

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕМАССОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КЕРНА ПЕЧИ ГРАФИТИРОВАНИЯ АЧЕСОНА

Розроблено методику оцінки температури керна печі графітування. Сформовано рівняння енергетичного балансу, що враховує втрати електроенергії до входу в піч, втрати теплоти: з поверхні керна, на нагрівання керна, на нагрівання та випаровування вологи; на газифікацію пересипки. Визначено коефіцієнти: тепловіддачі з поверхні керна та витрат електроенергії на прямий нагрів теплоізоляції

Ключові слова: графітування, піч Ачесона, газифікація, втрати електроенергії, температура, енергетичний баланс

Разработана методика оценки температуры керна печи графитирования. Составлено уравнение энергетического баланса, учитывающее потери электроэнергии до входа в печь, потери теплоты: с поверхности керна, на нагрев керна, на нагрев и испарение влаги, на газификацию пересыпки. Определены коэффициенты: теплоотдачи с поверхности керна и потерь электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции

Ключевые слова: графитирование, печь Ачесона, газификация, потери электроэнергии, температура; энергетический баланс

Е. Н. Панов
Доктор технических наук, профессор*

E-mail: panov@rst.kpi.ua

А. Я. Карвацкий
Доктор технических наук, профессор*

E-mail: anton@rst.kpi.ua

С. В. Лелека
Кандидат технических наук,
научный сотрудник**

E-mail: sleleka@rst.kpi.ua

Т. В. Лазарев
Аспирант*

E-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua

А. Ю. Педченко
Аспирант*

E-mail: anatolek@rst.kpi.ua

Д. Г. Швачко
Ассистент*

E-mail: max_shmag@ukr.net

*Кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения***

**Научно-исследовательский центр

«Ресурсосберегающие технологии»***

***Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

Искусственный графит в промышленных масштабах получают путем нагрева углеродистого материала до температур свыше 2500 °С в печах сопротивления, в частности в печах Ачесона переменного и постоянного тока [1]. Степень графитирования изделий, а соответственно и их качественные характеристики, зависят от исходного материала, степени термообработки (уровня температур) и времени выдержки в печи при необходимом уровне температур [2]. Прямое измерение температур в печах Ачесона крайне затруднительно, поэтому управление процессом графитирования осуществляется по уровню достигнутого удельного расхода электроэнергии (УРЭ) на высокой стороне питающего оборудования [1]. Такой подход легко реализуем, однако имеет ряд недостатков, а именно не учитывает особенности печного, токопреобразующего и токоподводящего оборудования, отличие режимов ввода электроэнергии на неуправляемом участке, нештатные ситуации и т. д. [3]. Поэтому действующие УРЭ могут быть значительно завышенными, чтобы гарантированно обеспечить необходимое качество графитируемой продукции.

Учитывая, что одним из векторов развития промышленности является снижение энергетических затрат при производстве продукции, задача разработки методики оценки теплового состояния изделий в печи Ачесона и ее внедрение в систему автоматического управления (АСУ) процесса графитирования является актуальной.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Проблеме определения температурного состояния изделий в печи Ачесона посвящено большое количество работ [4]. Их анализ показал, что наиболее эффективным и качественным инструментом для решения такой задачи является численное моделирование [3, 5]. Ак-

туальной работой по данной теме является работа [6]. Однако применение конечно-элементных численных моделей теплоэлектрического и механического (ТЭМ) состояния печи Ачесона в условиях производства стран СНГ затруднено, что в основном связано с высокими требованиями к обслуживающему персоналу и сложностью внедрения соответствующих программных комплексов в АСУ. Аналогичные недостатки присущи предлагаемым методикам многих авторов:

- определения параметров печной петли на основе трехмерной модели электромагнитного преобразования энергии переменного тока в тепловую [7], расчеты в которой предлагается проводить в пакетах COMSOL MultyPhysics и ANSYS;

- исследования ТЭМ состояния печи Ачесона с применением модели Дракера-Прагера [8];

- определения теплоэлектрического состояния печи на базе метода элементарных энергетических балансов [9].

Поэтому практический интерес представляют параметрические уравнения, дающие возможность оперативно определять среднеобъемную температуру ядра печи Ачесона (заготовки и ядерная электропроводная пересыпка).

Среди научных работ, посвященных разработке параметрических уравнений для определения среднеобъемной температуры ядра печи Ачесона, следует выделить [10], в которой предлагается использовать зависимость безразмерной температуры от числа Фурье. Однако область применения предложенного уравнения ограничена П-образными печами Ачесона постоянного тока при графитировании электродов большого диаметра. Также следует отметить, что все рассмотренные выше методики определения теплового состояния ядра печи Ачесона не учитывают потери теплоты на газификацию ядерного кокса [3], а часть из них не учитывает особенности токопреобразующего и токоподводящего оборудования.

Соответственно актуальным является разработка методики оперативного определения теплового состояния ядра печи графитирования Ачесона, учитывающей потери электроэнергии до входа в печь, потери теплоты: с поверхности ядра, на нагрев ядра, на нагрев и испарение влаги, а также на газификацию ядерной пересыпки. Разработанная методика должна основываться на подходах, позволяющих интегрировать ее в действующие АСУ с незначительными временными и финансовыми затратами, а значит характеризоваться низкими требованиями к вычислительным возможностям оборудования АСУ и иметь легко программируемый алгоритм на языках низкого уровня.

3. Цель и задачи исследования

Задачей настоящего исследования является разработка методики определения среднеобъемной температуры ядра печи Ачесона в режиме реального времени, учитывающей потери электроэнергии до входа в печь, на прямой нагрев теплоизоляции, на нагрев и испарение влаги и на химические реакции газификации ядерной пересыпки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка методики оперативной оценки среднеобъемной температуры ядра печи Ачесона;
- экспериментально-расчетное определение коэффициентов пропорциональности;
- верификация разработанной методики.

4. Методика определения среднеобъемной температуры ядра печи Ачесона

Анализ литературных источников [1, 11], показал, что исходными данными для методики оперативной оценки теплового состояния ядра печи могут служить:

- электрические характеристики кампании графитирования – активная мощность, вторичное напряжение, коэффициент мощности, сила тока и пр.;
- массовые характеристик загрузки печи;
- геометрические характеристики загрузки печи;
- влажность пересыпчных материалов.

Объем и информативность исходных данных, особенности оборудования АСУ печей Ачесона и положительный опыт внедрения на предприятии электродной промышленности методики управления процессом обжига электродных заготовок в многокамерных печах Ридхамера [12] показали, что поставленную задачу рационально решить на базе уравнения энергетического баланса ядра печи Ачесона.

$$Q_E = Q_{core} + Q_{\alpha} + Q_{le} + Q_{H_2O} + Q_{gas}, \quad (1)$$

где Q_E – расход активной электроэнергии на высокой стороне (штатно контролируется и отображается в ведомости АСУ), Дж; Q_{core} – теплота ядра, Дж; Q_{α} – потери теплоты с поверхности ядра, Дж; Q_{le} – потери активной электроэнергии, Дж; Q_{H_2O} – потери теплоты на нагрев и испарение влаги ядерной пересыпки, Дж; Q_{gas} – потери теплоты на процесс газификации ядерной пересыпки, Дж.

Теплота ядра выражается через массу ядра и прирост энтальпии

$$Q_{core} = m_{core} (h_C(T(\tau)) - h_C(T_0)), \quad (2)$$

где m_{core} – масса ядра, кг; $h_C(T)$ – массовая энтальпия материала ядра, Дж/кг; T – среднеобъемная температура ядра на момент времени τ , К; T_0 – среднеобъемная температура ядра на начало кампании (можно принять равной температуре окружающей среды), К; τ – время, с.

Масса ядра определяется как

$$m_{core} = m_{blank} + m_{bd}, \quad (3)$$

где m_{blank} – масса заготовок, кг; m_{bd} – масса сухой пересыпки, кг.

Массу сухой пересыпки можно определить, как

$$m_{bd} = m_{bw} (1 - v_{bw}), \quad (4)$$

где m_{bw} – масса влажной пересыпки, кг; v_{bw} – влажность пересыпки, доли.

Температурную зависимость массовой энтальпии материала ядра (углерод) можно выразить следующей зависимостью [5, 13]

$$h_c(T) = 5,78 \cdot 10^{-14} T^6 - 5,3 \cdot 10^{-10} T^5 + 1,87 \cdot 10^{-6} T^4 - 3,22 \cdot 10^{-3} T^3 + 3,14 T^2 - 2,16 \cdot 10^2 T + 1,68 \cdot 10^4. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации (5) составляет $R^2 = 0,999$.

Потери теплоты с поверхности керна можно выразить зависимостью

$$Q_\alpha = \int_0^\tau P_\alpha(\bar{T}(\tau)) d\tau = S \int_0^\tau \alpha(\bar{T}(\tau))(T(\tau) - T_{env}) d\tau, \quad (6)$$

где P_α – мощность тепловых потерь с поверхности керна, Вт; S – площадь поверхности керна, м²; α – эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности керна в теплоизоляции, Вт/(м²К); \bar{T} – определяющая температура, К; T_{env} – температура окружающей среды, К.

Потери активной электроэнергии зависят от множества непостоянных факторов [3, 1]: режима ввода мощности, схемы загрузки керна, сопротивления керна, режима работы питающих агрегатов (ПА) и конденсаторной установки (КУ) и т. д.

$$Q_{le} = Q_{elti} + Q_{ft}, \quad (7)$$

где Q_{elti} – потери активной электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции, Дж; Q_{ft} – потери активной мощности до входа в печь, Дж.

Для определения потерь активной мощности до входа в печь использовалась методика [3], дающая возможность на основании характеристик питающего оборудования и штатно контролируемых АСУ электрических параметров процесса графитирования определять токовую нагрузку и падение напряжения на печи графитирования, ее активное сопротивление и потери электроэнергии до входа в печь

$$Q_{ft} = \int_0^\tau P_{ft}(\tau) d\tau = \int_0^\tau (P_{tr}(\tau) + I_f^2(\tau) R_{lecf}(\tau)) d\tau, \quad (8)$$

где P_{ft} – мощность активных потерь электроэнергии до входа в печь, Вт; P_{tr} – мощность активных потерь электроэнергии в агрегатах питающей установки, Вт; I_f – сила тока печной цепи, А; R_{lecf} – активное сопротивление эквивалентное потерям электрической мощности в ошиновке, Ом.

Активное сопротивление эквивалентное потерям электрической мощности в ошиновке можно определять, либо измерением падения напряжения на печи, либо посредством усредненной зависимости, полученной путем обработки серии натурных экспериментов по измерению падения напряжения на печах Ачесона [3]

$$R_{lecf}(\tau) = -0,0591307194 + \frac{0,0711081656}{100R_{cf}(\tau) + 0,119165836}, \quad (9)$$

где R_{cf} – активное сопротивление печной цепи, Ом.

Коэффициенты уравнения (9) справедливы для исследованных в [3] печей Ачесона переменного тока.

Потери электроэнергии в агрегатах питающей установки, сила тока и активное сопротивление печной

цепи определяются на базе данных АСУ и паспортных характеристик агрегатов с помощью известных электротехнических зависимостей [14].

Потери активной электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции зависят от количества электроэнергии, подведенной в печь, и электрического сопротивления керна и теплоизоляции (10), которые в свою очередь зависят от температуры керна и теплоизоляции, а соответственно от количества электроэнергии подведенной в печь

$$Q_{elti} = \int_0^\tau P_{elfi}(\tau) d\tau = \int_0^\tau k_{elti}(T(\tau)) P_{elf}(\tau) d\tau = \int_0^\tau k_{elti}(T(\tau))(P_E(\tau) - P_{ft}(\tau)) d\tau, \quad (10)$$

где P_{elfi} – мощность потерь электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции, Вт; k_{elti} – коэффициент пропорциональности; P_{elf} – активная мощность подведенная в керна печи, Вт; P_E – активная мощность на высокой стороне трансформатора (штатно контролируется и отображается в ведомости АСУ), Вт.

Потери теплоты при протекании эндотермической реакции газификации кривой пересыпки можно выразить уравнением [15]

$$Q_{gas} = \int_0^\tau v_{H_2O,gas}(\tau) q_{h,gas}(T(\tau)) d\tau, \quad (11)$$

где $v_{H_2O,gas}$ – скорость испарения влаги, участвующей в реакции газификации, кг/с; $q_{h,gas}$ – тепловой эффект реакций газификации, приведенный к массе пара, Дж/кг.

При условии, что основной реакцией процесса газификации является реакция «водяного газа», величины $q_{h,gas}$ определяется по [16]

$$q_{h,gas}(T) = -7165100 - 718,25T + 0,1162T^2 + 0,00007903T^3. \quad (12)$$

Скорость испарения влаги, участвующей в процессе газификации, зависит от влажности теплоизоляции, объема зоны испарения и количества теплоты, подведенной в эту зону

$$v_{H_2O,gas}(\tau) = \frac{dm_{H_2O,gas}(\tau)}{d\tau} = \frac{P_{w,gas}(\tau)}{H_{H_2O}}, \quad (13)$$

где $m_{H_2O,gas}$ – масса испарившейся влаги, кг; $P_{w,gas}$ – мощность, затраченная на нагрев и испарение влаги, Вт; H_{H_2O} – массовая энтальпия воды с учетом скрытой теплоты парообразования, Дж/кг

$$H_{H_2O} = h_{H_2O}(T_L) - h_{H_2O}(T_0) + L_{H_2O}, \quad (14)$$

где h_{H_2O} – массовая энтальпия воды, Дж/кг; L_{H_2O} – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; T_L – температура испарения воды, К.

Мощность, затраченная на нагрев и испарение влаги, определяется соотношением

$$P_{w, gas}(\tau) = \frac{P_{in, zwg}(\tau)}{1 + \frac{m_{ti, zwg} h_c(T(\tau))}{m_{H_2O, zwg}(\tau) H_{H_2O}(T(\tau))}} = \frac{P_{in, zwf}(\tau)}{1 + \frac{m_{ti, zwg}(\tau) h_c(T(\tau))}{m_{ref, H_2O, zwg} - \int_0^{\tau-0} \frac{P_{w, gas}(\tau) d\tau}{H_{H_2O}}}} H_{H_2O}(T(\tau)), \quad (15)$$

где $P_{in, zwg}$ – мощность, подведенная в зону испарения, Вт; $m_{ti, zwg}$ – масса теплоизоляции в зоне испарения, кг; $m_{H_2O, zwg}$ – масса влаги в зоне испарения, кг; $m_{ref, H_2O, zwg}$ – масса влаги в зоне испарения на начало кампании, кг.

Мощность, подведенную в зону испарения, можно оценить как

$$P_{in, zwg}(\tau) = (P_{\alpha}(\bar{T}(\tau)) + P_{elfi}) \frac{h_f w_f - h_{core} w_{core}}{h_{zwg} w_{core}}, \quad (16)$$

где h_f и w_f – высота и ширина печи, м; h_{core} и w_{core} – высота и ширина ядра, м; h_{zwg} – высота зоны испарения влаги в теплоизоляции, м.

Масса теплоизоляции в зоне испарения и масса влаги в зоне испарения на начало кампании определяются согласно следующим зависимостям

$$m_{ti, zwg} = h_{zwg} w_{core} l_{core} \rho_{tiw} (1 - v_{tiw}), \quad (17)$$

$$m_{ref, H_2O, zwg} = h_{zwg} w_{core} l_f \rho_{tiw} v_{tiw}, \quad (18)$$

где l_{core} – длина печи, м; ρ_{tiw} – плотность влажной подиной теплоизоляции, кг/м³; v_{tiw} – влажность теплоизоляции, доли.

Анализ результатов натуральных экспериментов по определению теплового состояния печи Ачесона [3], показал, что высота зоны испарения влаги из теплоизоляции составляет 0,3...0,35 м.

Потери теплоты на нагрев и испарение влаги из яровой пересыпки можно определить как

$$Q_{H_2O} = \int_0^{\tau} P_{H_2O}(\tau) d\tau = \int_0^{\tau} \frac{P_{elf}(\tau) - P_{\alpha}(\bar{T}(\tau)) - P_{elfi}(\tau) - P_{w, gas}(\tau)}{m_{bw}(\tau) h_c(T(\tau))} dt. \quad (19)$$

$$1 + \left[\frac{\int_0^{\tau-0} P_{H_2O}(\tau) d\tau}{m_{bw} v_{bw} - \frac{\int_0^{\tau-0} P_{H_2O}(\tau) d\tau}{H_{H_2O}}} \right] H_{H_2O}(T(\tau))$$

Для определения среднemasсовой температуры из системы уравнений (1)–(19) можно использовать метод дискретизации по времени. Искомая величина в полученном дискретном нелинейном уравнении определяется методом хорд.

Разработанная методика основывается на штатно контролируемых параметрах работы печи Ачесона, легко алгоритмируется и дает возможность получать данные в режиме реального времени.

5. Методы исследования коэффициентов для оперативного определения среднemasсовой температуры ядра печи Ачесона

Из приведенных выше уравнений методики определения среднemasсовой температуры ядра печи Ачесона очевидно, что неизвестными членами являются:

- эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности ядра (6);
- коэффициент пропорциональности, учитывающий потери активной электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции ядра (10).

Для определения температурных зависимостей выше обозначенных коэффициентов используются результаты серии расчетных оценок теплоэлектрического состояния печей Ачесона различной конструкции и схем загрузки ядра. Расчеты проводятся на численной модели механического и теплоэлектрического (МТЭ) состояния печи Ачесона, которая прошла верификацию на данных натуральных измерений и учитывает потери электроэнергии до входа в печь, потери теплоты на нагрев и испарение влаги, а также на газификацию яровой пересыпки [3].

Результаты расчетов обрабатываются таким образом, чтобы получить временные зависимости членов уравнения энергетического баланса ядра печи Ачесона (1), определяющей температуры ядра печи, среднemasсовой температуры ядра и мощности активных потерь электроэнергии до входа в печь. Используя полученные временные зависимости, а также исходные временные зависимости электрических характеристик кампаний и геометрию загрузки путем решения уравнений (6) и (10) определяются неизвестные α и k_{elfi} , соответственно.

Верификация разработанной методики оперативного определения среднemasсовой температуры ядра печи Ачесона проводилась:

- путем сравнения рассчитанной по ней температуры, с температурой, полученной на верифицированной численной модели МТЭ состояния печи Ачесона;
- сопоставлением рассчитанной температуры ядра для различных кампаний графитирования с качественными характеристиками готовой продукции.

6. Результаты исследований коэффициентов для оперативного определения среднemasсовой температуры ядра печи Ачесона

Результаты исследований коэффициентов для методики оперативного определения среднemasсовой температуры ядра печи Ачесона приведены на рис. 1, 2.

Результаты сопоставления среднemasсовой температуры ядра, полученные с помощью численной модели МТЭ состояния печи Ачесона и по разработанной методике, приведены на рис. 3.

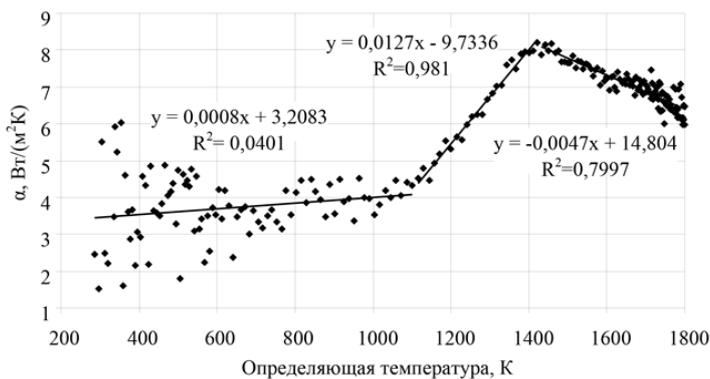


Рис. 1. Температурная зависимость эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна

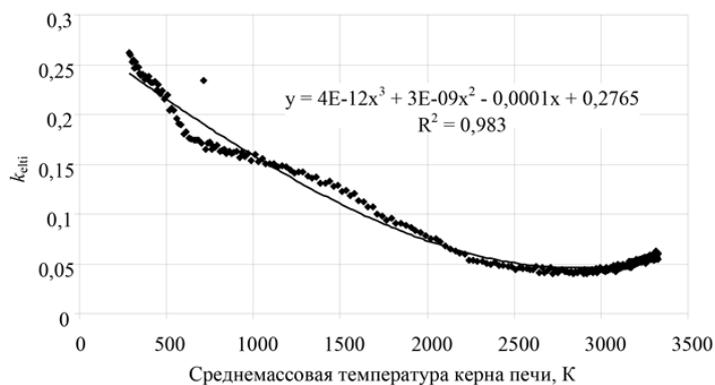


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента пропорциональности k_{etti} для печей Ачесона переменного тока

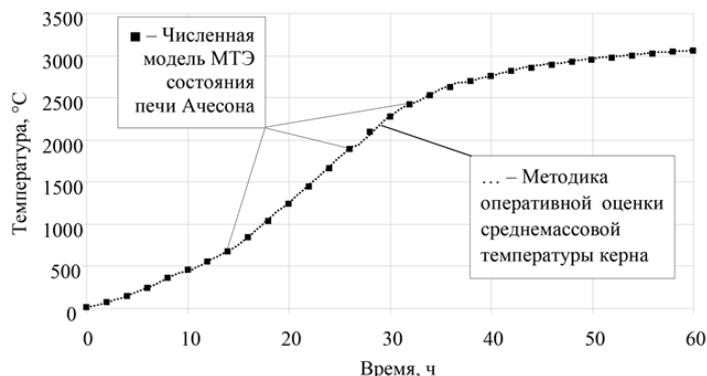


Рис. 3. Сопоставление среднемассовых температур зерна, полученных с помощью численной модели МТЭ состояния печи Ачесона и при решении уравнения (1)

7. Анализ результатов разработки методики оперативного определения теплового состояния зерна печи графитирования

Анализ полученных результатов исследования показал, что:

- температурная зависимость эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна (рис. 1) имеет три ярко выраженных зоны:
- зона 1 – определяющая температура ниже 1100 К, что соответствует среднемассовой температуре зерна ~1900 К (1627 °С);

- зона 2 – определяющая температура от 1100 К до 1400 К, что соответствует среднемассовой температуре зерна от ~1900 К (1627 °С) до ~2500 К (2227 °С);

- зона 3 – определяющая температура свыше 1400 К, что соответствует среднемассовой температуре зерна ~2500 К (2227 °С);

- существенный разброс значений эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна в зоне 1 связан с большим шагом интегрирования по времени в использованной численной модели и сильной зависимостью температурного поля печи в этом диапазоне температур от содержащейся в сыпучих материалах влаги;

- рост эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна в зоне 2 связан с ростом эффективной теплопроводности теплоизоляционной шихты окружающей зерн печи;

- снижение эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна в зоне 3 связано с интенсивным ростом эффективной теплоемкости материалов зерна. Рост эффективной теплоемкости материалов зерна в диапазоне температур зоны 3 связан с началом процесса графитирования и частичной сублимацией углерода;

- температурная зависимость коэффициента пропорциональности k_{etti} для печей Ачесона переменного тока (рис. 2) имеет локальный минимум при среднемассовой температуре зерна ~2800 К (2527 °С);

- характер температурной зависимости коэффициента пропорциональности k_{etti} достаточно точно повторяет характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) зерна печи (зерновой пересыпки). Соответственно снижение коэффициента пропорциональности k_{etti} до среднемассовой температуры зерна ~2800 К (2527 °С) связано с интенсивным снижением УЭС зерновой пересыпки, а рост после достижения среднемассовой температуры зерна уровня ~2800 К (2527 °С) – с ростом УЭС зерновой пересыпки;

- разработанная методика дает возможность с высокой точностью определить среднемассовую температуру зерна (рис. 3). При этом погрешность предложенной методики не превышает погрешности численной модели МТЭ состояния печи Ачесона.

8. Выводы

Проведенные исследования позволили разработать методику оперативной оценки среднемассовой температуры зерна учитывающую:

- потери электроэнергии до входа в печь;
- потери теплоты с поверхности зерна;
- потери теплоты на нагрев зерна;
- потери теплоты на нагрев и испарение влаги;
- потери теплоты на газификацию зерновой пересыпки.

Разработанная методика легко реализуема на аппаратном обеспечении действующих АСУ процессом графитирования.

Расчетным путем установлены температурные зависимости эффективного коэффициента теплоотдачи с поверхности зерна печи и коэффициента пропорциональности, учитывающего потери активной электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции зерна. Анализ полученных зависимостей показал, что характер температурной зависимости коэффициента пропорциональности учитывающего потери активной электроэнергии на прямой нагрев теплоизоляции зерна достаточно точно повторяет характер температурной зависимости УЭС зерна печи (зерновой пересыпки).

Верификация разработанной методики показала, что ее погрешность по среднemasсовой температуре

зерна не превышает погрешность численной модели МТЭ состояния печи Ачесона.

Предложенная методика апробирована в условиях электродного производства ПАТ «Укрграфит», Украина. В процессе апробации выполнялось сопоставление расчетных среднemasсовых температур зерна и характеристик качества полученной продукции (удельное электрическое сопротивление, выход годных) для различных кампаний графитирования, что позволило определить уровень температур зерна, обеспечивающий наперед заданное значение УЭС изделий и снизить, на последующих кампаниях, УРЭ при сохранении необходимо уровня качества графитированной продукции.

Литература

1. Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов [Текст]: учеб. пос. / Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Фиалков, А. С. Углеграфитовые материалы [Текст] / А. С. Фиалков. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
3. Лелека С. В. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона [Текст]: монография / С. В. Лелека, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2014. – 238 с.
4. Знамеровский, В. Ю. Математическое моделирование процесса графитации [Текст] / В. Ю. Знамеровский. – М.: Металлургия, 1994. – 64 с.
5. Кузнецов, Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст]: монография / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
6. Жученко А. І. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції [Текст]: монография / А. І. Жученко, М. В. Коржик, С. В. Кутузов. – К.: НТУУ «КПИ», Вид. дім «Кієво-Могилянська академія», 2013. – 224 с.
7. Ярымбаш, Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 1 – С. 49–54.
8. Панов, Е. Н. Применение модели Дракера-Прагера для исследования состояний печи графитации [Текст] / Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, М. В. Коржик, И. Л. Шилович, С. В. Лелека // Вісник НТУУ «КПИ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження: зб. наук. праць. – 2011. – № 1 (7) додаток. – С. 37–44.
9. Шкуланов, Е. Е. Особенности моделирования температурных полей в печах графитации прямого нагрева [Текст] / Е. Е. Шкуланов, Д. М. Кузнецов // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-2000., С-Пб. – 2000. Т. 3, секц. 3. – С. 198–199.
10. Панов, Е. Н. Расчетно-экспериментальное определение температурных полей зерна в П-образных печах графитации постоянного тока [Текст] / Е. Н. Панов, С. В. Кутузов, С. В. Лелека, И. Л. Шилович, М. Ф. Боженко // Промышленная теплотехника. – 2007. – № 2. – С. 22–28.
11. Пат. на корисну модель 23422 Україна, МПК7 C01B 31/04, G01K 3/00. Спосіб визначення середньої температури заготовок в печі графітації [Текст] / Панов Є. М., Кутузов С. В., Уразлина О. Ю., Лелека С. В., Шилович І. Л., Боженко М. Ф., Коржик М. В. – заявник та патентовласник НТУУ «КПИ». – № u200613780 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 25.05.2007, Бюл. № 7
12. Пат. на корисну модель 69350 Україна, кл. МПК F27B 5/00, C01B 31/00. Спосіб випалювання вуглецевих виробів в багатокамерній кільцевій печі [Текст] / Панов Є. М., Карвацкий А. Я., Коржик М. В., Лелека С. В., Пулінець І. В., Лазарев Т. В. – заявник і патентовласник НТУУ «КПИ». – № u201112234; заявл. 25.04.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. – 6 с.
13. Шулепов, С. В. Физика углеграфитовых материалов [Текст] / С. В. Шулепов. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
14. Борисов Ю. М. Электротехника. 2-е изд., перераб. и доп. [Текст]: учебник / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
15. Химические вещества из угля [Текст] / пер. с нем.; под ред. И. В. Калечица. – М.: Химия, 1980. – 616 с.
16. Богданов, Н. Н. Полукоксование и газификация кокса [Текст] / Н. Н. Богданов. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 268 с.