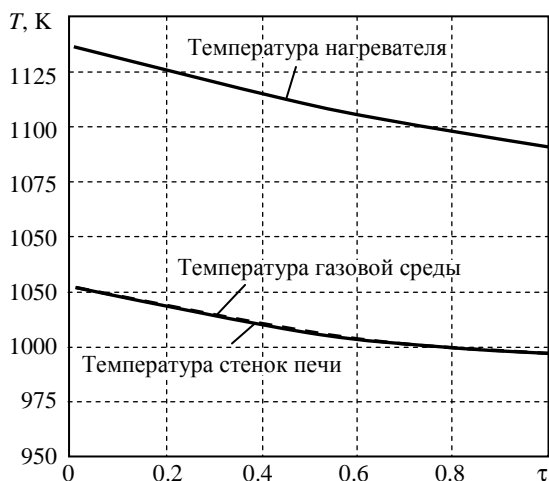


Рис. 7

Решение этой системы уравнений приведено на рис. 7 в виде зависимостей температуры нагревателей, газа и боковых стенок печи от τ_g .

В заключение следует отметить, что в рассмотренном примере температуры газа и стенок совпадают. Температура нагревателя, рассчитанная без учета газовой среды (среда диатермическая), равна 1091 К, а стенок – 998 К.

В случае расчета того же объекта с учетом свойств газа при $\tau_g \rightarrow 1$, когда газ совершенно прозрачен, соответствующие температуры совпадают, что видно из рис. 7.

Следует полагать, что предложенный способ доопределения системы линейных уравнений, описывающих теплообмен излучением в замкнутых пространствах из серых поверхностей, заполненных газом, достоверно отражает процесс. Отметим еще раз, что уравнение, доопределяющее систему, получено путем использования аналогии между электрическими токами в цепях и тепловыми потоками излучения в замкнутых системах серых поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи / пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.
2. Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи: учеб. для вузов: в 2 ч. Ч. 1: Электрические печи сопротивления. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. 384 с.
3. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением: Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.

V. V. Tsarevsky, A. Yu. Pechenkov, S. A. Galunin

RADIATION HEAT TRANSFER IN GAS ENVIRONMENT

The way of extension of the linear equations system describing heat exchange by radiation in filled gas closed spaces from grey surfaces is suggested. The extension equation is received by using of analogy between currents in electrical circuits and radiation fluxes in the closed systems of grey surfaces. Schematic representation of process is given.

Radiation heat exchange, gray surfaces, heat resistance, gas environment