

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



**ПЕДЧЕНКО АНАТОЛІЙ ЮРІЙОВИЧ**

УДК 621.365.32 (043.3)

**ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНИЙ СТАН ПЕЧЕЙ ГРАФІТУВАННЯ КАСТНЕРА**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і в науково-дослідному центрі «Ресурсозберігаючі технології» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Панов Євген Миколайович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
декан інженерно-хімічного факультету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Нагурський Олег Антонович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри цивільної безпеки

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Чернявський Микола Володимирович,**  
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України,  
завідувач лабораторії паливних проблем енергетики

Захист відбудеться «30» травня 2017 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «    » квітня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Графітування вуглецевих матеріалів є високотемпературним багатоступінчастим процесом тривимірного впорядкування атомів вуглецю у структуру графіту, який відбувається у спеціальних печах графітування. На цьому етапі, який вирішальним чином впливає на якість готового продукту, використовується до 80 % всієї енергії, що витрачається на весь процес виготовлення графітових виробів. Тому підвищення енергоефективності електродного виробництва на переділі графітування не викликає сумнівів. Об'єми виробництва графітованих електродів головним чином залежать від обсягів випуску сталі в дугових сталеплавильних печах. Зростання світового виробництва електросталі є основним рушієм розвитку ринку графітованих електродів. Підвищення потужностей дугових сталеплавильних печей потребує виготовлення електродів великих діаметрів найвищої якості, які доцільно графітувати лише в печах прямого нагрівання (ППН) за методом Кастнера.

Подальший розвиток електродної промисловості передбачає модернізацію діючих і розробку нових вискоелективних технологічних регламентів процесу графітування електродних виробів, що забезпечують ресурсо- та енергозбереження, а також зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище, що актуально для виробництв, які спеціалізуються на отриманні штучного графіту в ППН. Тому однією з найбільш важливих і актуальних завдань виробництва електродних виробів є розробка науково-обґрунтованих технологічних регламентів процесу графітування, що являє собою складну науково-дослідну роботу, яка включає високотемпературні вимірювання за температур понад 2500 °С, дослідження теплоелектричного стану багатофазного середовища «газ–тверде вологе сипуче тіло» у процесі нагрівання печі графітування джоулевою теплою.

Сучасний розвиток методів математичного моделювання складних систем, до яких і відноситься пічне обладнання електродного виробництва, дає змогу ефективно розв'язати дану науково-дослідницьку задачу в короткі терміни та з мінімальними матеріальними витратами, виконати оцінку теплоелектричного стану печей графітування Кастнера за різних наперед заданих параметрів технологічного регламенту з метою визначення раціональних технічних рішень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і в науково-дослідному центрі «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ») інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок в Україні (Постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р., № 942), а також згідно наукових планів фундаментальних і прикладних досліджень НДЦ «РТ» з 2013 р. по 2016 р.: «Розробка заходів з ресурсо- та енергозбереження в електродному виробництві» (2013–2014 рр., № ДР 0113U002302; автор – виконавець теми); «Розробка рецептури вогнетривких футерувань та теплоізоляції печей електродного виробництва» (2013–2014 рр., № ДР 0113U002303; автор – виконавець теми); «Розробка енергоефективних конструкцій печей прямого нагрівання Кастнера для графітування електродних виробів» (2015–2016 рр., № ДР 0115U002410; автор – виконавець теми).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення наукових засад розробки ефективних процесів і обладнання для графітування електродної продукції в ППН, що забезпечує ресурсо- та енергозбереження електродного виробництва.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. проаналізувати та узагальнити літературні дані з теплоелектричного стану печей графітування за діючих технологічних регламентів, обґрунтувати доцільність їх модернізації, визначити основні тенденції розвитку сучасного стану ринку з виготовлення електродної продукції;

2. сформулювати фізичну та математичну моделі процесу графітування електродних виробів у ППН за методом Кастнера;

3. розробити методику числового розв'язання сформульованої задачі, яка базується на методах скінченних елементів (МСЕ);

4. розробити методику проведення експериментальних досліджень і виконати експериментальні дослідження теплоелектричного стану ППН під час графітування електродних заготовок;

5. на базі сформульованої математичної моделі розробити числову модель печі графітування Кастнера та виконати її верифікацію за даними фізичного експерименту;

6. визначити за допомогою розробленої числової моделі вплив різних параметрів технологічного регламенту й устаткування на теплоелектричний стан печі графітування Кастнера, а саме: теплоелектричних характеристик компенсаційних вставок, форми та властивостей матеріалу електроконтактної прокладки, необхідного зусилля стиснення електродних свічок, вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі печі;

7. розробити рекомендації щодо впровадження енергоефективних технологічних регламентів процесу графітування та запропонувати рішення з вдосконалення конструкції печі Кастнера.

*Об'єкт дослідження* – процес графітування електродних виробів.

*Предмет дослідження* – фізичні поля і конструктивно-технологічні параметри печі графітування Кастнера.

**Методи дослідження.** Дослідження ґрунтуються на достовірних гіпотезах і адекватних математичних моделях, зв'язаних системах рівнянь механіки суцільного середовища, використанні апробованого математичного апарату МСЕ, розроблених числових методиках і алгоритмах, використанні сучасної контрольної-вимірної апаратури, статистичних методів обробки та оцінки похибки експериментальних даних. Дані натурних експериментів застосовані для верифікації розробленої числової моделі та перевірки закономірностей, встановлених за допомогою числових експериментів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У результаті виконаних у дисертації досліджень вперше отримані такі наукові результати:

1. сформульовано фізичну модель печі Кастнера у процесі графітування електродних заготовок, яка базується на явищах теплоелектричної, механічної і хімічної природи та взаємодії між ним й оточуючим середовищем;

2. обґрунтовано застосування математичної моделі теплоелектричного та механічного (ТЕМ) стану для ППН за методом Кастнера, у якій враховуються теплові ефекти хімічних реакцій газифікації сипучих вуглецевмісних матеріалів, конверсія

водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі, механізм перенесення вологи та водяної пари, сублімація графіту, ТЕМ контактна взаємодія між елементами конструкції печі;

3. отримано експериментальні дані теплоелектричного стану печі Кастнера та контактного електричного опору (КЕО) контактних пар мідь–графіт та графіт–прокладка–графіт, що є необхідними для виконання числового аналізу фізичного стану пічного обладнання;

4. теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено фізичну залежність уповільнення темпу зростання температури в центральній повздовжній частині печі Кастнера від процесу газифікації вуглецевого матеріалу за реакцією «водяного газу»;

5. проведено верифікацію числової моделі печі Кастнера, яка показала збіжність результатів числового моделювання температурних полів з фізичним експериментом у межах 4 % в інтервалі зміни температур до 1600 °С у разі врахування впливу теплових ефектів хімічних реакцій газифікації;

6. виконано теоретичні дослідження впливу визначальних геометричних та фізичних параметрів на процес графітування вуглецевої продукції в печах графітування Кастнера.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. розроблено числову модель ТЕМ стану ППН з урахуванням нелінійної залежності теплоелектричних властивостей вуглецевих матеріалів від температури й тиску, теплових ефектів газифікації, сублімації графіту та контактної взаємодії, яка дає змогу отримувати дані тепловтрат, фізичні поля за різних регламентів введення електричної потужності, завантаження теплоізоляційного матеріалу, вологості сипучих матеріалів печі тощо, що є необхідним для вдосконалення діючого і створенні нового (модернізованого) пічного обладнання та енергозберігаючих регламентів його експлуатації;

2. розроблено методики експериментального дослідження теплоелектричного стану печі Кастнера у промислових умовах, КЕО контактних пар мідь–графіт і графіт–прокладка–графіт та створено експериментальну установку, яка дає змогу виконувати дослідження в інтервалі температур до 250 °С;

3. проведено числовий аналіз впливу параметрів технологічного регламенту на процес графітування вуглецевої продукції в печах графітування Кастнера, на підставі якого розроблено технічні рішення щодо мінімізації перепаду температури в торцевих заготовках, визначено, що найбільш ефективним рішенням є використання компенсаційних вставок, виконаних у формі порожнистих графітових циліндрів, які заповнені всередині високоомним теплоізоляційним матеріалом;

4. розроблено нову конструкцію вставки для формування свічок під час завантаження ППН за методом Кастнера, яка дає змогу зменшити нерівномірність температурного поля крайніх у пакеті заготовок свічок і, відповідно, максимальний рівень температури їх обробки, зменшити витрати електроенергії на кампанію графітування, що в результаті забезпечує підвищення якості електродів за питомим електричним опором та зменшення питомих витрат електроенергії на кампанію графітування. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі №№ 98757, 100302, 107147, 108531;

5. результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час виконання курсових і дипломних проектів на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського;

6. результати дисертаційної роботи впроваджено на електродному підприємстві ПАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя).

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем сформульовано мету і постановку завдань досліджень, розроблено методи і способи досягнення поставленої мети, сформульовано фізичну модель, виконано математичну постановку задачі, розроблено числові моделі ТЕМ стану ППН, проведено фізичні і числові експерименти, виконано їх аналіз та узагальнення, розроблено технічні рішення з модернізації конструкції та процесу графітування електродних виробів у печах Кастнера.

Математичну постановку задачі та розробку числових моделей фізичного стану ППН здійснено разом з д.т.н., проф. Карвацьким А. Я. Числову модель ТЕМ стану ППН розроблено разом із к.т.н. Лелекою С. В. Натурні експериментальні дослідження проведено разом із к.т.н. Лелекою С. В., к.т.н. Лазарєвим Т. В.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і отримали схвальні відгуки на: Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Одеса, 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Economics, science, education: integration and synergy».

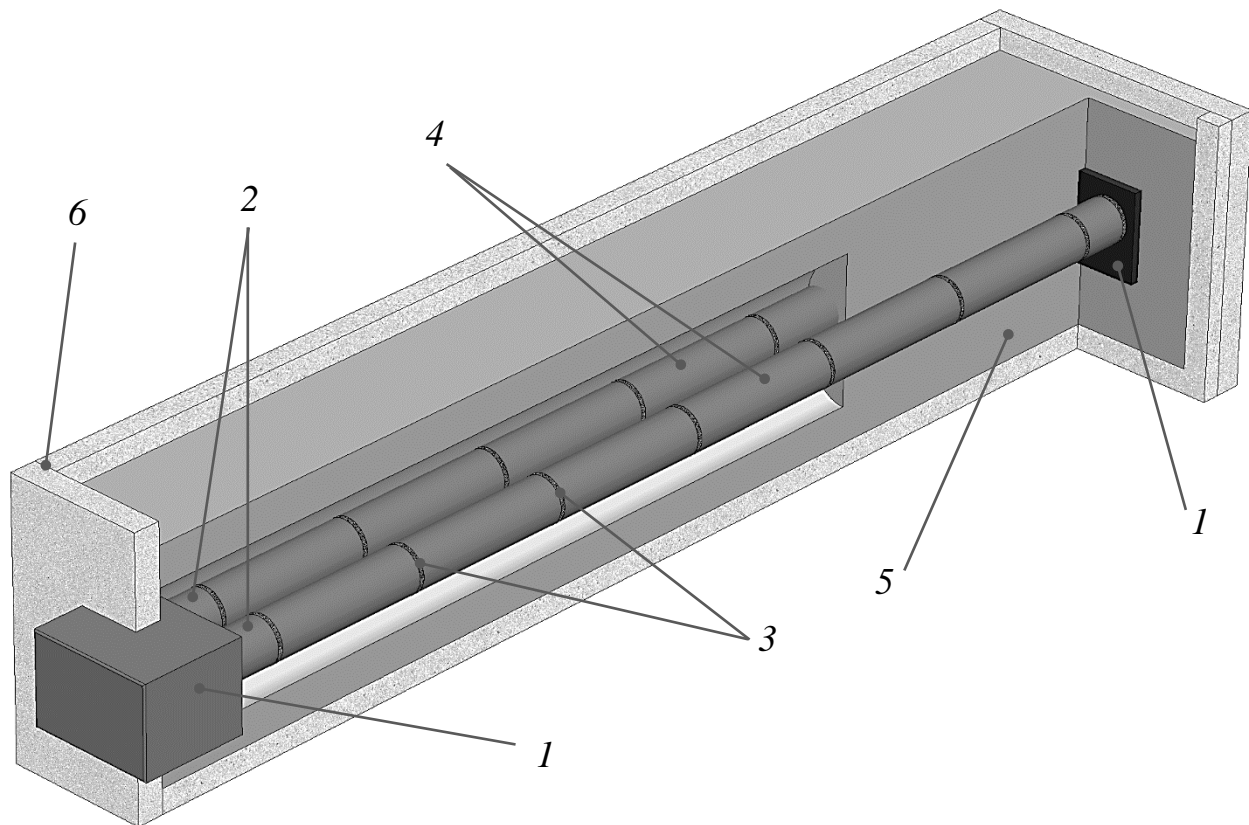
**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 13 друкованих праць, з них 1 монографія, 6 статей у наукових фахових виданнях, з яких 5 у виданнях України, що входять до наукометричних баз, 4 патенти України на корисні моделі та 2 тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг складає 196 сторінок. Обсяг основного тексту становить 138 сторінок, з яких площа 4 сторінок повністю зайнята таблицями і рисунками. Робота містить 8 таблиць і 70 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 134 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, надано відомості про зміст роботи, апробацію, публікації та особистий внесок автора.

У **першому розділі** на основі літературного огляду проведено аналіз сучасного стану та напрямків експериментально-теоретичних досліджень ТЕМ стану ППН, що працюють за методом Кастнера (рисунок 1) в процесі графітування електродної продукції. Проведено аналіз сучасного стану ринку з виготовлення електродної графітової продукції, визначено основні тенденції його розвитку.



1 – рухомі струмопідводи; 2 – компенсаційні вставки; 3 – кільцеві резистивні прокладки; 4 – електродні заготовки; 5 – теплоізоляційна шихта; 6 – корпус печі  
Рисунок 1 – Піч графітування Кастнера

У результаті аналізу наукової літератури, сучасного стану ринку з виробництва графітованої продукції та практичного досвіду дослідницької роботи автора встановлено, що печі графітування, що працюють за методом Кастнера, порівняно з печами Ачесона, мають більшу енергетичну ефективність, забезпечують менший градієнт температур у заготовках та дозволяють отримувати електродні вироби з однорідними властивостями графітового матеріалу по всій довжині. Тенденція підвищення електричної потужності дугових сталеплавильних печей призводить до потреби отримувати графітовані електроди з більшим діаметром, графітування яких з найбільшою економічною вигодою доцільно виконувати в печах Кастнера.

Теоретичні засади процесу графітування вуглецевої продукції та технології виробництва графітових електродів представлені в наукових працях Панова Є. М., Лелеки С. В., Карвацького А. Я., Чалих Е. Ф., Кузнецова Д. М., Шулепова С. В., Саннікова А. К., Островського В. С., Веселовського В. С., Дігонського В. В. та ін.

Виконаний у дисертації аналіз наявних у літературних джерелах результатів досліджень показав їх недостатність для вирішення задачі вдосконалення конструктивних параметрів, технологічних та енергетичних показників роботи печей графітування, зокрема для вдосконалення діючих і розробки нових процесів та обладнання хімічної технології.

**Другий розділ** присвячено формулюванню фізичної та математичної моделей процесу графітування електродних виробів у печі Кастнера, розробці методик числового розв'язання поставленої задачі та числових моделей ТЕМ стану печей графітування Кастнера.

Сформульована фізична модель процесу графітування вуглецевих заготовок враховує такі чинники процесу: механізм перенесення вологи та водяної пари; виділення теплоти за рахунок хімічних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу печі; реакції конверсії водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному вуглецевому матеріалі печі.

На підставі розробленої фізичної моделі TEM стану печі Кастнера під час кампанії графітування електродних заготовок сформульована відповідна математична модель фізичних полів пічного обладнання. Математична модель печі базується на системі нелінійних диференціальних рівнянь теплоелектропровідності та рівноваги механічного руху в інкрементальній формі з використанням механічної моделі для сипучого середовища Друкера-Прагера й описує TEM стан печі графітування Кастнера з урахуванням контактних взаємодій TEM природи на границі «сипучий матеріал – тверде тіло»

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}}(p, T) \nabla T(X)] + \chi(p, T) |\nabla U(X)|^2 + q_{V, \text{chem}} + q_{V, \text{devapor}}; \\ \nabla \cdot [\chi(p, T) \nabla U(X)] = 0; \\ \nabla \cdot \dot{\sigma} + \dot{\mathbf{f}} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $H = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p^{\text{eff}}(T) \rho(T) dT$  – повна об’ємна ентальпія, що враховує теплоту випаровування або конденсацію вологи, або теплоту сублімації вуглецевмісних матеріалів печі, Дж/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $c_p^{\text{eff}}(T)$  – ефективна масова ізобарна теплоємність, що враховує

теплоємність води та теплоту її випаровування в матеріалах з вмістом вологи, а у графітових матеріалах – теплоту сублімації графіту за високих температур, Дж/(кг·К);  $T_{\text{eqL}} = T_{\text{eq}} - \Delta T/2$ ;  $T_{\text{eqR}} = T_{\text{eq}} + \Delta T/2$ ;  $T_{\text{eq}}$  – рівноважна температура випаровування, або сублімації (фазового переходу першого роду) або хімічної реакції, К;  $\Delta T$  – температурний інтервал згладжування, К;  $c_{p-0}^*$  – масова теплоємність матеріалу з урахуванням

вмісту вологи в ньому, Дж/(кг·К);  $L_{fm} = \begin{cases} \alpha_g L_{fg} & \text{– при випаровуванні вологи;} \\ (1 - \alpha_g) L_{fc} & \text{– при сублімації графіту;} \end{cases}$  – масова

теплота за фазових переходів першого роду, Дж/кг;  $\alpha_g$  – масова частка води у вологому матеріалі;  $L_{fg}$ ,  $L_{fc}$  – масова теплота фазового переходу під час випаровування води та сублімації графіту, відповідно, Дж/кг;  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;  $q_{V, \text{chem}}$  – густина внутрішнього джерела теплоти, що пов’язана з хімічними реакціями, Вт/м<sup>3</sup>;  $X(x, y, z) \in R^3$  – декартова система координат, м;  $q_{V, \text{devapor}}$  – густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує тепломасоперенесення водяної пари та її конденсацію, Вт/м<sup>3</sup>;  $\dot{\sigma}$ ,  $\dot{\mathbf{f}}$  – похідні від тензора напруження 2-го рангу за часом і вектора об’ємних сил, пов’язаного з гравітацією, відповідно.



Повна об'ємна ентальпія, у якій враховується вміст вологи в теплоізоляційному матеріалі та теплота сублимації вуглецевмісних матеріалів у печі графітування Кастнера, визначається за допомогою виразу

$$H = \int_0^{T_{\text{eqL}}} c_{p-0}^*(T) \rho_{-0}^*(T) dT + \frac{[c_{p-0}^*(T_{\text{eqL}}) \rho_{-0}^*(T_{\text{eqL}}) + c_{p+0}(T_{\text{eqR}}) \rho_{+0}(T_{\text{eqR}})]}{2} \Delta T +$$

$$+ L_{\text{fv}} + \int_{T_{\text{eqR}}}^{T > T_{\text{eqR}}} c_{p+0}(T) \rho_{+0}(T) dT, \quad (2)$$

де  $c_{p-0}^*$ ,  $\rho_{-0}^*$  і  $c_{p+0}$ ,  $\rho_{+0}$  – властивості матеріалів по обидві сторони від температури фазового переходу (з урахуванням вмісту вологи в них), відповідно;  $L_{\text{fv}} = \begin{cases} \alpha_{\text{e}} \rho_{\text{e}} L_{\text{fe}} & \text{– при випаровуванні вологи;} \\ (1 - \alpha_{\text{e}}) \rho_{\text{z}} L_{\text{fc}} & \text{– при сублимації графіту,} \end{cases}$  – об'ємна теплота фазового переходу першого роду, Дж/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{e}}$ ,  $\rho_{\text{z}}$  – густина води та графіту, відповідно, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт ефективної теплопровідності матеріалів з урахуванням вологовмісту визначається залежністю

$$\lambda_{\text{eff}}(p, T) = \begin{cases} \lambda_{-0}(p, T), & T < T_{\text{eqL}}; \\ \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}}) + \frac{\lambda_{+0}(p, T_{\text{eqR}}) - \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}})}{\Delta T} T, & T_{\text{eqL}} \leq T \leq T_{\text{eqR}}; \\ \lambda_{+0}(p, T), & T > T_{\text{eqR}}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\lambda_{-0}$  і  $\lambda_{+0}$  – теплопровідність матеріалу по обидва боки від температури фазового переходу, відповідно, Вт/(м·К);  $p$  – тиск, Па.

Густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями газифікації вуглецевого матеріалу, описується співвідношенням

$$q_{\text{Vchem}} = Q_{\text{r.g}} m_{\text{vapor}} / (V_{\text{gasific}} \tau_{\text{gasific}}), \quad (4)$$

де  $Q_{\text{r.g}}$  – тепловий ефект від хімічних реакцій газифікації, Дж/кг;  $m_{\text{vapor}}$  – маса водяної пари, яка вступила в реакцію газифікації, кг;  $V_{\text{gasific}}$  – об'єм зони газифікації вуглецевмісного матеріалу, м<sup>3</sup>;  $\tau_{\text{gasific}}$  – тривалість процесу газифікації, с.

За умови, що основною реакцією процесу газифікації є реакція «водяного газу» величини  $Q_{\text{r.g}}$  та  $m_{\text{vapor}}$  визначаються залежністю

$$Q_{\text{r.g}} = (-7165100 - 718,25T + 0,1162T^2 + 0,00007903T^3), \quad (5)$$

$$m_{\text{vapor}} = 1,5m_C = 1,5 \min \left( ke^{-\frac{E}{RT}} m_{C_{\text{gasif}}} \tau_{\text{gasific}}, 0,6667m_{\text{all.vapor}} \right), \quad (6)$$

де  $T$  – абсолютна середньомасова температура вуглецю в зоні газифікації, К;  $m_C$  – маса вуглецю, що вступив у реакцію газифікації, кг;  $k$  – передекспоненціальний множник,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E$  – енергія активації, Дж/моль;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);  $m_{C_{\text{gasif}}}$  – маса вуглецю в зоні газифікації, кг;  $m_{\text{all.vapor}}$  – маса водяної пари, що пройшла крізь зону газифікації, кг.

Густина внутрішнього джерела теплоти, у якому враховується масоперенесення водяної пари та її конденсація, визначається залежністю

$$q_{V,\text{devapor}} = m_{\text{vapor}} L_{f_0} \xi_{\text{evac.p}} / (V_{\text{cond}} \tau_{\text{cond}}), \quad (7)$$

де  $m_{\text{vapor}}$  – маса вологи, що випаровується, кг;  $V_{\text{cond}}$  – об'єм зони конденсації водяної пари,  $\text{м}^3$ ;  $\tau_{\text{cond}}$  – тривалість процесу конденсації, с.

Згідно з інкрементальною теорією пластичності непружні деформації  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}}$  розглядаються як початкові. Тоді похідна за часом від тензора напруження  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$  виражається законом Гука, записаним за допомогою похідних від тензора початкового напруження  $\boldsymbol{\sigma}^{\text{in}}$  і тензора повних деформацій  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = 2G\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})\mathbf{I} - \dot{\boldsymbol{\sigma}}^{\text{in}}, \quad (8)$$

де  $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^{\text{in}} = 2G\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}} + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}})\mathbf{I} + \frac{1+\nu}{1-2\nu} \beta \dot{T}\mathbf{I}$  – тензор початкових напружень, Па;

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla\dot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{u}}\nabla) = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}}$  – тензор швидкості повних деформацій;  $\dot{\mathbf{u}}$  – вектор швидкості переміщень, м;  $\text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}$  – слід тензора;  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T$  – пружна і непружна частини тензора повної швидкості деформацій, відповідно;  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T$  – тензори швидкості пластичних та температурних деформацій, відповідно;  $G = E / (2 + 2\nu)$  – пружний модуль зсуву, Па;  $E$  – модуль пружності під час одновісного розтягу, Па;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\mathbf{I}$  – одиничний тензор другого рангу;  $\beta$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення,  $\text{К}^{-1}$ .

Згідно механічної моделі Друкера-Прагера критерій плинності сипучого матеріалу визначається таким чином

$$f = \alpha_{\text{DP}} I_1 + \sqrt{J_2} - k_{\text{DP}}, \quad (9)$$

де  $\alpha_{\text{DP}} = 2\sqrt{3} \sin \phi / (9 - 3 \sin \phi)$  – константа сипучого матеріалу;  $\phi$  – кут внутрішнього тертя, рад.;  $J_2 = S_{ij} S_{ij} / 2$  – другий інваріант тензора девіаторних напружень,  $\text{Па}^2$ ;

$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} I_1 \delta_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1,3}$  – тензор дівіаторних напружень, Па;  $I_1 = \sigma_{kk}$ , Па;

$k_{DP} = 2\sqrt{3}c \cos \phi / (3 - \sin \phi)$  – границя плинності сипучого матеріалу, Па;  $c$  – величина зчеплення між частинками сипучого матеріалу, Па.

Для неасоціативного закону плинності рівняння пластичної потенціальної поверхні набуває вигляду

$$g = \beta_{DP} I_1 + \sqrt{J_2}, \quad (10)$$

де  $\beta_{DP}$  – додатковий параметр матеріалу.

З аналізу системи рівнянь (1) випливає, що зв'язок між першими двома рівняннями, що описують теплоелектричний стан і визначають температурне поле, і третім рівнянням механічного стану, що визначає поле напруження або гідростатичний тиск, встановлюється за допомогою температури та тиску через фізичні властивості  $\lambda_{\text{eff}}(p, T)$  і  $\chi(p, T)$  та тензор початкових напружень, що входить у (8). Тиск або середнє гідростатичне напруження в сипучому матеріалі визначається за формулою  $p = \sigma_m = I_1 / 3$ .

Початкові умови для (1) у разі  $\tau = 0$ :

$$\begin{cases} T = T_0; \\ U = 0; \\ \dot{\sigma}^{\text{in}} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Граничні умови для (1) у разі  $\tau > 0$ :

– на торцях струмопідводів печі:

$$j_n(\tau)|_{\text{shunt}} = \mathbf{n} \cdot (-\chi(p, T) \nabla U) \quad \vee \quad U|_{\text{shunt}} = U(\tau), \quad (12)$$

де  $j_n$  – нормальна густина електричного струму, А/м<sup>2</sup>;  $\mathbf{n}$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні струмопідводу;  $\chi$  – коефіцієнт електропровідності, См;

– на осях симетрії печі (13) і на зовнішніх поверхнях печі, що межують з навколишнім середовищем (14):

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U|_{\text{axes} \parallel \mathbf{j}} = 0 \quad \wedge \quad U|_{\text{axes} \perp \mathbf{j}} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \dot{\mathbf{u}} = 0, \end{cases} \quad (13) \quad \begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(p, T) \nabla T) = \alpha_{\text{eff}}(T)(T - T_{\text{env}}); \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U = 0; \\ \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ \mathbf{u}(X) = 0, X \in X_0, \end{cases} \quad (14)$$

де  $\mathbf{j}$  – вектор густини електричного струму, А/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{eff}}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\text{env}}$  – абсолютна температура навколишнього середовища, К;  $X_0(0, 0, 0)$  – початок координат печі, м;

– умови теплоелектричного контакту між елементами конструкції печі (15), механічного контакту на границі контакту між стінками, заготовками, сипучими матеріалами теплоізоляції (16) та між іншими елементами конструкції печі (17):

$$\left\{ \begin{array}{l} \{T\} = \mathbf{n} \cdot (r_\lambda \mathbf{q}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ \{U\} = \mathbf{n} \cdot (r_e \mathbf{j}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0; \end{array} \right. \quad (15) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^+ + \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^- - \delta \leq 0; \\ \{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} \leq 0; \\ (\mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^+ + \mathbf{n}^+ \dot{\mathbf{u}}^- - \delta) \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ |\dot{\sigma}_\tau| \leq -f \dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}; \end{array} \right. \quad (16) \quad \left\{ \begin{array}{l} \{\dot{\mathbf{u}}\} = 0; \\ \{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} = 0, \end{array} \right. \quad (17)$$

де  $r_e$  – контактний електричний опір, Ом·м<sup>2</sup>;  $r_\lambda$  – контактний термічний опір, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $\mathbf{q}$  – вектор густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$  – початковий зазор по нормалі до контактуючих поверхонь, м;  $\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}$  – похідні нормального напруження за часом на поверхні контакту, Па;  $\dot{\sigma}_\tau$  – похідні тангенціальної складової напружень за часом, Па;  $f$  – коефіцієнт сухого тертя;  $\{\dot{\mathbf{u}}\} = \dot{\mathbf{u}}^+ - \dot{\mathbf{u}}^-$ ;  $\{\dot{\sigma} \cdot \mathbf{n}\} = \dot{\sigma}^+ \cdot \mathbf{n}^+ - \dot{\sigma}^- \cdot \mathbf{n}^+$ .

Для числового розв'язання нелінійної механічної та теплоелектричної задачі(1)–(17) використовувався метод скінченних елементів (МСЕ). При цьому обґрунтовується спрощення числової методики розв'язання задачі на кожному кроці інтегрування за часом за допомогою її розкладання на дві більш прості задачі, а саме теплоелектричну і механічну. Оскільки електропровідність сипучих вуглецевих матеріалів має значну нелінійну температурну залежність, то теплоелектрична задача (перші два рівняння (1)) розв'язуються разом, а нелінійна механічна задача (третє рівняння (1)) – окремо від першої. Для отримання розв'язку повної системи рівнянь (1) використовується ітераційний процес на основі методу послідовних наближень. Зв'язок між розв'язками цих двох задач такий: вхідним параметром для розв'язання механічної задачі служить температура, отримана після розв'язання теплоелектричної задачі, а середнє гідростатичне напруження або тиск сипучого шару, отримані після розв'язання механічної задачі, є вхідним параметром для теплоелектричної задачі, за яким уточнюються теплоелектричні властивості вуглецевого матеріалу печі.

Для розв'язання поставленої задачі (1)–(19) використовувалося програмне забезпечення авторської розробки, у якому реалізуються числові методики на базі МСЕ. Параметри розрахункової сітки (кількість скінченних елементів, вузлів) визначалися на основі методу подвійного перерахунку. На підставі представлених методик та програмного забезпечення розроблена числова модель, яка дає змогу отримувати фізичні поля та дані тепловтрат за різних регламентів введення електричної потужності, завантаження теплоізоляційного матеріалу, вологості сипучих матеріалів печі тощо, що є необхідним для вдосконалення діючого та створенні нового (модернізованого) пічного обладнання й енергоефективних регламентів його експлуатації.

**Третій розділ** присвячено опису задач, методик та результатів натурних експериментальних досліджень теплоелектричних параметрів процесу графітування електродних виробів у печах графітування Кастнера.

На основі розробленої схеми завантаження електродних заготовок, схеми встановлення експериментальних датчиків, методики експериментальних досліджень

проведено експериментальні дослідження теплоелектричного стану промислової печі Кастнера під час кампанії графітування електродних заготовок діаметром 435 мм. Експериментально встановлено, що під час нагрівання електродних виробів має місце процес газифікації вуглецевого матеріалу водяною парою в робочому просторі печі. Це призводить до зменшення швидкості нагрівання поверхні електродних заготовок у діапазоні температур 600–900 °С на 10–20 %.

На основі отриманих експериментальних даних виконано верифікацію числової моделі теплоелектричного стану печі. Порівняльний аналіз результатів числового моделювання ТЕМ стану пічного обладнання з фізичним експериментом із визначення температурних полів у печі Кастнера проводився шляхом зіставлення середніх значень температур, визначених за трьома точками на периферії електродних заготовок у різних їх перерізах (рисунок 2). За даними фізичного експерименту відносне відхилення значень температури в кожному з розглянутих перерізів заготовок становить близько 3 % від їх середнього значення, а для числового експерименту – не більше 1 %.

Встановлено, що відносне відхилення між значеннями середніх температур електродних заготовок, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання та фізичного експерименту, складають не більше 4 % в діапазоні температур до 1600 °С.

**Четвертий розділ** присвячено визначенню впливу визначальних параметрів технологічного регламенту процесу графітування та конструкції пічного обладнання на теплоелектричний та енергетичний стан ППН. Визначено вплив на ТЕМ стан печей Кастнера під час зміни теплоелектричних характеристик компенсаційних вставок, форми та властивостей матеріалу електроконтактної прокладки, необхідного зусилля стиснення електродних свічок і вологості теплоізоляційного матеріалу. Виконано експериментальні дослідження з визначення КЕО контактних пар мідь–графіт та графіт–прокладка–графіт. Розроблено технічні рішення щодо мінімізації перепаду температури в торцевих заготовках та в електродних свічках у цілому. Запропоновано заходи щодо збільшення енергетичної ефективності кампаній графітування.

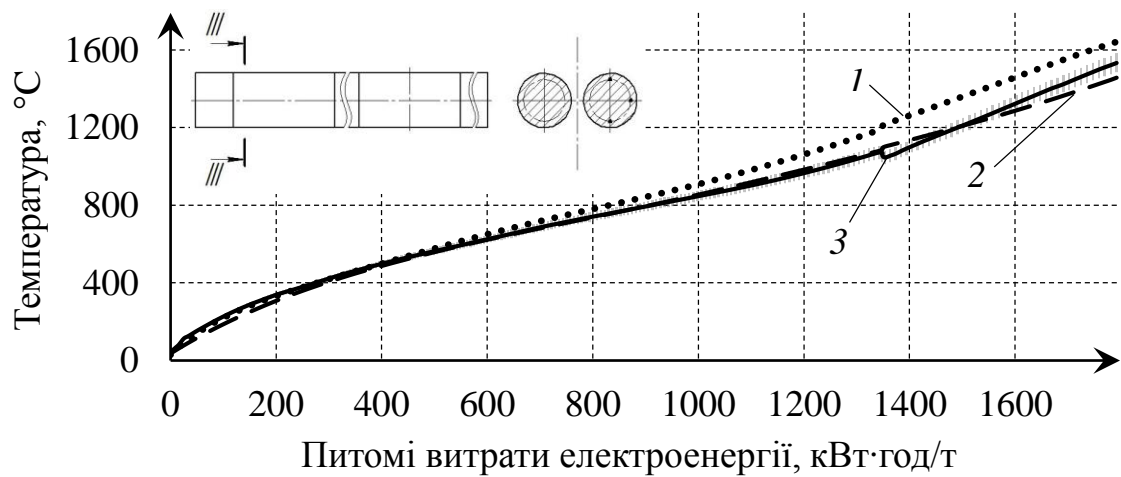
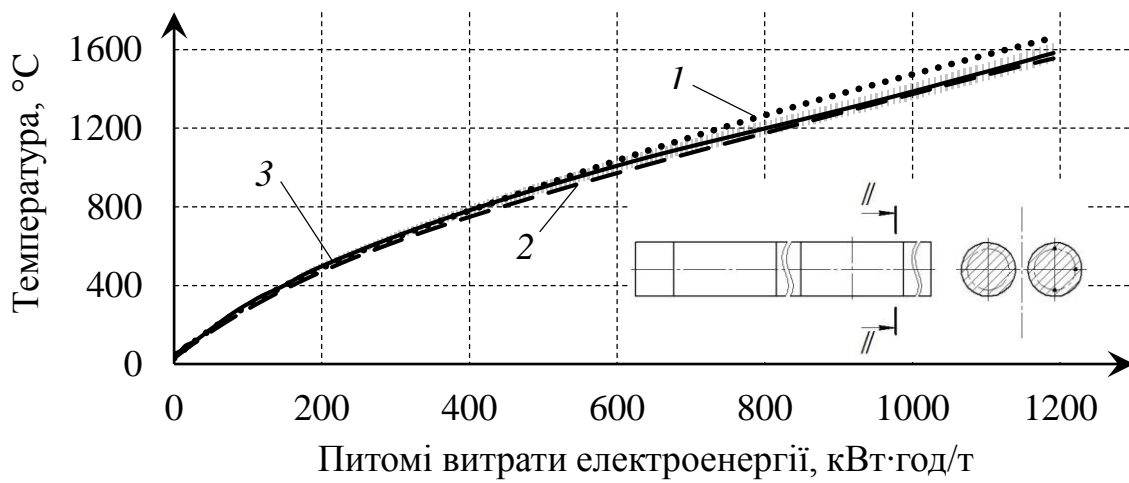
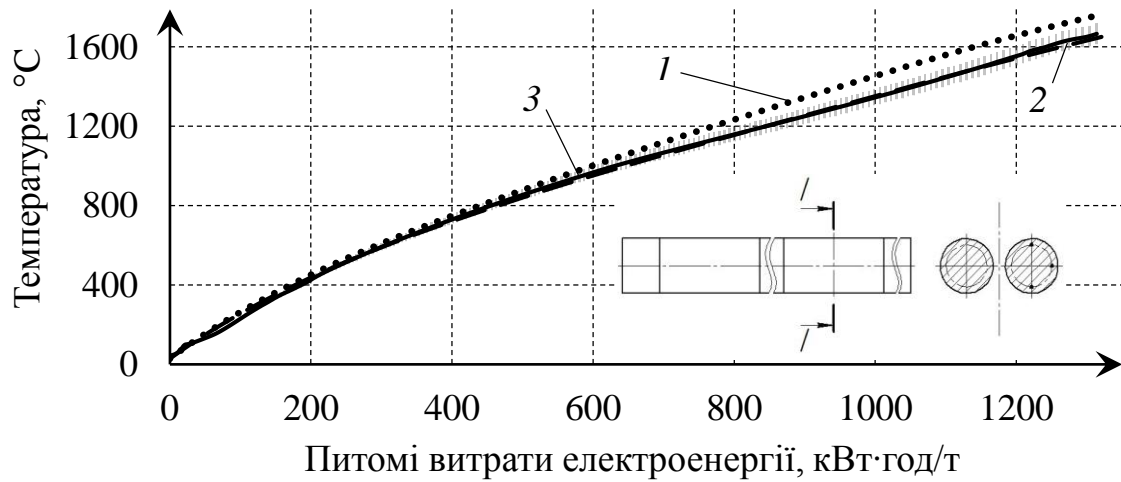
Отримані данні дали змогу розробити рекомендації щодо підвищення експлуатаційних параметрів обладнання та якості готової продукції, що забезпечують ресурсоенергозбереження і зменшення техногенного впливу на довкілля.

**У п'ятому розділі** розроблено технічні рішення з модернізації пічного устаткування, що дають змогу підвищити енергоефективність печей графітування Кастнера за незмінної якості графітової продукції.

З метою зниження перепаду температури у крайніх торцевих заготовках і по електродній свічці в цілому та зменшення питомих витрат електроенергії запропоновано такі технічні рішення:

- використання електроконтактних прокладок з великим значенням питомого електричного опору, що знаходяться між компенсаційними вставками та струмопідводами або компенсаційними вставками та крайніми заготовками;

- використання комбінованих компенсаційних вставок, що представляють собою порожнисті циліндри, заповнені високоомним теплоізоляційним матеріалом.

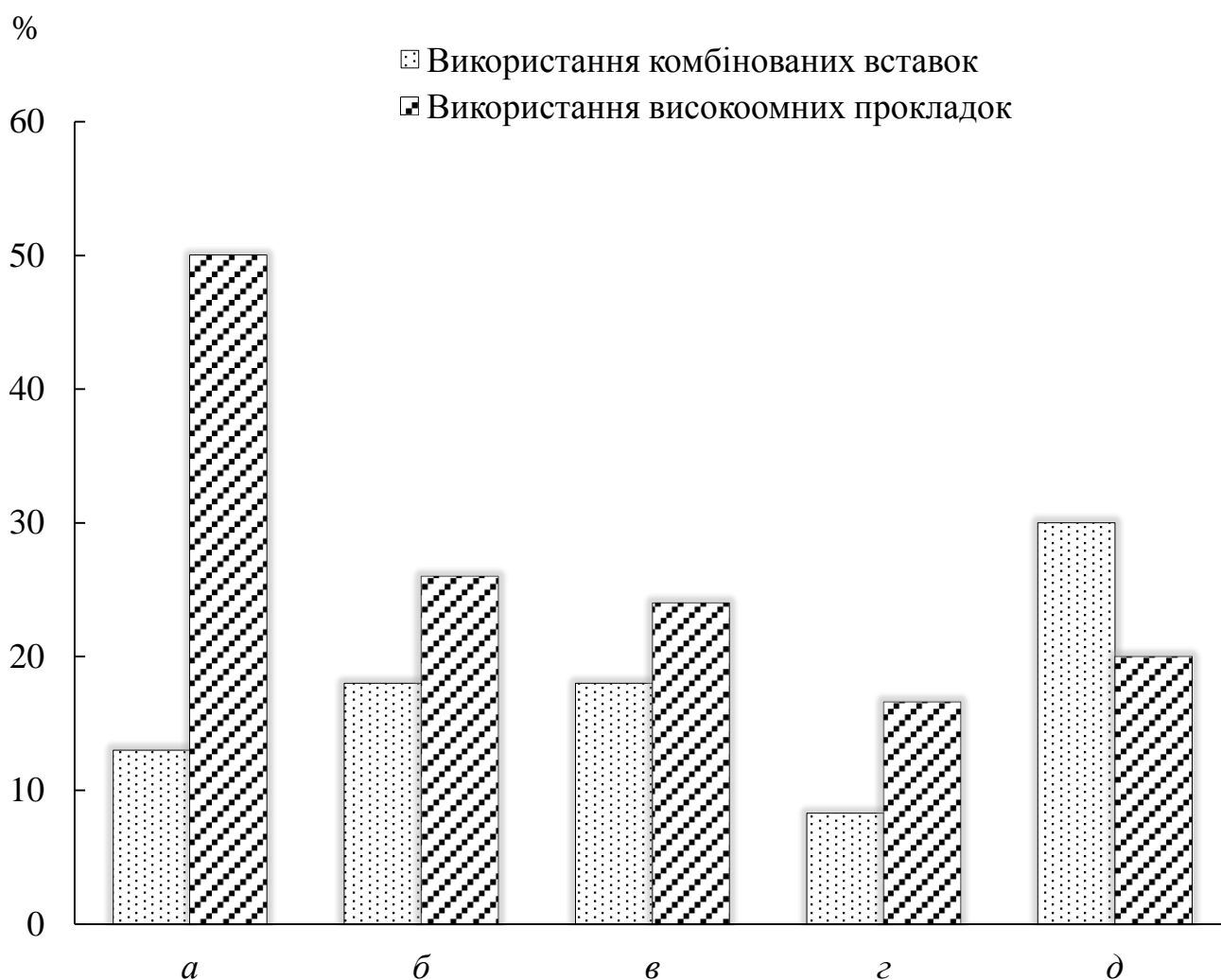


1 – числове моделювання без урахування теплових ефектів хімічних реакцій газифікації матеріалу; 2 – числове моделювання з урахування теплових ефектів хімічних реакцій газифікації матеріалу; 3 – експеримент ( $\delta_t = 3\%$ )

Рисунок 2 – Зміна середнього значення температури в поперечному перерізі заготовок електродної свічі залежно від питомих витрат електроенергії

Спосіб формування електродних свічок з використання комбінованих компенсаційних вставок пройшов перевірку у промислових умовах. У результаті цього встановлено, що отримані дані числового аналізу ефективності використання технічного рішення збігаються з даними фізичного експерименту, який проведено на діючому промисловому обладнанні.

Використання запропонованих технічних рішень з модернізації пічного устаткування дало змогу підвищити енергоефективність печей графітування Кастнера за незмінної якості графітової продукції (рисунок 3).



*а* – зменшення перепаду температури в крайніх заготовках; *б* – підвищення мінімальної температури в крайніх заготовках; *в* – зменшення питомих витрат електроенергії; *г* – зменшення тривалості графітування; *д* – зниження швидкості нагрівання в небезпечному для заготовок діапазоні температур 1800–2100 °С (діапазон інтенсивного виділення оксидів сірки з матеріалу заготовок)

Рисунок 3 – Показники ефективності використання запропонованих технічних рішень

Розроблені технічні рішення захищено патентами України на корисні моделі №№ 98757, 100302, 107147, 108531.

У додатках наведено числові методики та алгоритми розв'язання теплоелектричної та пружної задач методом скінченних елементів, результати тестування розробленого програмного забезпечення та верифікації розроблених числових моделей, розрахунки похибок вимірювання фізичних величин, фізичні властивості матеріалів печі й документи, що підтверджують впровадження результатів досліджень.

## ВИСНОВКИ

Головний результат дисертаційної роботи – вирішення важливої науково-технічної задачі створення наукових засад з розробки та вдосконалення конструкцій пічного обладнання та регламентів його експлуатації під час процесу графітування великогабаритної електродної продукції в печах Кастнера, що дають змогу визначити раціональні технічні рішення та підвищити якість готової продукції за мінімальних матеріальних та людських ресурсів, що сприяє енергозбереженню в електродній промисловості.

1. На підставі літературного огляду стану питання експериментального дослідження і математичного моделювання процесу та обладнання для графітування електродних заготовок обґрунтовано доцільність використання числового моделювання спільно з вибірковими (окремими) фізичними експериментами для розробки раціональних конструкцій та регламентів експлуатації печей прямого графітування за методом Кастнера.

2. У результаті аналізу стану проблеми математичного моделювання фізичних полів процесу графітування електродних виробів у печах Кастнера встановлено, що в існуючих математичних моделях не враховуються теплові ефекти хімічних реакцій газифікації, що впливають на рівень температур заготовок у процесі графітування в ППН, а їх застосування обмежене областю, у якій виконувалася оцінка їх адекватності.

3. Сформульовано фізичну та математичну моделі процесу графітування електродних виробів у печі Кастнера, у яких враховуються: теплові ефекти хімічних реакцій газифікації вуглецевмісних матеріалів печі; механізм перенесення вологи та водяної пари; конверсія водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі. Математична модель ґрунтується на системі нелінійних диференціальних рівнянь теплоелектропровідності, механічного руху та рівноваги з використанням механічної моделі для сипучих матеріалів Друкера-Прагера й описує ТЕМ стан печі графітування Кастнера з урахуванням контактних взаємодій ТЕМ природи на границі «сипучий матеріал – тверде тіло».

4. Розроблено числову модель ТЕМ стану печі Кастнера з урахуванням нелінійної залежності теплоелектричних властивостей вуглецевих матеріалів від температури та тиску, що дає змогу отримати числові результати тепловтрат, фізичні поля за різних регламентів введення електричної потужності, завантаження електродних свічок, вологості теплоізоляційного матеріалу тощо, що є необхідним при вдосконаленні діючого та створення нового (модернізованого) пічного обладнання та енергозберігаючих регламентів його експлуатації.



5. Розроблено схеми завантаження електродних заготовок, встановлення експериментальних датчиків і методику експериментальних досліджень та проведено експериментальні дослідження теплоелектричного стану промислової печі Кастнера під час кампанії графітування електродних заготовок діаметром 435 мм.

6. Експериментально встановлено, що під час кампанії графітування печі Кастнера має місце процес газифікації вуглецевого матеріалу водяною парою в робочому просторі печі, який призводить до зменшення на 10–20 % темпу нагрівання поверхні електродних заготовок, крізь які проходить електричний струм.

7. Експериментально досліджено КЕО контактних пар мідь–графіт та графіт–прокладка–графіт та встановлено для контактної пари графіт–прокладка–графіт температурну залежність КЕО в інтервалі до 250 °С.

8. Виконано верифікацію числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера у процесі графітування електродних заготовок, у якій враховується теплові ефекти хімічних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу. Встановлено, що збіжність результатів числового моделювання температурних полів з фізичним експериментом становить у межах 4 % в інтервалі зміни температур до 1600 °С у разі врахування впливу теплових ефектів хімічних реакцій газифікації, а без врахування цих ефектів розбіжність між числовими й експериментальними даними перевищує 10 %.

9. У результаті проведених досліджень теплоелектричного стану печі Кастнера експериментально встановлено та теоретично підтверджено за допомогою числового моделювання вплив процесу газифікації вуглецевого матеріалу на формування рівня температур у печі та, зокрема, в електродних заготовках.

10. Проведено числовий аналіз впливу параметрів технологічного регламенту на процес графітування вуглецевої продукції в печах графітування Кастнера, на підставі якого розроблено технічні рішення щодо мінімізації перепаду температури у крайніх торцевих заготовках. Визначено, що найбільш ефективними рішеннями є використання комбінованих компенсаційних вставок, виконаних у формі порожнистих графітових циліндрів та заповнених всередині високоомним теплоізоляційним матеріалом, або використання електроконтактних прокладок з високим значенням електричного опору між компенсаційними вставками та струмопідводами печі графітування Кастнера.

11. З'ясовано, що збільшення вологості теплоізоляційного матеріалу печі призводить до зміщення запланованого графіка швидкості росту температури в зону більш низьких температур, що може призвести до механічного руйнування заготовок, внаслідок високої швидкості їх нагрівання в небезпечному діапазоні температур.

12. Розроблено нову конструкцію вставки для формування електродних свічок під час завантаження печі Кастнера, яка дає змогу зменшити нерівномірність температурного поля крайніх заготовок свічок і, відповідно, максимальний рівень температури їх обробки, зменшити витрати електроенергії на кампанію графітування.

13. Запропоновані технічні рішення та результати науково-технічних досліджень впроваджено на електродному виробництві на ПАТ «Укрграфіт» на переділлі графітування електродних заготовок за методом Кастнера. Результати досліджень використані в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах : монографія / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацький, С. М. Панов, С. В. Лелека, **А. Ю. Педченко**. — К. : НТУУ «КПІ», 2016. — 154 с.

*Особистий внесок здобувача: аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень в електричних печах.*

2. The study of uneven temperature field in billet electrodes during their graphitization in the Castner furnace / S. V. Leleka, T. V. Lazariiev, **A. Yu. Pedchenko**, D. G. Shvachko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2015. — Т. 6, № 5(78). — Р. 28—32. DOI : 10.15587/1729-4061.2015.56642 (Входить до наукометричних баз Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, CAS, CiteFactor, DRJI, CrossRef, OAJI).

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень теплоелектричного стану печі Кастнера, аналіз отриманих результатів.*

3. Method for determining the bulk temperature of the Acheson graphitization furnace core / Ye. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, S. V. Leleka, T. V. Lazariiev, **A. Yu. Pedchenko**, D. G. Shvachko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2015. — № 3/5(75). — Р. 41—46. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43721 (Входить до наукометричних баз Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, CAS, CiteFactor, DRJI, CrossRef, OAJI).

*Особистий внесок здобувача: аналіз результатів розробки методики оперативного визначення теплового стану ядра печі графітування.*

4. Electrical contact resistance research of graphite with copper and termoexpanded graphite / A. Ya. Karvatskii, S. V. Leleka, I. V. Pulinets, T. V. Lazariiev, **A. Yu. Pedchenko** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2014. — № 5/5 (71). — Р. 45—49. DOI : 10.15587/1729-4061.2014.27989 (Входить до наукометричних баз Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, CAS, CiteFactor, DRJI, CrossRef, OAJI).

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень з визначення контактного електричного опору графіту з міддю та терморозширеним графітом.*

5. Panov, Ye. N. Reasonable application analysis of Casnter graphitization furnaces according to the demands of modern market / Ye. N. Panov, **A. Yu. Pedchenko** // *Technology audit and production reserves*. — 2014. — Vol. 4, № 1(18). — Р. 57—60. — DOI : 10.15587/2312-8372.2014.26434 (Входить до наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, BASE, Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, CiteFactor, DRJI, CrossRef, OAJI, Sherpa/Romeo, Open Access Articles, JURN, WorldWideScience.org).

*Особистий внесок здобувача: аналіз тенденції розвитку сучасного стану ринку з виготовлення електродної продукції.*

6. Карвацький, А. Я. Розв'язання нелінійної нестационарної задачі теплоелектропровідності методом скінченних елементів / А. Я. Карвацький, **А. Ю. Педченко** // Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки. — 2016. — № 32 — С. 205—214. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, OAJI, Google Scholar, Science index, SIS, ResearchBib, CiteFactor, IJIF, Science Library Index, DRJI, Cosmos Impact Factor).

*Особистий внесок здобувача: розробка числової методики й алгоритму розв'язання нелінійних нестационарних задач теплоелектропровідності, проведення числових експериментів за допомогою програмного забезпечення авторської розробки.*

7. Панов, Є. М. Доцільність застосування печей графітування Кастнера у виробництві електродної продукції / Є. М. Панов, **А. Ю. Педченко** // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2014. — № 2(13). — С. 36—39.

*Особистий внесок здобувача: аналіз доцільності застосування печей графітування Кастнера у виробництві електродної продукції.*

8. Пат. на корисну модель 98757 України, кл. МПК (2015.01) G01N 13/00, G01B 11/26 (2006.01). Спосіб визначення кута природного укусу сипучих матеріалів / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, **А. Ю. Педченко**; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». — № у 2014 11335; заявл. 17.10.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. — 3 с.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу визначення кута природного укусу сипучих матеріалів.*

9. Пат. на корисну модель 100302 України, кл. МПК (2015.01) C10B 57/00, F27B 7/00. Спосіб прожарювання вуглецевмісного матеріалу / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. В. Пулінець, І. О. Мікульонок, Т. В. Лазарєв, **А. Ю. Педченко**; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». — № у 2014 13056; заявл. 05.12.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. — 4 с.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу прожарювання вуглецевмісного матеріалу.*

10. Пат. на корисну модель 107147 України, кл. МПК (2016.01) G01K 17/00, G01N 21/3563. Спосіб визначення густини теплового потоку твердого тіла в прозорому для інфрачервоного випромінювання рухомому середовищі / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок, **А. Ю. Педченко**; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». — № у 2015 11173; заявл. 13.11.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. — 3 с.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу визначення густини теплового потоку твердого тіла.*

11. Пат. на корисну модель 108531 U України, кл. МПК (2016.01) C01B 31/04 (2006.01), F27B 13/00. Спосіб завантаження вуглецевих заготовок у печі прямого графітування за методом Кастнера / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарєв, І. О. Мікульонок, **А. Ю. Педченко**; заявник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»; — № у 2015 12688 UA; заявл. 23.12.2015. опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. — 3 с.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу завантаження електродних виробів у піч Кастнера.*

12. Pedchenko A. Investigation of gasification of carbon material in Castner direct-fired furnace / **A. Pedchenko**, T. Lazarev // Economics, science, education: integration and synergy: materials of intern. scientific and pract. conf, (Bratislava, 18-21 January 2016).: in 3 V. — V. 3 — K. : Publ. outfit “Centre of educational literature”, 2016. — p. 110.

*Особистий внесок здобувача: дослідження впливу процесу газифікації вуглецевого матеріалу на теплоелектричний стан печей Кастнера.*

13. Педченко, А. Ю. В'язкість вуглецевої маси в діапазоні температури 120–170 °С [Електронний ресурс] / **А. Ю. Педченко**, М. В. Коржик // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». Одеса. — 21-24 червня 2016 року. — С. 71—73. — Режим доступу: [http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/MNTK-17\\_2016-2.pdf](http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/MNTK-17_2016-2.pdf).

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта ефективної динамічної в'язкості вуглецевої композиції.*

## АНОТАЦІЯ

**Педченко А. Ю. Теплоелектричний стан печей графітування Кастнера.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

Дисертацію присвячено створенню наукових засад розробки та вдосконалення технологічних регламентів процесу графітування електродних виробів у печах Кастнера, що забезпечують визначення раціональних експлуатаційних параметрів обладнання та підвищення якості готової продукції, а отже – ресурсоенергозбереження і зменшення техногенного впливу на довкілля.

Розроблено фізичну модель та обґрунтовано використання математичної моделі процесу графітування електродної продукції в печі Кастнера з врахуванням теплових ефектів хімічних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу, конверсії водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі, механізм перенесення вологи та водяної пари, сублимація графіту, теплоелектрична та механічна контактна взаємодія між елементами конструкції печі. Проведено експериментальні дослідження теплоелектричного стану печі графітування Кастнера, завдяки чому підтверджено вплив процесу газифікації вуглецевого матеріалу на розподіл температур в робочому об'ємі печі та виконана верифікація числових моделей. Проведено числовий аналіз впливу параметрів технологічного регламенту на процес графітування вуглецевої продукції в печах Кастнера, на підставі чого розроблено технічні рішення щодо мінімізації перепаду температури в торцевих заготовках.

**Ключові слова:** піч Кастнера, графітування, числове моделювання, електродні вироби, теплоелектричний та механічний стан, ресурсоенергозбереження.

## АННОТАЦИЯ

**Педченко А. Ю. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Кастнера.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена созданию научных основ разработки и усовершенствования технологических регламентов графитирования электродных изделий в печах Кастнера, обеспечивающих рациональные эксплуатационные параметры оборудования и повышение качества готовой продукции, а также ресурсоэнергосбережение и уменьшение техногенного влияния на окружающую среду.

Разработана физическая модель и обосновано использование математической модели процесса графитирования электродной продукции в печи Кастнера с учетом тепловых эффектов химических реакций газификации углеродного материала, конверсии водорода и оксидов углерода в теплоизоляционном материале, механизм переноса влаги и водяного пара, сублимация графита, теплоэлектрическое и механическое контактное взаимодействие между элементами конструкции печи. Проведены экспериментальные исследования теплоэлектрического состояния печи графитирования Кастнера, на основании которых подтверждено влияние процесса газификации углеродного материала на распределение температур в рабочем объеме печи и выполнена верификация численных моделей. Проведен численный анализ влияния параметров технологического регламента на процесс графитирования углеродной продукции в печах Кастнера, на основании чего разработаны технические решения по минимизации перепада температуры в торцевых заготовках.

**Ключевые слова:** печь Кастнера, графитирование, численное моделирование, электродные изделия, механическое и теплоэлектрическое состояние, ресурсоэнергосбережение.

## ANNOTATION

**Pedchenko A. Yu. Thermoelectric state of Castner graphitization furnaces.** – Manuscript copyright.

Thesis for Ph.D. degree of technical sciences in the specialty 05.17.08 – Processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation deals with the important scientific task of creating the scientific basis for development and enhancement of furnace equipment and its operation instructions during the graphitization process of large-size electrode production in Castner`s furnace. It allows to determine the rational technical solutions and increase the production quality using minimal material and labour resources, saving the energy in such a way.

The physical model was developed and the usage of the mathematical model for the graphitization process of electrode production in Castner`s furnace was considered taking

the following factors into account: thermal effects of chemical gasification reactions in the carbon material, hydrogen and carbon oxide conversion in the thermal insulating material, mechanism of damp and vapour transfer, graphite sublimation, thermo-electrical and mechanical contact interaction between the furnace construction elements. The mathematical model of the directly fired furnace is based on the system of nonlinear differential equations of thermal and electrical conductivity and the balance of the mechanical motion in the incremental form with the usage of the mechanical model for the granular Drucker-Prager medium. The model describes the mechanical and thermo-electrical state of Castner's graphitization furnace taking into account the contact interaction of the thermo-electrical and mechanical nature of the boundary "granular material-solid body". The numerical methodology for the problem of the thermo-electrical and mechanical state was developed on the basis of the finite elements. The appropriate software was designed and it underwent testing.

The numerical model of the mechanical and thermo-electrical state of the directly fired furnace was developed based on the dependence of the physical properties of carbon materials on the temperature and pressure. The numerical model enables to collect data from the physical fields and thermal expenditures under various guidelines of electrical power, thermal insulating material loads, granular materials moisture etc. It is required for improvement of the current and future furnace equipment and energy efficient guidelines of its operation.

Based on the developed electrical artifacts load scheme, scheme of the experimental indicators installation, experimental research methodology, it was possible to conduct a research on the thermo-electrical state of Castner's furnace during the graphitization process of electrode artifacts with the diameter of 435 mm. It was experimentally proved that the gasification process of carbon material takes place in the form of vapour in the furnace operation areas during the electrode production heating. It leads to the heating velocity decrease of the electrode artifacts under the temperature 600–900 °C by 10–20 %.

Based on the gained experimental data, the verification of the numerical model of the thermal and electrical state of the furnace was conducted. It was found out that the relative violation between the values of average temperatures, gained from the computer modelling and physical experiments, is up to 4 % within the temperature range up to 1600 °C.

Based on the conducted numerical analyses of the influence of the technological instructions on the graphitization process of the carbon production in Castner's furnace, the technical solutions were developed in order to minimize the temperature fall in the terminal artifacts. It was determined that the usage of the special compensation conducting elements in the form of empty graphite cylinders filled with thermal high-resistant insulating material is the most efficient solution.

The results of the theoretical and experimental researches are implemented into production for development of the rational constructions and technological instructions for Castner's furnace operation. The results are protected by useful model patents.

**Keywords:** Castner furnace, graphitization, numerical simulation, electrode products, mechanical and thermoelectric state, operating practices, resource and energy saving.