

ДИНАМИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДНОЙ "СВЕЧИ" КАК ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДУГОВОЙ ПЕЧИ

Галько С.В

Таврическая государственная агротехническая академия

Operational efficiency of electrode "candle" of the arc steel-smelting furnace being by a basic element of a heat power path and influence on its quality of various temperature factors described criterions numbers of thermodynamics is considered. Dynamic mathematical models are received and characteristics of heating, thermal losses and thermal efficiency of a nipple and electrode "candle" are constructed.

Для энергоемких предприятий определение достоверных прогнозных оценок потребления электрической мощности с высокими качественными показателями являются основной актуальной проблемой. Электрометаллургические производства функционирует в условиях воздействия значительного числа стохастических факторов, приводящих к генерированию нелинейных воздействий на сеть питания. Статистические методы позволяют вводить в рассмотрение интерполированные данные систематического учета расходных параметров энергетического учета в виде данных массового эксперимента. Данные методы являются базовыми для целей экстраполяционных экспериментов по анализу закономерностей и связей, необходимых для прогнозирования энергозатрат статистического характера. Рассматриваемая оценка динамики энергетической эффективности теплоэнергетического тракта дуговой сталеплавильной печи (ДСП) в функции качества динамического функционирования электродной "свечи" и электрической дуги позволяют дифференцированно подходить к формированию прогнозных моделей с экстраполированием количественных характеристик взаимосвязей энергетических и технологических показателей интерполяционного характера [1] электрической дуги, параметры которой включают в себя параметры электротехнического тракта вторичного токоподвода электропечного трансформатора. Основные вопросы построения моделей электрических цепей с электрической дугой рассмотрены в [2,3] и др. работах. В нашем случае анализ динамической эффективности электроэнергетического тракта ДСП должен быть дополнен исследованиями эффективности данного тракта в функции параметров электрической дуги. В то же время параметры электрической дуги включают в себя параметры электротехнической цепи вторичного токоподвода печи.

Цель работы – разработать математические модели оценки динамической эффективности электроэнергетического тракта ДСП в функции параметров элементов "короткой" сети вторичного токопровода.

В соответствии с [2,3] параметры электрической дуги описываются многофункциональными рядами на основе интегралов Бесселя. Нами принимается модель электрической дуги, включающая в себя модель на основе эллиптических функций Якоби в соответствии с методологическими положениями [1]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= \arctg \frac{\sin \varphi}{1 + \cos \varphi}; \quad \delta_2 = \arctg \frac{\sin \varphi + \sin \varphi_0}{1 + \cos \varphi + \cos \varphi_0}; \quad \delta_c = \arctg \frac{\sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{3} \right)}{1 + \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{3} \right)}; \\ \delta_d &= \arctg \frac{\sin \left(\varphi + \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3} \right)}{1 + \cos \left(\varphi + \frac{4\pi}{3} \right) + \cos \left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3} \right)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При применении высокоинтеллектуальных АСР режима ДСП при описании электрической дуги и оценки влияния на ее характеристики параметров вторичного токоподвода, в частности параметров ниппельного соединения электродной "свечи", в соответствии с [1] принимаются значения функций Бесселя: а) для дуги переменного тока $I_{1/2}, I_{3/2}, \dots, I_{13/2}$; б) для дуги постоянного тока I_0, I_2, \dots, I_8 . С учетом рекомендаций [82] при анализе достаточно ограничиться следующими значениями интегралов: а) при описании дуги переменного тока: $I_{1/2}, I_{3/2}, I_{5/2}, I_{7/2}$; б) дуги постоянного тока: I_0, I_2, I_4, I_6 , которые с учетом параметров ниппельного соединения и гидродинамических параметров собственно электрической дуги принимают вид:

$$I_{1/2}(\varphi_3) = \sqrt{\frac{2}{\pi\varphi_3}} \sin \varphi_3; I_{3/2}(\varphi_3) = \sqrt{\frac{2}{\pi\varphi_3}} \left(\frac{\sin \varphi_3}{\varphi_3} - \cos \varphi_3 \right); I_{5/2}(\varphi_3) = \sqrt{\frac{2}{\pi\varphi_3}} \left(\frac{3}{2} \sin \varphi_3 + \left[\frac{3}{\varphi_3^2} - 1 \right] \cos \varphi_3 \right);$$

$$I_{7/2}(\varphi_3) = \sqrt{\frac{2}{\pi\varphi_3}} \left[\left(\frac{15}{\varphi_3^2} - \frac{6}{z} \right) \sin \varphi_3 - \left(\frac{15}{z^2} - 1 \right) \cos \varphi_3 \right]; I_0(\varphi_3) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{r!(r+n)!} \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^{2r};$$

$$I_2(\varphi_3) = \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^2 \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{r!(r+n)!} \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^{2r}; I_4(\varphi_3) = \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^4 \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{r!(r+n)!} \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^{2r}; I_6(\varphi_3) = \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^6 \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{r!(r+n)!} \left(\frac{\varphi_3}{2} \right)^{2r}$$

где n - параметр постоянной времени дуги [3],

r - порядковый номер ряда Бесселя;

$\varphi_3 = \sqrt{\varphi^2 + \varphi_0^2}$ - эквивалентное значение функционального угла эллиптических функций Якоби, определяемых по (1).

а) Важной интегральной характеристикой расхода графитированных электродов является характеристика термоциклирования их нагружения, влияющего на термостойкость резьбового соединения электрода и ниппеля, растрескивания ниппеля и величину удельного электрического соединения (УЭС) электродной "свечи". Основным фактором в данном случае является температурная зависимость деформации ниппельного соединения как аргумента при расчете УЭС, т.к. основную токовую нагрузку при этом будет воспринимать ниппель, плотность тока в котором становится выше допустимой, приводящей к тепловому расстройству стыка, изменению УЭС, интенсивному окислению и обрыву электрода по ниппельному соединению.

Параметры температурного режима в основном определяются критериальным числом Био Bi . В данном случае, при $Bi \neq K_3$ (K_3 - число Кирпичева), модель теплового режима принимает вид:

$$\Theta(\xi, t_3) = \operatorname{erfc} \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} + \operatorname{erfc} \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} - \exp \left[(1-\xi)Bi + (Bi\sqrt{t_3})^2 \right] \operatorname{erfc} \left[Bi\sqrt{t_3} + \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} \right] -$$

$$- 2 \frac{Bi}{Bi - K_3} \exp \left[(1+\xi)K_3 + (K_3\sqrt{t_3})^2 \right] \operatorname{erfc} \left[K_3\sqrt{t_3} + \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} \right] + \frac{Bi + K_3}{Bi - K_3} \times$$

$$\times \exp \left[(1+\xi)Bi + (Bi\sqrt{t_3})^2 \right] \operatorname{erfc} \left[Bi\sqrt{t_3} + \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} \right], \quad (2)$$

а при $Bi = K_3$ модель (2) принимает вид:

$$\Theta(\xi, t_3) = \operatorname{erfc} \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} + \operatorname{erfc} \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} - 4K_3\sqrt{\frac{t_3}{\pi}} \exp \left[-\frac{(1+\xi)^2}{4t_3} \right] - \exp \left[(1-\xi)K_3 + (K_3\sqrt{t_3})^2 \right] \times$$

$$\times \operatorname{erfc} \left[K_3\sqrt{t_3} + \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} \right] - \exp \left[(1+\xi)K_3 + (K_3\sqrt{t_3})^2 \right] \operatorname{erfc} \left[K_3\sqrt{t_3} + \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} \right] +$$

$$+ 2 \left[(1+\xi)K_3 + 2(K_3\sqrt{t_3})^2 \right] \operatorname{erfc} \left[K_3\sqrt{t_3} + \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} \right]. \quad (3)$$

По моделям (2) и (3) на рис. 1-2 построены функциональные зависимости $\Theta_3(\xi, t_3)$ для различных значений K_3 и значений Bi , равных соответственно 1 и 10 при условии осреднения коэффициента теплоотдачи α и температуры T_p на равных интервалах.

б) Оценку влияния переменных параметров ниппельного соединения проводим в предположении, что такая оценка является фактором величины зазора между торцами соединенных секций электродной "свечи" при подведении тока в центр ниппельного гнезда и на торец электрода. Характер и величина тепловых потерь (косвенным образом изменение теплового КПД) электродной "свечи" описываются моделью вида:

$$\Theta_3(\xi, t_3) = \operatorname{erfc} \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} - \operatorname{erfc} \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} + 2 \exp\left\{(1+\xi)Bi_0 + (Bi_0\sqrt{t_3})^2\right\} \operatorname{erfc} \left\{\frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} + Bi_0\sqrt{t_3}\right\}, \quad (4)$$

или при высокочастотных термических циклах нагружения данная модель приобретает вид:

$$\Theta_3(\xi, t_3) = \frac{1 + Bi_0\xi}{1 + Bi_0} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ \sin \mu_n \xi + \frac{\mu_n}{Bi_0} \cos \mu_n \xi \right\} \exp(-\mu_n^2 t_3), \quad (5)$$

где $A_n = \frac{2 \cos \mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$; μ_n - корни характеристического уравнения $tg \mu = -\mu/Bi_0$.

На рис. 3 приведены указанные зависимости, построенные по (4) и (5) при $\xi = 0$ и различных значениях критерия Bi_0 .

в) Оценку влияния деформации ниппельного соединения на тепловое расширение материала электродного графита проведем как аргумент скорости нагрева электрода и влияние на тепловые потери и УЭС. Тепловая эффективность ниппельного соединения дополнительно характеризуется в данном случае критериальным числом K_i . Математическая модель для малых значений числа F_0 (число Фурье) принимает вид:

$$\frac{\Theta(\xi, t_3)}{K_i} = 2\sqrt{\frac{t_3}{\pi}} \left\{ \exp\left[-\frac{(1-\xi)^2}{4t_3}\right] - \exp\left[-\frac{(1+\xi)^2}{4t_3}\right] \right\} - (1-\xi) \operatorname{erfc} \frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} + \left(1 + \xi + \frac{2}{Bi_0}\right) \times \\ \times \operatorname{erfc} \frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} - \frac{2}{Bi_0} \exp\left[(1+\xi)Bi_0 + (Bi_0\sqrt{t_3})^2\right] \operatorname{erfc} \left(\frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} + Bi_0\sqrt{t_3}\right),$$

или при наличии термических ударов

$$\frac{\Theta(\xi, t_3)}{K_i} = \frac{1 + Bi_0\xi}{Bi_0} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ \frac{1}{Bi_0} \cos \mu_n \xi + \frac{1}{\mu_n} \sin \mu_n \xi \right\} \exp[-\mu_n^2 t_3]; \\ A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n};$$

μ_n - корни характеристического уравнения $ctg \mu = \mu/Bi_0$.

На рис. 4 и 5 приведены функциональные зависимости, дающие значения $\frac{\Theta_3(\xi, t_3)}{K_i} Bi_0$ при

$\xi = 0$ и $\xi = 1$ соответственно при различных величинах критериального числа Bi_0 .

г) При использовании прецизионных АСР режима работы ДСП и пропитанных электродов необходимо учитывать магнитную анизотропию и текстуру материала графита, а также физико-химические свойства термической стойкости многокомпонентных материалов исходного сырья. Модели нагрева при малых числах F_0 ниппеля и секций электрода принимают следующий вид:

$$\Theta_1(t_3) = 2\sqrt{\frac{t_3}{\pi}} - \frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_1} \exp(Bi_1^2 t_3) \operatorname{erfc}(Bi_1 t_3); \quad (6)$$

$$\Theta_2(t_3) = 6 \left(1 + \frac{2}{Bi_1}\right) \left\{ 2\sqrt{\frac{t_3}{\pi}} - \frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_1} \exp(Bi_1^2 t_3) \operatorname{erfc}(Bi_1 \sqrt{t_3}) \right\}. \quad (7)$$

Применительно к параметрам физико-химических показателей электродов (табл. 1) [4] на рис. 6 и 7 приведены зависимости температуры $\Theta_1(t_3)$ ниппеля и $\Theta_2(t_3)$ секции электрода при фиксированных значениях Bi_0 и Bi_1 , построенные по (6) и (7);

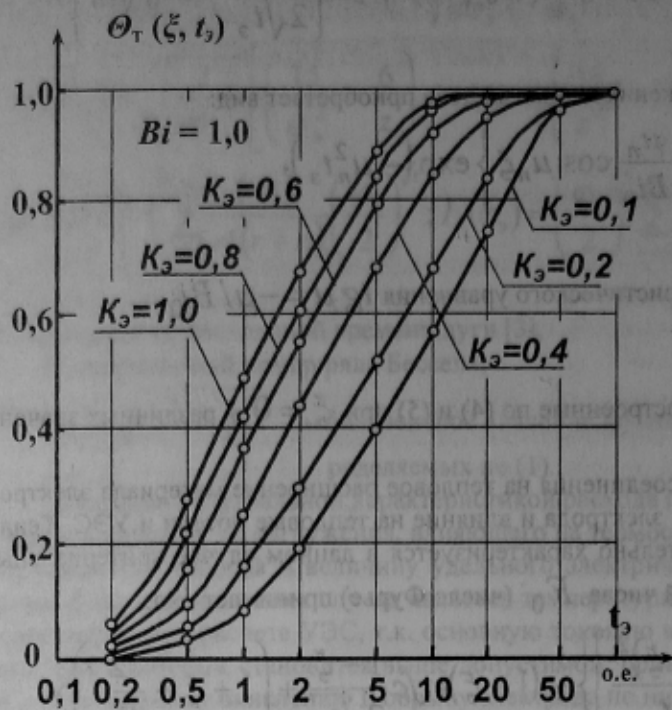


Рисунок 1 - Зависимость температурного режима ниппельного соединения в функции длительности ударных значений термических циклов нагружения при $Bi=1,0$.

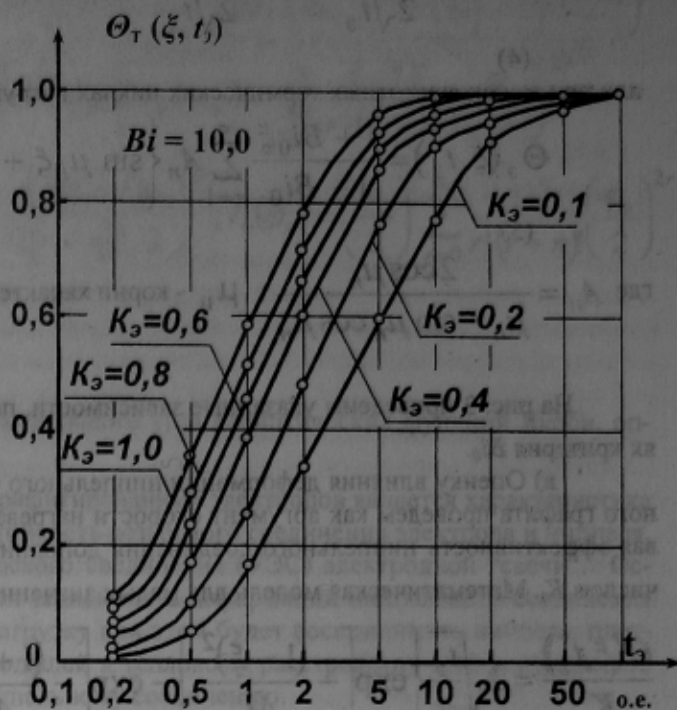


Рисунок 2 - Зависимость температурного режима ниппельного соединения в функции длительности ударных значений термических циклов нагружения при $Bi=10,0$.

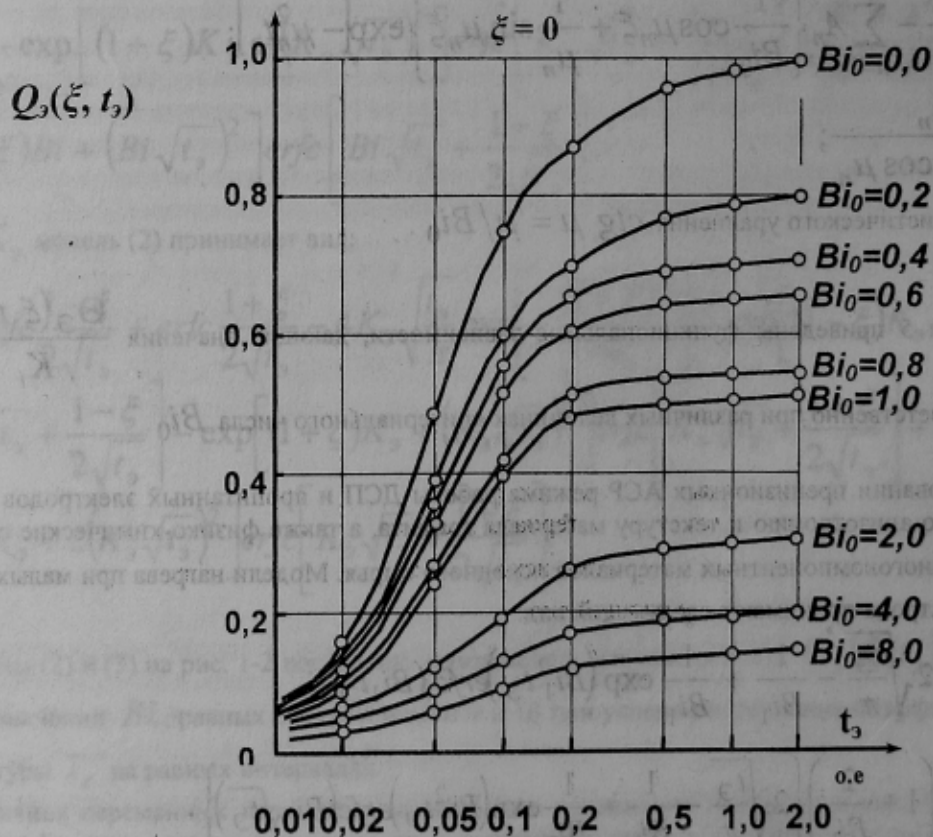


Рисунок 3 - Зависимость тепловых потерь в функции зазора между торцами секций электродов.

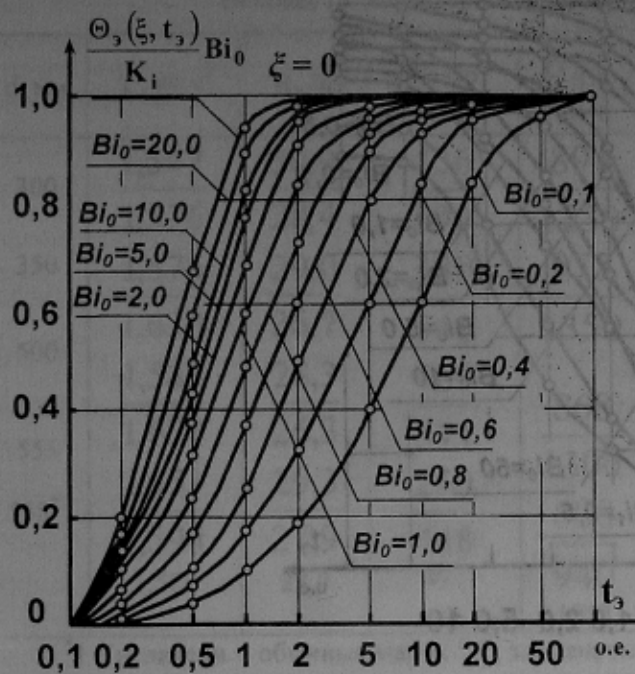


Рисунок 4 - Зависимость тепловых потерь в функции скорости нагрева ниппельного соединения при $\xi=0$.

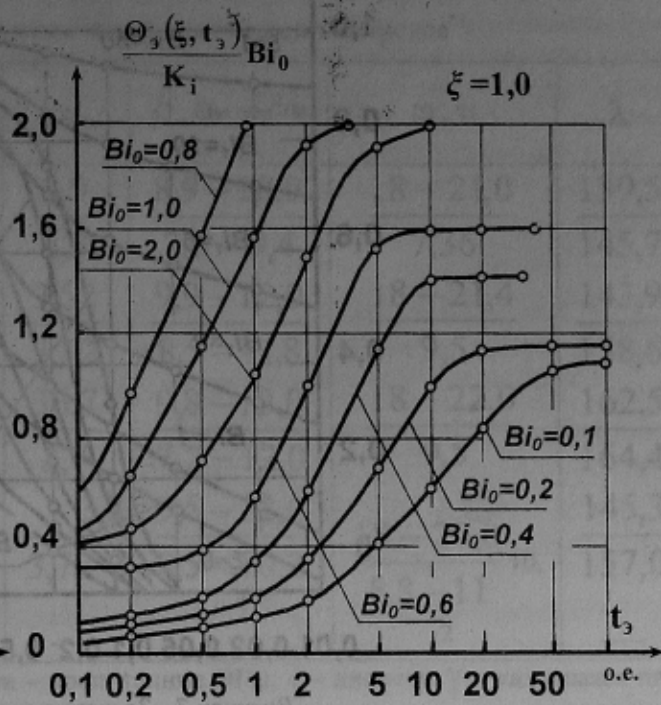


Рисунок 5 - Зависимость тепловых потерь в функции скорости нагрева ниппельного соединения при $\xi=1,0$.

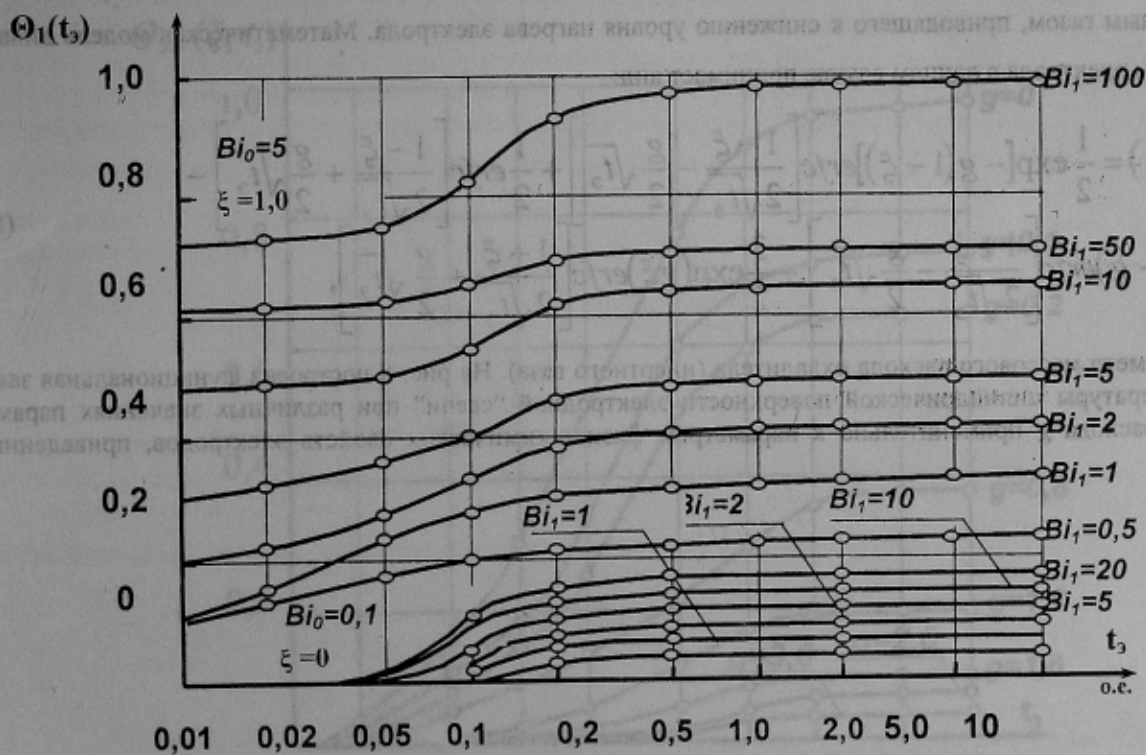


Рисунок 6 - Зависимость температуры нагрева ниппеля при фиксированных значениях Bi_0, Bi_1 .

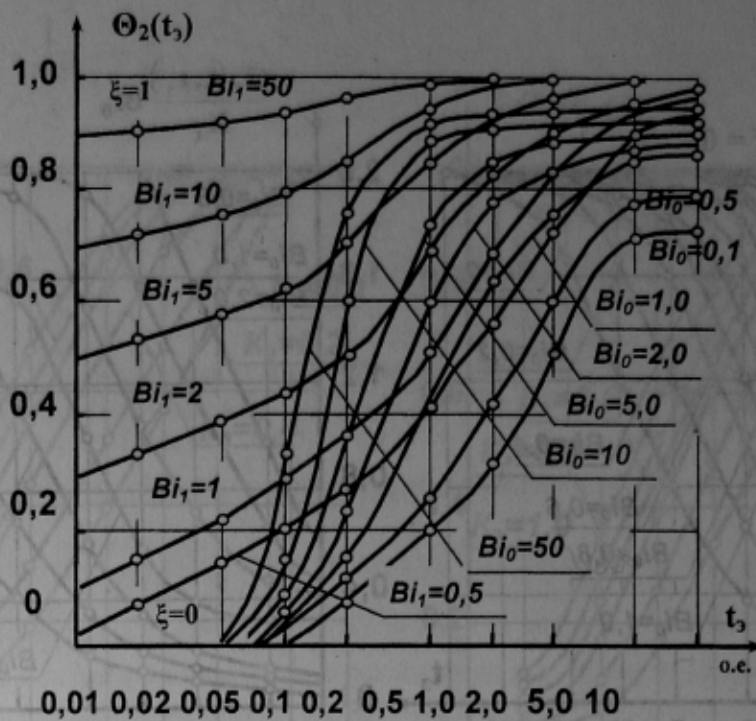


Рисунок 7 - Зависимость температуры нагрева секции электрода при фиксированных значениях Bi_0, Bi_1 .

д) Влияние асимметричной анизотропии цилиндрических графитированных электродов на величину УЭС цилиндрических участков электродной "свечи" определяется рядом факторов, в т.ч. наличием покрытия или обдува инертным газом, приводящего к снижению уровня нагрева электрода. Математическая модель динамики температуры электрода в данном случае принимает вид:

$$\Theta_{\Delta\delta}(\xi, t_3) = \frac{1}{2} \exp[-g(1-\xi)] \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} - \frac{g}{2}\sqrt{t_3} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{1-\xi}{2\sqrt{t_3}} + \frac{g}{2}\sqrt{t_3} \right] - \frac{1}{2} \exp(-g) \operatorname{erfc} \left[\frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} - \frac{g}{2}\sqrt{t_3} \right] + \frac{3}{2} \exp(g\xi) \operatorname{erfc} \left[\frac{1+\xi}{2\sqrt{t_3}} + \frac{g}{2}\sqrt{t_3} \right], \quad (8)$$

где g – параметр массового расхода охладителя (инертного газа). На рис. 8 построена функциональная зависимость температуры цилиндрической поверхности электродной "свечи" при различных значениях параметра массового расхода g применительно к параметрам физико-химических свойств электродов, приведенных в табл. 1.

Таблица 1 - Характеристика физико-химических показателей электродов^{*1}

d, мм	γ , г/см ³	ϵ , %	$\sigma_{\text{разр}}$, МПа	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	α	ρ , Ом·мм ² /м	ω , %	λ
300	1,547	30,0	436	894	2,9	8,9 - 10,0	18 - 21,0	139,5
	1,576	28,4	590	1230	2,8	7,6 - 9,4	7,36	145,7
350	1,575	29,0	380	975	3,52	9,9 - 12,0	18 - 21,4	143,9
	1,620	26,7	546	1350	3,52	8,5 - 11,8	9,5	158,6
500	1,583	28,3	465	868	36,7	9,8 - 12,0	18 - 22,0	162,5
	1,628	26,3	571	1300	3,7	7,2 - 12,0	9,5	164,4
555	1,551	29,3	250	600	3,8	9,5 - 12,0	18 - 20,0	145,3
555 ^{*2}	1,594	27,9	448	940	3,72 -	8,5 - 10,2	8,8 - 11 ¹⁰	157,0
	1,586	28,9	477	1058	----	7,0-9,5	2	-----

*1 Числители - обычные марки ЭГ, знаменатели - пропитанные ЭГП; d - диаметр γ - кажущаяся плотность, ϵ - плотность, $\sigma_{\text{разр}}$, $\sigma_{\text{изг}}$ - механическая прочность на разрыв и изгиб; α - коэффициент термического расширения (КТР), 10^{-6} град⁻¹; ρ - удельное электрическое сопротивление (УЭС), ω - окисляемость (при 900°C в течение 1 ч), λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)

*2 Марки ЭГП производства ОАО Укрграфит.

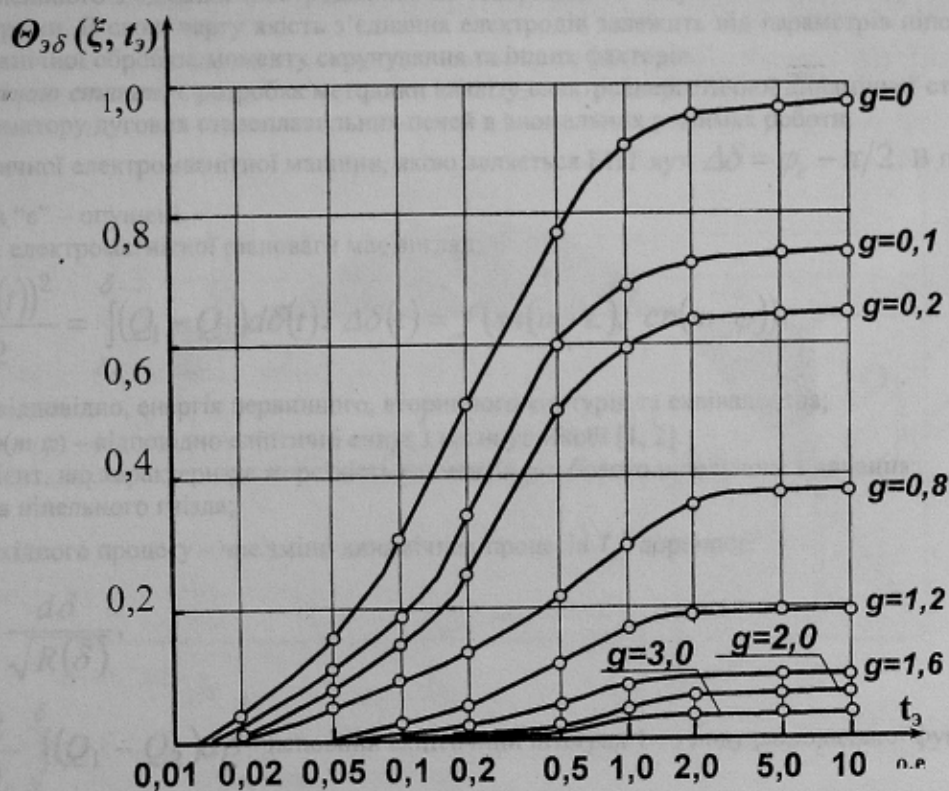


Рисунок 8 - Зависимость температуры цилиндрической поверхности "свечи" в функции параметра массового расхода g применительно к параметрам физико-химических свойств электродов.

В заключении можно сделать **вывод**, что полученные математические модели и построенные графические зависимости оценки температурного режима ниппельного соединения, тепловых потерь в функции зазора между торцами секций электродов, тепловых потерь в функции скорости нагрева ниппельного соединения, температуры нагрева ниппеля и секции электрода необходимо использовать при целостной оценке динамики эксплуатационной эффективности дуговых печей. Полученные закономерности рекомендуются использовать автором данной статьи при составлении энергетических балансов работы сталеплавильных печей и использовать их для определения затрат энергии по статьям.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ivan Trufanov, Vladimir Metelsky, Ludmila Zhornyak, Mohamad S. Richan. The regularization and economic efficiency of the power saving of electric steelmelting algorithms // Электротехника.-2000.-№1.- С.55-64.
2. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок.-М.: Энергия, 1975.-204с.
3. Жуков Н.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы.-М.: Наука, 1975.-295с.
4. Повышение эксплуатационной стойкости пропитанных электродов / Н.Г. Новожилов, М.В. Литвинов, Е.Н. Шабуров и др.; // Сталь.-1981.- №1.- С.43-44.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Бурковским А.М.

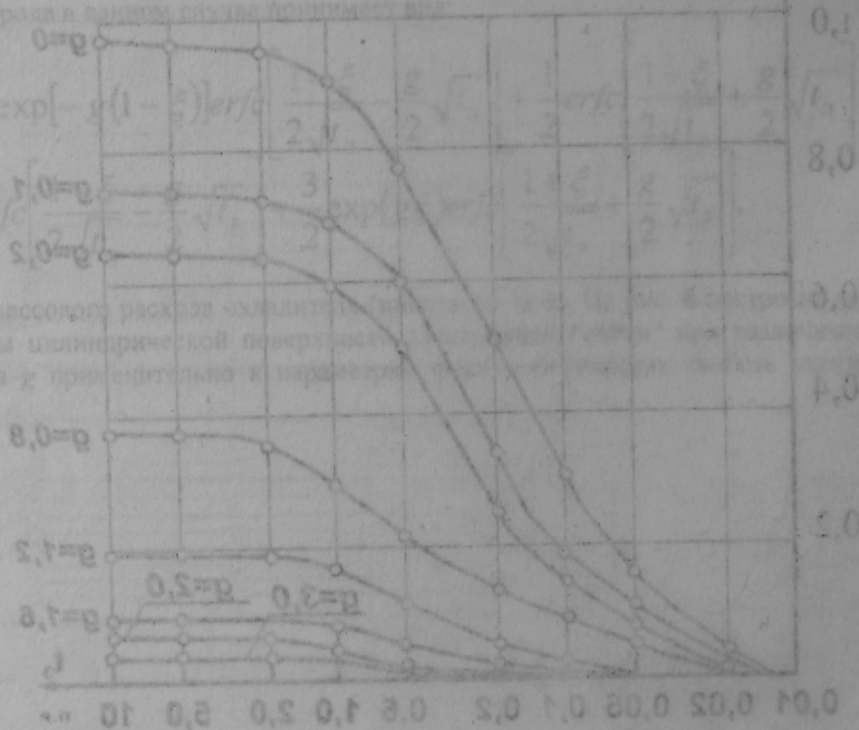


Рис. 5 - зависимость параметра температурного распределения цилиндрической поверхности "свечи" в функции параметра массового расхода μ для различных значений параметра q . При этом $q = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{\pi \cdot d \cdot L \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}$ - параметр массового расхода, $\mu = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{\pi \cdot d \cdot L \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}$ - параметр температурного распределения цилиндрической поверхности "свечи".