

УДК 621. 365.2

к.т.н. Кухарев А. Л.
(Стахановский учебно-научный институт
ЛНУ им. В. Даля, г. Стаханов, ЛНР),
д.т.н. Корсунов К. А.
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР),
к.т.н. Сергиенко С. Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

Приведены результаты расчета теплофизических характеристик электрической дуги в электропечных установках для производства стали и ферросплавов, полученные на основании численного решения уравнения Эленбааса-Геллера. Получены зависимости осевой температуры дуги и радиационного теплового потока от эффективного радиуса поглощения воздушной и Si:O:C плазмы.

Ключевые слова: электрическая дуга, плазма, поглощение излучения, дуговая печь.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Современные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и рудовосстановительные печи (РВП) представляют собой сложные электротехнологические комплексы, единичные мощности которых составляют десятки мегаватт и выше. Для проектирования рациональных конструкций и режимов работы электропечных установок необходимы данные об электрических, тепловых и газодинамических процессах в электрических дугах, представляющих собой сильноточные дуговые разряды в сложных газовых соединениях. Высокие температуры, агрессивная газовая среда и ограниченность доступа к печному пространству выдвигают на первый план применение методов математического моделирования к исследованию электропечных дуг.

Существует достаточно большое количество моделей для аналитического и численного исследования электрических дуг. Среди них наиболее полными являются модели, основанные на уравнениях магнитной гидродинамики (МГД), включающей уравнения Максвелла, уравнения переноса энергии, импульса, а также другие уравнения, описывающие турбулентность

газового потока, процессы на катоде и на аноде и др. [1–3]. Недостатками таких моделей являются их значительная сложность и, соответственно, большие затраты вычислительных ресурсов [4].

Во многих случаях, особенно при решении практических задач, достаточно использовать более простые (одномерные) модели, основанные на решении уравнения переноса энергии, типа уравнения Эленбааса-Геллера [5]. Наиболее сложным в таких моделях является учет параметров излучения плазмы в реальном спектре дугового разряда, так как плазма дуги при реальных радиусах столба 5–10 см не является оптически тонкой [6].

Целью данной статьи является исследование теплофизических характеристик дугового разряда в электропечных установках при различных параметрах реабсорбции излучения.

Изложение материала и его результаты. Для математического описания процессов в столбе электрической дуги приняты следующие допущения. Считается, что электродуговая плазма столба дуги находится в состоянии локального термодинамического равновесия, при этом свойства газа являются функциями только температуры, а давление

рассматривается в качестве параметра, режим течения газа – турбулентный, а внешние магнитные поля не учитываются. Принимается цилиндрическая симметрия дуги. Пренебрегаем работой сил вязкого трения, переносом тепла за счет теплопроводности в направлении оси симметрии, радиальной составляющей скорости газа в дуге, отклонением дуги от вертикальной оси электрода.

С учетом указанных допущений тепловые процессы в столбе дуги описываются уравнением Эленбааса-Геллера:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{эф} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - U = c_p \rho V_z \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где r — радиус, T — температура, σE^2 — мощность джоулевой диссипации, U — мощность радиационных энергопотерь единицы объема, σ — электропроводность плазмы, E — напряженность электрического поля; V_z — осевая составляющая скорости газового потока.

Входящий в уравнение (1) коэффициент эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ плазмы имеет вид [1]:

$$\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_m.$$

Коэффициент турбулентной теплопроводности λ_m может быть выражен через коэффициент турбулентной вязкости μ_m и теплоемкость C_p с помощью соотношения:

$$\lambda_m = \mu_m \frac{C_p}{Pr_m}.$$

Турбулентное число Прандтля Pr_m может быть принято равным 0,8–1 [1], а значение турбулентной вязкости μ_m можно определить с учетом рекомендаций [6].

Уравнение (1) дополняется граничными условиями в центре разрядной области

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=0} = 0 \quad (2)$$

и на внешней границе

$$\left[T \right]_{r=R_0} = T_0. \quad (3)$$

Таким образом, зная распределение скорости $V(r)$, по (1) можно получить распределение температуры по радиусу. Так как теплофизические характеристики дуги представляют собой сложные нелинейные температурные зависимости, для решения уравнения, как правило, применяются численные методы. Для упрощения расчета заменим частные производные по z в (1) конечными приращениями и запишем правую часть (1) в усредненном виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - U = G \frac{\bar{h} - h_0}{L\pi R^2}, \quad (4)$$

где $G = 2\pi \int_0^R V_z \rho r dr$ — расход газа в дуге;

$\bar{h} = \frac{1}{G} 2\pi \int_0^R V_z \rho h r dr$ — среднемассовая энтальпия; L — длина дуги; R — радиус дуги.

Кроме того, приведем (4) к квазилинейному виду, произведя замену [5] $S = \int_0^T \lambda dT$ — тепловая функция (функция Кирхгофа).

Тогда окончательное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + \sigma(S) E^2 - U(S) = G \frac{\bar{h} - h_0}{L\pi R^2}. \quad (5)$$

Для расчета параметров дуги в ДСП использовались термодинамические свойства сухого воздуха [7]. Для примера на рисунке 1 показана зависимость электропроводности плазмы воздуха от температуры при атмосферном давлении.

Задание объемных радиационных энергопотерь от дуги проводилось с использованием метода чистого коэффициента излучения (net emission coefficient) ε_N , при котором [8]:

$$\varepsilon_N = \int_0^\infty B_\nu k_\nu \exp(-k_\nu R_{эф}) d\nu, \quad (6)$$

где B_ν — функция Планка; k_ν — коэффициент поглощения (реабсорбции); $R_{эф}$ — эффективный радиус поглощения.

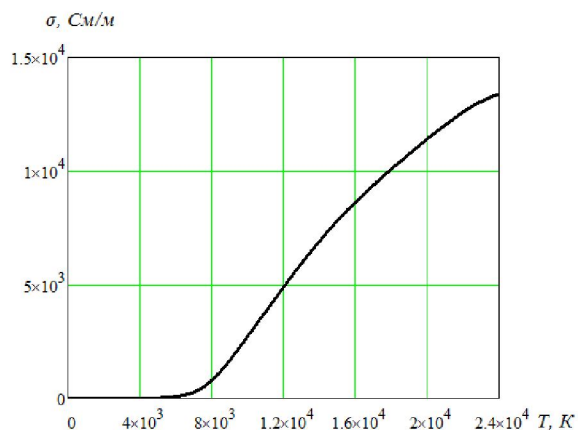


Рисунок 1 Электропроводность воздушной плазмы атмосферного давления

Зависимость чистого коэффициента излучения от температуры и эффективного радиуса поглощения плазмы воздуха приведена на рисунке 2 [8].

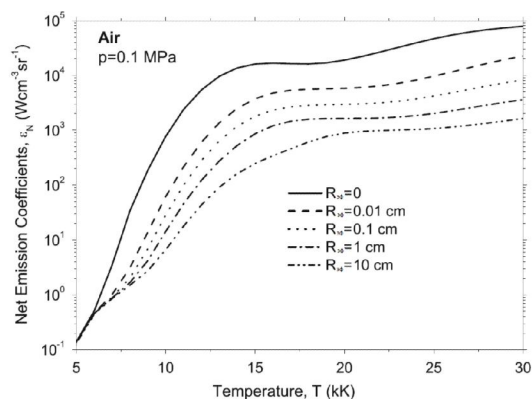


Рисунок 2 Чистые коэффициенты излучения воздушной плазмы атмосферного давления

Решение уравнения (1) проводилось нами с использованием метода установления с помощью конечно-разностного алгоритма, реализованного в пакете Matlab. Для заданных E , R , L , T_0 и $V(r)$ находилось распределение температуры по радиусу дуги $T(r)$.

Радиационный тепловой поток на стенку дуги определялся по выражению:

$$Q_u = \frac{2\pi \int_0^R U(S)rdr}{2\pi R} = \frac{1}{R} \int_0^R U(S)rdr. \quad (7)$$

Расчет геометрических параметров дуги для условий горения в электропечных установках проводился нами по методикам, приведенным в [4, 6]. С учетом экспериментальных данных при токах печи, составляющих несколько десятков килоампер, напряженность электрического поля в дуге составляет 8–12 В/см, а температура на стенке дуги — около 6000 К. Профиль скорости $V(r)$ вычислялся нами по методике, приведенной в [9].

На рисунке 3 приведены результаты расчета осевой температуры дуги T_{max} и радиационного теплового потока в зависимости от эффективного радиуса поглощения $R_{эф}$ при следующих параметрах дуг в ДСП: $I = 85$ кА, $R = 8$ см, $L = 45$ см.

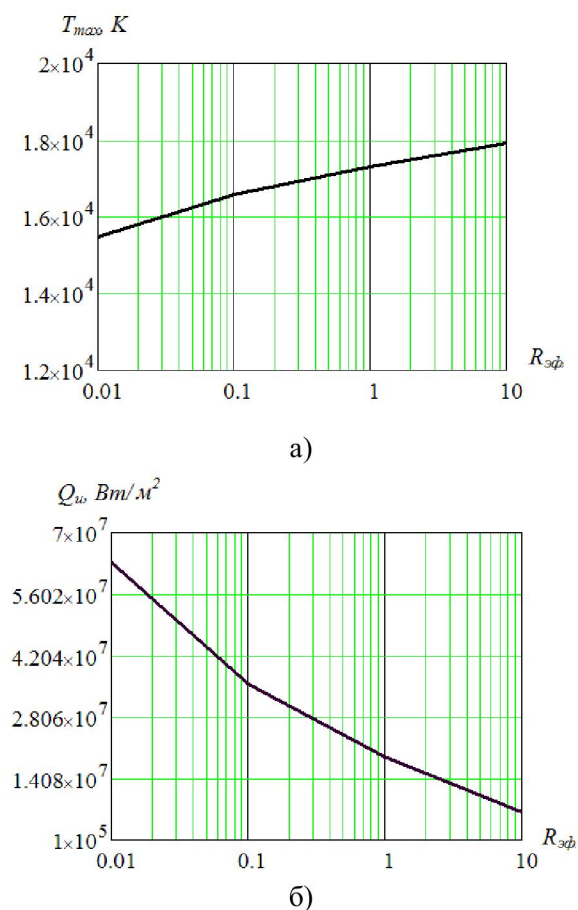


Рисунок 3 Зависимости параметров электрической дуги от радиуса поглощения в ДСП: а) осевой температуры; б) радиационного теплового потока

Аналогичные расчеты были проведены нами для дуг, горящих в РВП, выплавляющих кремнистые ферросплавы. Для этого случая нами были использованы термодинамические свойства плазмы, состоящей из паров кремния, кислорода и углерода Si:O:C (0,245:0,49:0,245), приведенные в [3]. Зависимость чистого коэффициента излучения Si:O:C плазмы от температуры при $R_{эф} = 0$ приведена на рисунке 4.

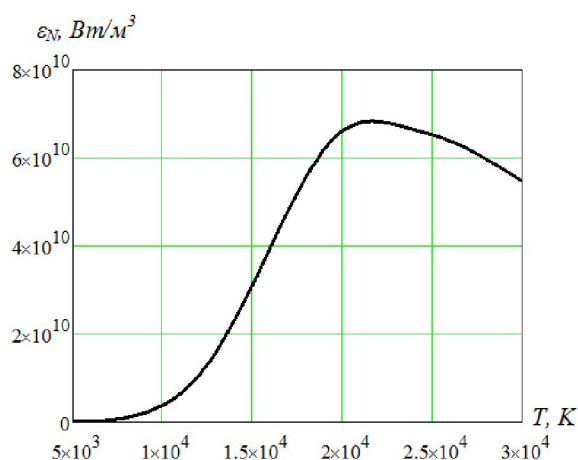


Рисунок 4 Чистый коэффициент излучения Si:O:C плазмы атмосферного давления

Так как в рассмотренных источниках отсутствуют зависимости чистого коэффициента излучения Si:O:C плазмы от эффективного радиуса поглощения, для построения этих характеристик нами было использовано выражение [11]:

$$4\pi\epsilon_N = \sigma_{CB} T^4 k_v \exp(-k_v R_{эф}), \quad (8)$$

где σ_{CB} — постоянная Стефана-Больцмана.

На рисунке 5 приведены результаты расчета осевой температуры дуги T_{max} и радиационного теплового потока от эффективного радиуса поглощения $R_{эф}$ при следующих параметрах дуг в РВП: $I = 35$ кА, $R = 5$ см, $L = 10$ см. При выборе модельного значения тока дуги учитывалось, что часть тока печи замыкается через сопротивление шихты, шунтирующее сопротивление дуги [3].

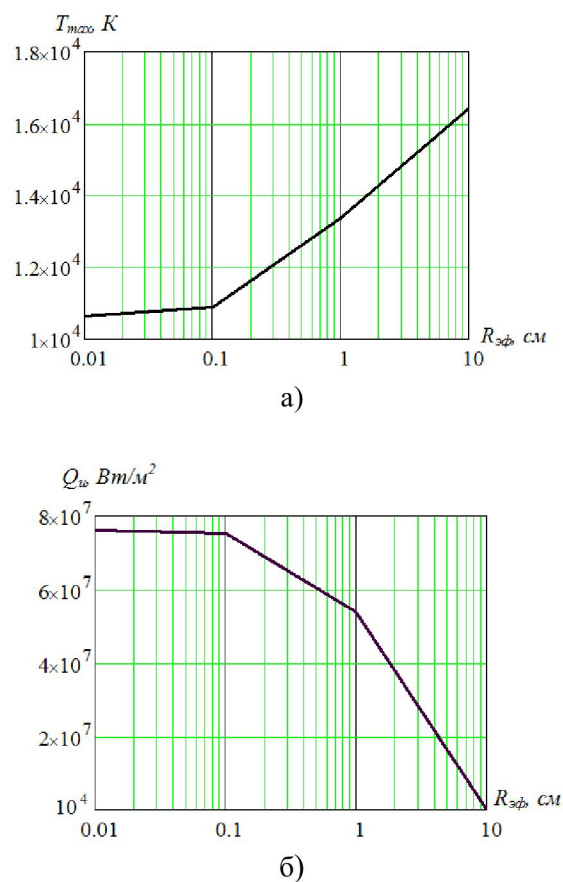


Рисунок 5 Зависимости параметров электрической дуги от радиуса поглощения в РВП: а) осевой температуры; б) радиационного теплового потока

Как видно из рисунков 3 и 5, осевые температуры в электрических дугах при $R_{эф} = 0,01$ см составляют соответственно для ДСП — 15400 К, а для РВП — 10600 К и возрастают с увеличением радиуса поглощения плазмы.

С увеличением $R_{эф}$ радиационный тепловой поток значительно снижается, причем, начиная с $R_{эф} = 1$ см, радиационный тепловой поток для условий ферросплавных печей снижается гораздо быстрее, чем для ДСП. Это, по всей видимости, обусловлено сильными поглощающими свойствами Si:O:C плазмы.

Следует также отметить, что в процессе эксплуатации мощных электропечных установок теплофизические параметры электрических дуг, в том числе и радиационные характеристики, могут значительно

изменяться при наличии в плазме дуги большого количества легко ионизирующихся компонентов (кальций, алюминий, железо), при переходе дуги из контрагированного режима в диффузный и других нарушениях устойчивости ее горения.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. На основании решения уравнения Эленбааса-Геллера для дуг, горящих в ДСП и РВП, получены зависимости осевой температуры дуги и радиационного теплового потока от эффективного радиуса поглощения воздушной и Si:O:C плазмы.

Библиографический список

1. Крикент, И. В. Численное моделирование сильноточного дугового разряда в установке ковш–печь постоянного тока [Текст] / И. В. Крикент, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, В. П. Пунтук // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 3 (112). — С. 45–50.
2. Ramírez-Argáez, M. Mathematical modeling of high intensity electric arcs burning in different atmospheres [Текст] / M. Ramírez-Argáez, C. González-Riverad, G. Trápaga // ISIJ Intern. — 2009. — № 6. — P. 796–803.
3. Saevarsdottir, G. A. High-power AC Arcs in Metallurgical Furnaces [Текст] / G. A. Saevarsdottir, J. A. Bakken, V. G. Sevastyanenko, Gu Liping // High Temperature Material Processes. — 2001. — Vol. 5. — P. 21–43.
4. Fathi, A. Low computational-complexity model of EAF arc-heat distribution [Текст] / A. Fathi, Y. Saboohi, I. Skrjanc // ISIJ Intern. — 2015. — № 7. — P. 1353–1360.
5. Дзюба, В. Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы [Текст] / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. — Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2007. — 448 с.
6. Bowman, B. Arc furnace physics [Текст] / B. Bowman, K. Kruger. — Dusseldorf: Stahleisen communications, 2009. — 245 p.
7. Boulos, M. Thermal plasmas: fundamentals and applications [Текст] / M. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender. — New York : Springer Science and Business Media, LLC, 1994. — Vol. 1. — 452 p.
8. Aubrecht, V. Net Emission Coefficients of Radiation in Air and SF₆ Thermal Plasmas [Текст] / V. Aubrecht, M. Bartlova // Plasma Chemistry Plasma Process. — 2009. — № 29. — P. 131–147.
9. Зимин, А. М. Математическое моделирование процессов в плазменных установках [Текст] / А. М. Зимин. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 116 с.
10. Johnsen, S. CFD Modeling of a rotating arc plasma reactor [Текст] / S. Johnsen, A. Simonsen // 10th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries (Trondheim, Norway 17–19th June 2014). — Trondheim : SINTEF, 2014. — P. 161–168.

© Кухарев А. Л.
 © Корсунов К. А.
 © Сергиенко С. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ Новохатским А. М.,
 деканом факультета естественных наук ЛНУ им. В. Даля, к.т.н., доц. Черныхом В. И.*

Статья поступила в редакцию 27.01.17.

к.т.н. Кухарев О. Л. (СННІГОТ ЛНУ ім. В. Даля, м. Стаханов, ЛНР), **д.т.н. Корсунов К. А.** (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР), **к.т.н. Сергієнко С. М.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ В ЕЛЕКТРОПІЧНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ ТА ФЕРОСПЛАВІВ

Наведено результати розрахунку теплофізичних характеристик електричної дуги в електропічних установках для виробництва сталі та феросплавів, отримані на підставі чисельного рішення рівняння Еленбааса-Геллера. Отримано залежності осьової температури дуги і радіаційного теплового потоку від ефективного радіусу поглинання повітряної та Si:O:C плазми.

Ключові слова: електрична дуга, плазма, поглинання випромінювання, дугова піч.

PhD Kukharev A. L. (Stakhanov Educational and Scientific Institute of Mining and Educational Technology affiliated with Dalia Lugansk State University, Stakhanov, LPR), **Dr.Tech.Sci. Korsunov K. A.** (V. Dahl Lugansk National University, Lugansk, LPR), **PhD Sergienko S. N.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)
CALCULATION OF ELECTRIC ARC PARAMETERS IN ELECTRIC FURNACE STATIONS FOR STEEL AND FERROALLOY PRODUCTION

There have been given the calculated results on thermal and physical characteristics of electrical arc in electric furnace stations for steel and ferroalloy production obtained by numerical solutions of Elenbaas-Geller equation. There have been obtained the dependences of axial arc temperature and radiant heat flux on effective radius for air and Si:O:C plasma absorption.

Key words: electrical arc, plasma, radiation absorption, arc furnace.