

ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф., ЛЕЛЕКА С. В., к.т.н., н.с., КАРВАЦЬКИЙ А. Я. д.т.н., проф., ПЕДЧЕНКО А. Ю., м.н.с., БОЖЕНКО М. Ф., к.т.н., доц., ІВАНЕНКО Д. О., магістрант Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЕКСПРЕС-МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОМАСОВОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ В ПЕЧАХ ГРАФІТУВАННЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ КАСТНЕРА

*Наведена методика визначення температури заготовок печі графітування Кастнера. Сформоване рівняння енергетичного балансу печі, в якому враховується кількість підведеної електричної енергії з урахуванням її втрат в пічних трансформаторах, випрямлювачах і супутньому обладнанні; корисні витрати енергії на нагрівання заготовок; паразитні витрати на прямий нагрів теплоізоляції, компенсаційної вставки та струмовідводу; витрати на нагрів та випаровування вологи з теплоізоляції, втрати з поверхні заготовок в навколишнє середовище і витрати енергії на ендотермічну реакцію газифікації. Розрахунками на чисельній моделі механічного та теплоелектричного стану печей Кастнера визначені температурні залежності коефіцієнта пропорційності паразитних витрат теплоти і ефективного коефіцієнта теплопередачі від поверхні заготовок в навколишнє середовище.*

**Ключові слова:** графітування, вугільні заготовки, піч Ачесона, піч Кастнера, теплоізоляція, температура, електрична енергія, втрати електроенергії, пічний трансформатор, енергетичний баланс.

### DOI:

© Панов Є. М., Лелека С. В., Карвацький А. Я., Педченко А. Ю., Боженко М. Ф., Іваненко Д. О., 2018.

**Вступ.** Завершальною стадією при виробництві штучного графіту, який знайшов широке застосування в багатьох галузях промисловості, є процес графітування, сутність якого полягає в високотемпературній обробці виробів до 2500 – 3000 °С в спеціальних графітувальних електричних однофазних печах опору за двома технологіями: Ачесона і Кастнера. Опором є матеріали, що графітуються, через які протікає електричний струм, нагріваючи їх. При цьому в малих об'ємах печі можливо сконцентрувати велику кількість енергії, яка виділяється при проходженні електричного струму, що дозволяє створити вказані вище температури [1 - 3].

За технологією Ачесона нагрівання вугільних заготовок здійснюється теплопровідністю і випромінюванням від графітової пересипки, яка міститься в просторі між ними, в нормальних прямих і П-подібних печах, що працюють на перемінному і постійному струму. Процес графітування в печах Ачесона є доволі енергоємним, витрати електроенергії при його здійсненні складають 4000–5000 тис. кВт·год/т продукції [4].

У графітувальних печах Кастнера на подину завантажують шар теплоізоляції, що складається з суміші тонкоподрібнених вуглецевих матеріалів, на якій розташовують декілька вуглецевих заготовок послідовно, паралельно або паралельно-послідовно. Нагрівання заготовок здійснюють за рахунок прямого пропускання через них електричного струму. Питома витрата електричної енергії в таких печах становить близько 3500 кВт·год/т, що суттєво менше ніж в печах Ачесона [5].

Визначальним параметром, що характеризує закінчення процесу графітування, є рівень досягнутих температур, достовірні вимірювання яких в реальних умовах пов'язані з суттєвими технічними складнощами. На практиці управління процесом графітації здійснюють за наперед заданими витратами енергії, тобто без зворотного зв'язку. Тому актуальним завданням є розробка непрямих методів оцінки теплового стану печей і впровадження на їх основі системи автоматичного управління процесами графітування, що дозволить зменшити енергоємність цих процесів.

Автори роботи [8] для П-подібних печей Ачесона постійного струму при графітуванні заготовок великого діаметру запропонували визначати середньооб'ємну температуру ядра за отриманою ними залежністю безрозмірної температури від числа Фур'є. Для практичного користування отриманим рівнянням необхідно знати геометричні розміри ядра в поперечному і повздовжньому перерізах печі, температурні залежності теплофізичних властивостей вуглеграфітових виробів та поточні значення підведеної електроенергії.

Найбільш вагомим дослідженням з оперативного визначення середньомасової температури ядра печей Ачесона в режимі реального часу є робота [9], в якій враховані втрати електричної енергії до входу в піч, на прямий нагрів теплоізоляції, на нагрів та випаровування вологи і на хімічні реакції газифікації ядерної пересипки.

**Метою статті** є розробка методики оперативного визначення у реальному часі температури вуглеграфітових заготовок при графітуванні за технологією Кастнера.

**Методика визначення середньомасової температури заготовок в печах Кастнера.** В основу методики, що розробляється, покладена ідея встановлення залежностей температури вугільних заготовок, за аналогією з викладками роботи [9] для графітувальних печей Ачесона, від часу з початку кампанії; масових та геометричних характеристик завантаження печі; вологості теплоізоляції; електричних характеристик, а саме, активної потужності, вторинної напруги, сили струму, коефіцієнта потужності, і т. ін.

Підведена від джерела живлення електрична енергія за винятком втрат в самому джерелі (пічному трансформаторі) та ошиновці (між трансформатором і піччю) корисно витрачається на нагрівання вугільних заготовок, а решту можна вважати втратами: на нагрівання теплоізоляції, нагрівання і випаровування вологи з неї; на реакцію газифікації; втрати з поверхні заготовок через шар теплоізоляції в навколишнє середовище.

Визначити середньомасову температуру заготовок для будь-якого проміжку часу з початку кампанії ( $T_\tau$ ) можна з рівняння енергетичного балансу, яке для печі Кастнера має наступний вигляд

$$Q_{\text{підв}} = Q_3 + Q_{\text{в}} + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{г}}, \quad (1)$$

де  $Q_{\text{підв}}$  – кількість електричної енергії, яка підведена до графітувальної печі, Дж;  $Q_3$  – витрата енергії на нагрівання заготовок, Дж;  $Q_{\text{в}}$  – паразитні витрати енергії на прямий нагрів теплоізоляції, компенсаційної вставки та струмопідвода, Дж;  $Q_{\text{пов}}$  – втрати енергії з поверхні заготовок в навколишнє середовище, Дж;  $Q_{\text{г}}$  – витрата енергії на ендотермічну реакцію газифікації, Дж.

Кількість підведеної до графітувальної печі електричної енергії, Дж

$$Q_{\text{підв}} = Q_{\text{А}} - Q_{\text{втр.А}}, \quad (2)$$

$Q_{\text{А}}$  – кількість активної електричної енергії на високій стороні трансформатора, Дж;  $Q_{\text{втр.А}}$  – втрати активної енергії до входу в піч, Дж.

Величина  $Q_{\text{А}}$  визначається за технологічними даними процесу графітування (контролюється обслуговуючим персоналом для кожної кампанії і відображається у відомості автоматизованої системи управління - АСУ).

Втрати активної енергії до входу в піч, Дж

$$Q_{\text{втр.А}} = \int_0^\tau P_{\text{втр.А}}(\tau) d\tau = \int_0^\tau [P_{\text{ж}}(\tau) + I_{\text{п}}^2(\tau) R_{\text{ош}}(\tau)] d\tau, \quad (3)$$

де  $\tau$  - час з початку кампанії графітування відповідної печі, с;  $P_{\text{втр.А}}$  – потужність втрат активної енергії до входу в піч, Вт;  $P_{\text{ж}}$  – потужність втрат активної енергії в агрегатах живильної установки (трансформатори, випрямлювачі та супутнє обладнання), Вт;  $I_{\text{п}}$  – сила струму пічного ланцюга, А;  $R_{\text{ош}}$  – активний опір, що еквівалентний втратам електричної енергії в ошиновці, Ом.

Потужність втрат активної енергії в агрегатах живильної установки визначається за співвідношенням

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{А}} - U I_{\text{п}}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{А}}$  – активна потужність на високій стороні пічного трансформатора, Вт;  $U$  – напруга пічного ланцюга на виході з випрямлювача, В.

Потужність пічного трансформатора ( $P_{\text{А}}$ ), силу струму ( $I_{\text{п}}$ ) та напругу ( $U$ ) пічного ланцюга для будь-якого проміжку часу з початку кампанії графітування ( $\tau$ ) визначають за технологічними даними АСУ, а активний опір, що еквівалентний втратам електричної енергії в ошиновці ( $R_{\text{ош}}$ ) – за формулою (5), яка узагальнює серію натурних досліджень з вимірювання падіння напруги на печах Кастнера

$$R_{\text{ош}}(\tau) = (0,0628276 + 2,31 \cdot 10^{-7} I_{\text{п}}) / n_{\text{т}}, \quad (5)$$

де  $n_{\text{т}}$  – кількість паралельно встановлених працюючих пічних трансформаторів.

Корисні витрати енергії на нагрівання заготовок для будь-якого часу  $\tau$  з початку кампанії, Дж, визначаються з рівняння теплового балансу

$$Q_3 = m_3 [h_c(T_\tau) - h_c(T_0)], \quad (6)$$

де  $m_3$  – маса заготовок, кг;  $h_c$  – масова питома ентальпія заготовок, Дж/кг;  $T_\tau$  – поточна середньомасова температура заготовок, К;  $T_0$  – початкова середньомасова температура заготовок, К (зазвичай дорівнює температурі навколишнього середовища).

Температурна залежність масової питомої ентальпії вуглеграфітових заготовок, Дж/кг, має вигляд [1]

$$h_c(T) = 1,68 \cdot 10^4 - 2,16 \cdot 10^2 T + 3,14 T^2 - 3,22 \cdot 10^{-3} T^3 + 1,87 \cdot 10^{-6} T^4 - 5,30 \cdot 10^{-10} T^5 + 5,78 \cdot 10^{-14} T^6. \quad (7)$$

Так звані паразитні витрати активної електричної енергії на прямий нагрів теплоізоляції, компенсаційної вставки та струмопідвода, Дж, визначається опосередковано у залежності від кількості підведеної до печі електричної енергії

$$Q_{\text{дв}} = \int_0^\tau P_{\text{дв}}(\tau) d\tau = \int_0^\tau K_{\text{втр}}(T_\tau) P_{\text{п}}(\tau) d\tau = \int_0^\tau K_{\text{втр}}(T_\tau) [P_{\text{А}}(\tau) - P_{\text{втр.А}}(\tau)] d\tau, \quad (8)$$

де  $P_{\text{дв}}$  – потужність паразитних витрат активної електричної енергії, Вт;  $K_{\text{втр}}$  – ефективний коефіцієнт пропорційності;  $P_{\text{п}}$  – активна потужність, яка підведена до печі, Вт.

Втрати активної енергії з поверхні заготовок через шар теплоізоляції в навколишнє середовище, Дж, визначаються з урахуванням так званого ефективного коефіцієнта теплопередачі, перепаду температур і часу з початку кампанії графітації, та включають в себе витрати енергії на нагрів та випаровування вологи з теплоізоляції, а також на ендотермічну реакцію газифікації.

$$Q_{\text{пов}} = \int_0^\tau P_{\text{пов}}(\bar{T}_\tau) d\tau = F_3 \int_0^\tau K_{\text{еф}}(\bar{T}_\tau) (T_\tau - T_0) d\tau, \quad (9)$$

де  $P_{\text{пов}}$  – потужність теплових втрат з поверхні заготовок, Вт;  $F_3$  – зовнішня площа поверхні заготовок, м<sup>2</sup>;  $K_{\text{сф}}$  – ефективний коефіцієнт теплопередачі від поверхні заготовок через шар ізоляції в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\bar{T}_\tau$  – визначальна температура заготовок, К.

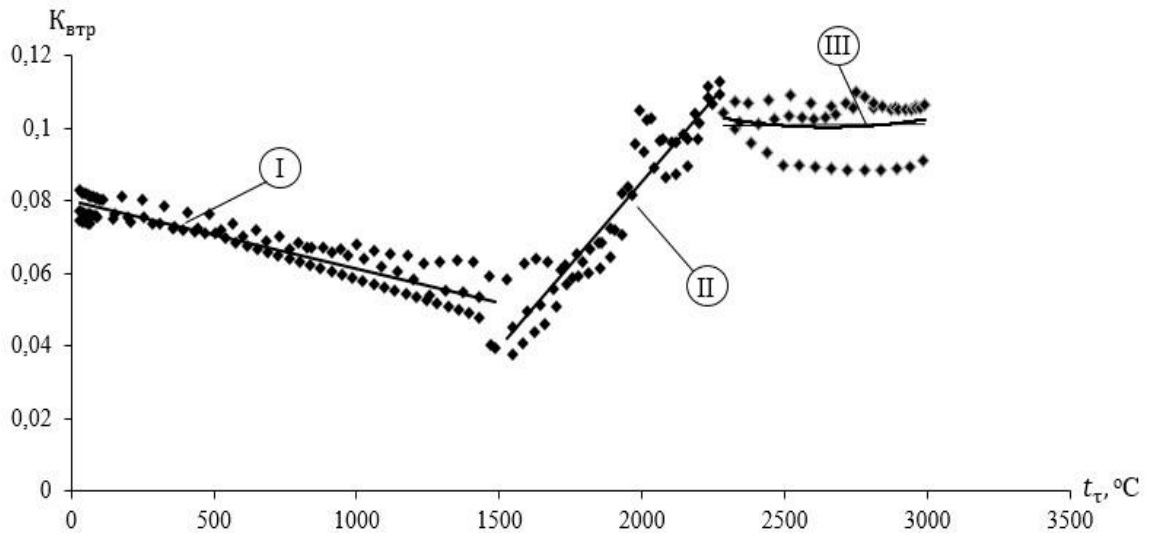
Визначальна температура та зовнішня площа поверхні заготовок обчислюються за наступними співвідношеннями

$$\bar{T}_\tau = 0,5 (T_\tau + T_0); \quad (10)$$

$$F_3 = n (\pi d_3) l_{\text{п}}, \quad (11)$$

де  $l_{\text{п}}$  – довжина печі, м;  $n$  – кількість рядів заготовок в печі.

Для визначення температурної залежності ефективного коефіцієнту пропорційності ( $K_{\text{втр}}$ ) та ефективного коефіцієнта теплопередачі від поверхні заготовок ( $K_{\text{сф}}$ ) використані результати серії розрахункових оцінок теплоелектричного стану печей Кастнера, що виконані на чисельній моделі їх механічного та теплоелектричного стану [10]. Названа модель пройшла перевірку на даних натурних експериментів на печах Кастнера і враховує втрати електроенергії до входу в піч, витрати теплоти на нагрів теплоізоляції, випаровування води з неї і ендотермічну реакцію газифікації. В результаті узагальнення результатів розрахунків отримані залежності від часу кампанії графітування членів рівняння енергетичного балансу печі Кастнера (1), визначальної температури і середньомасової температури вугільних заготовок та потужності активних втрат електричної енергії до входу в піч. З використанням отриманих залежностей, а також вихідних електричних характеристик кампаній та геометрії завантаження шляхом вирішення рівнянь (8,9) визначаються невідомі величини  $K_{\text{втр}}$  та  $K_{\text{сф}}$  (рис. 1, 2).

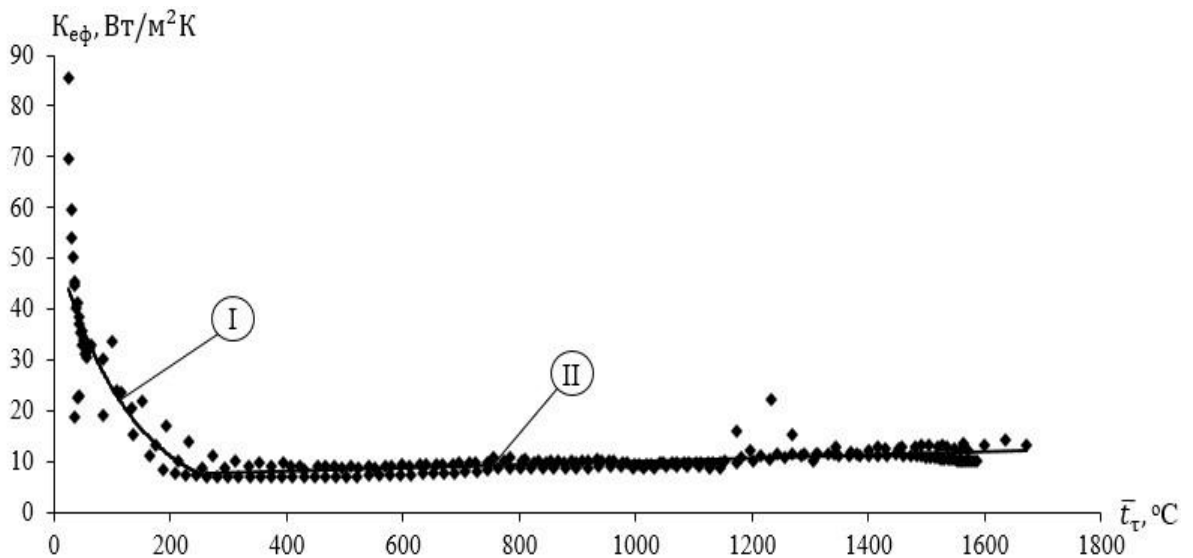


**Рис. 1 – Температурна залежність ефективного коефіцієнта пропорційності від середньомасової температури вугільних заготовок**

Після узагальнення отриманих розрахункових даних в залежності ефективного коефіцієнта пропорційності від температури виділено три області:

- область I – інтервал температур 0...1500 °C,  $K_{\text{втр}} = 0,08 - 2 \cdot 10^{-5} t_\tau$  ;
- область II – інтервал температур 1501...2250 °C,  $K_{\text{втр}} = 9 \cdot 10^{-5} t_\tau - 0,0074$  ;
- область III – інтервал температур 2251...3000 °C,  $K_{\text{втр}} = 0,235 - 10^{-4} t_\tau + 2 \cdot 10^{-8} t_\tau^2$  .

Оскільки ефективний коефіцієнт пропорційності враховує, зокрема, і витрати активної енергії на прямий нагрів теплоізоляції, то його зменшення в першій області, очевидно, буде обумовлюватися різким зниженням питомого електричного опору (ПЕО) масиву (вуглецева заготовка – теплоізоляція) з підвищенням температури. Потім збільшення ПЕО з ростом температури призводить до підвищення коефіцієнта пропорційності в другій та третій областях. Наприклад, за даними роботи [11] при нагріванні заготовок до температури біля 1500 °C (перша область на графіку) йде процес зміни структури вуглецевого матеріалу в структуру графіту, тобто відбувається ріст шарів кристалічної вуглецевої решітки, потім до температури 2200 °C (друга область на графіку) ріст шарів сповільнюється, а після цієї температури (третя область на графіку) йде тривимірне впорядкування атомів вуглецю в структуру графітового монокристалу.



**Рис.2 – Температурна залежність ефективного коефіцієнта теплопередачі від визначальної температури**

З представлених на рис. 2 розрахункових даних видно, що з ростом температури до 250 °С (область I) ефективний коефіцієнт теплопередачі зменшується, що пов'язане з постійним випаровуванням води з теплоізоляції, яке закінчується при температурі 200 °С. Для цієї області залежність ефективного коефіцієнта теплопередачі від температури описується залежністю  $K_{ef} = 53,46e^{-0,008\bar{t}}$ .

Для області II ( інтервал температур 251...1800 °С) ефективний коефіцієнт теплопередачі незначно збільшується з ростом температури, а його залежність має вигляд  $K_{ef} = 6,72 + 0,0033\bar{t}$ .

**Результати розрахунків.** Для практичного визначення середньомасової температури заготовок в печі Кастнера за наведеною вище методикою з системи рівнянь (1) – (11) можна використати метод дискретизації за часом. Невідома величина середньомасової температури  $T_{\tau}$  для будь-якого проміжка часу з початку кампанії графітування за отриманим дискретним нелінійним рівнянням визначається методом хорд.

Вихідні дані до розрахунків

1 – характеристики вугільних заготовок:

- тип;
- діаметр  $d_3$ , м;
- кількість заготовок у свічці  $n$ , шт.;
- маса  $m_3$ , кг.

2 – початкова середньомасова температура заготовок  $T_0$ , К.

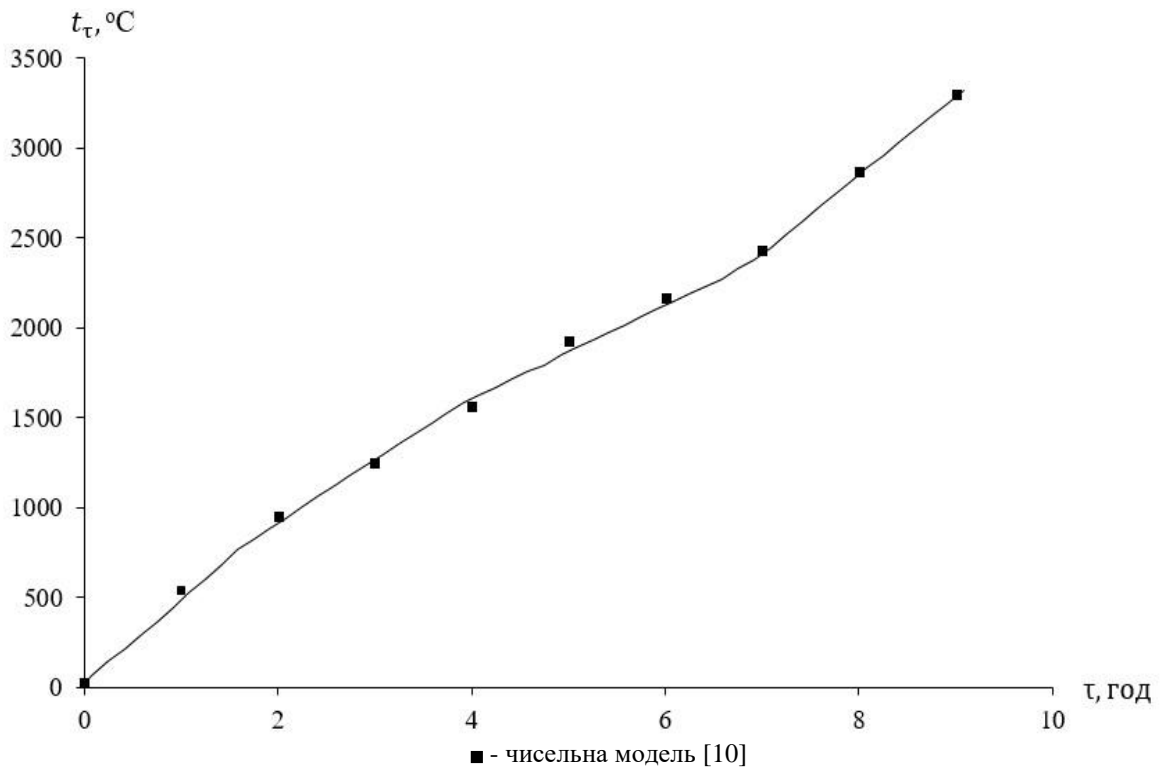
3 – електричні характеристики печі:

- кількість паралельно встановлених працюючих пічних трансформаторів  $n_{\tau}$ , шт;
- активна потужність на високій стороні пічного трансформатора  $P_{\Lambda}(\tau)$ , Вт;
- сила струму пічного ланцюга  $I_{\Lambda}(\tau)$ , А;
- напруга пічного ланцюга  $U(\tau)$ , В;
- кількість активної електричної енергії на високій стороні трансформатора  $Q_{\Lambda}(\tau)$ , Дж.

Практичні розрахунки середньомасової температури заготовок в печі графітування однієї з кампаній за технологією Кастнера наведені на рис. 3, де також показані і результати, що отримані на числовій моделі механічного та теплоелектричного стану печі.

Наведений на рис. 3 графік залежності середньомасової температури заготовок описується рівнянням

$$K_{ef} = 36,83 + 534,39\tau - 48,2\tau^2 + 2,56\tau^3 + 0,075\tau^4 .$$



**Рис. 3 – Залежність середньомасової температури вугільних заготовок від часу при графітуванні в печі Кастнера**

#### Висновки

1. Розроблена методика оперативного визначення середньомасової температури заготовок печей Кастнера в режимі реального часу, в якій враховані корисні витрати енергії на нагрівання заготовок з урахуванням її втрат до входу в піч; паразитні витрати енергії на прямий нагрів теплоізоляції, компенсаційної вставки та струмовідводу; витрати на нагрів та випаровування вологи з теплоізоляції, втрати з поверхні заготовок в навколишнє середовище; витрати енергії на ендотермічну реакцію газифікації.

2. Отримані температурні залежності ефективного коефіцієнта теплопередачі від поверхні заготовок через шар теплоізоляції в навколишнє середовище і ефективного коефіцієнта пропорційності, що враховує витрати активної електричної енергії на прямий нагрів теплоізоляції, компенсаційної вставки та струмовідводу.

3. Співставлення результатів розрахунків для однієї з кампаній печі Кастнера з чисельним моделюванням механічного та теплоелектричного стану печі показало, що розроблена методика може бути рекомендована для практичного використання при розробці АСУ процесу графітації в печах Кастнера.

#### Список використаної літератури

1. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования: монография / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001. — 132 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: Учебное пособие для вузов /Е.Ф.Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238с.
3. Перевезенцев В.П. Совершенствование существующих и разработка новых технологий графитации углеродных материалов. Автореферат дис. ... докт. техн. наук /В.П.Перевезенцев. – М., 1999. – 75с.
4. Кутузов С. В. Підвищення ефективності роботи печей графітації електродних виробів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / С. В. Кутузов. — К., 2007. — 22 с.
5. Педченко А.Ю. Теплоелектричний стан печей графітування Кастнера: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / А.Ю. Педченко. — К., 2017. — 18 с.
6. Знамеровский В. Ю. Математическое моделирование процесса графитации / В. Ю. Знамеровский. — М. : Металлургия, 1994. — 64 с.
7. Жученко А. І. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції : монографія / А.І.Жученко, М.В.Коржик, С.В.Кутузов. — К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. — 224 с.
8. Панов Е. Н. Расчетно-экспериментальное определение температурных полей ядра в П-образных печах графитации постоянного тока / Е.Н. Панов, С.В. Кутузов, С.В. Лелека и др. // Промышленная теплотехника. – 2007. Том 29. - №2. – С. 22-28.

9. *Панов Е. Н.* Методика оперативного определения среднemasсовой температуры керна печи графитирования Ачесона / Е. Н. Панов, А. Я. Карвакий, С. В. Лелека и др. // Восточно-европейский журнал передових технологий. – 2015. - № 3 – 5 (75). – С. 41-46.
10. *Карвацький А. Я.* Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів: монографія /А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов і ін. - К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 352 с.
11. *Franklin, R. E.* The structure of graphitic carbons / R. E. Franklin // Acta Crystallographica. — 1951. — Vol. 4. — P. 253—261.

Надійшла до редакції 17.11.2017