

## **Розробка енергоефективних конструкцій печей прямого нагрівання Кастнера для графітування електродних виробів**

## **Разработка энергоэффективных конструкций печей прямого нагрева Кастнера для графитирования электродных изделий**

## **The development of energy-efficient designs direct heating the Castner furnace for graphitization electrode products**

**1. Номер державної реєстрації теми - 0115U002410,**

**2. Науковий керівник - д.т.н., проф. Панов Є.М., Панов Є.М., Panov Evgen M.**

**3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Розроблено енергоефективні конструкції та регламенти експлуатації печей Кастнера для графітування великогабаритних електродних заготовок, що не мають аналогів в Україні та забезпечують зменшення питомої витрати електроенергії на 20–25 %. Експериментально досліджено теплоелектричний стан печі прямоточного нагрівання під час графітування електродних заготовок з різними компенсаційними вставками. Встановлено, що під час кампанії графітування в печі Кастнера має місце процес газифікації вуглецевого матеріалу водяною парою в робочому просторі печі, який призводить до зменшення темпу нагрівання електродних заготовок на 10–20 %. Розроблено фізичну та сформульовано узагальнену математичну моделі процесу графітування електродних заготовок в печі прямого нагрівання за методом Кастнера, в яких враховуються: механізм перенесення вологи та водяної пари; теплові ефекти хімічних реакцій газифікації вуглецевмісних матеріалів печі; конверсія водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі; гідростатичний тиск в шарі сипучої теплоізоляції. Створено числову модель теплоелектричного та механічного стану печі графітування Кастнера з урахуванням нелінійної залежності теплоелектричних властивостей вуглецевих матеріалів від температури й тиску та виконано її верифікацію за даними фізичного експерименту. Визначено вплив на теплоелектричний стан печей графітування різних параметрів технологічного регламенту й устаткування: режими введення електроенергії; схеми розміщення електродних свічок; форми електроконтактних вставок; фізичних властивостей теплоізоляційної шихти тощо. Розроблено технічні рішення щодо мінімізації перепаду температури в торцевих заготовках. Визначено, що найбільш ефективним рішенням є використання компенсаційних вставок, виконаних у формі пустотілих графітових циліндрів, які заповнено всередині високоомним теплоізоляційним сипучим матеріалом. Розроблено рекомендації щодо впровадження енергоефективних технологічних регламентів процесу графітування та технічні рішення зі вдосконалення конструкції печі.

**(рос.)**

Разработаны энергоэффективные конструкции и регламенты эксплуатации печей Кастнера для графитирования крупногабаритных электродных заготовок, не имеющих аналогов в Украине и обеспечивающих уменьшение удельных расходов электроэнергии на 20–25 %. Экспериментально исследован теплоэлектрическое состояние печи прямоточного нагрева при графитировании электродных заготовок с различными компенсационными вставками. Установлено, что во время кампании графитирования в печи Кастнера имеет место процесс газификации углеродистого материала водяным паром в рабочем пространстве печи, который приводит к уменьшению темпа нагрева электродных заготовок на 10–20 %. Разработана физическая и сформулирована обобщенная математическая модели процесса графитирования электродных заготовок в печи прямого нагрева по методу Кастнера, в которых учитываются: механизм переноса влаги и водяного пара; тепловые эффекты химических реакций газификации углеродсодержащих материалов печи; конверсия водорода и оксидов углерода в теплоизоляционном материале; гидростатическое давление в слое сыпучей

теплоизоляции. Разработана численная модель теплоэлектрического и механического состояния печи графитирования Кастнера с учетом нелинейной зависимости теплоэлектрических свойств углеродистых материалов от температуры и давления и проведена ее верификация по данным физического эксперимента. Определено влияние на теплоэлектрическое состояние печей графитирования различных параметров технологического регламента и оборудования: режимы введения электроэнергии; схемы размещения электродных свечек; формы электроконтактных вставок; физических свойств теплоизоляционной шихты. Разработаны технические решения для минимизации перепада температуры в торцевых заготовках. Определено, что наиболее эффективным решением является использование компенсационных вставок, выполненных в форме пустотелых графитовых цилиндров, заполненных высокоомным теплоизоляционным сыпучим материалом. Разработаны рекомендации для внедрения энергоэффективных технологических регламентов процесса графитирования и технические решения по усовершенствованию конструкции печи.

(англ.)

Energy-saving constructions and regulations of the Castner furnaces operation were developed for graphitization of large-sized electrode workbenches, which have no other analogue in Ukraine and reach energy expenses decrease by 20–25 %. Thermal and electrical furnace state was experimentally investigated during graphitization of electrode workbenches with different expansion blocks. It was found out that gasification process of carbon material by water vapor occurs in operation area during graphitization process in the Castner furnace. It leads to decrease of heating velocity of electrode workbenches by 10–20 %. Physical and general mathematical models of graphitization process of electrode workbenches in the Castner directly heated furnaces were designed, taking into account transferring mechanisms of damp and water vapor, thermal effects of chemical gasification reactions of carbon containing furnace materials, hydrogen and carbonic oxide conversion in heat-insulating material, hydrostatic pressure in granular heat-insulating layer. Numerical model of thermal-electrical and mechanical state of the Castner graphitization furnace was developed, taking into account non-linear dependence of thermal and electrical properties of carbon materials on temperature and pressure. This dependence was verified by data of physical experiment. The influence on thermal and electrical state of graphitization furnace was defined for different parameters of technological regulations and equipment: electrical energy introduction mode; bleeder stacks location scheme; the form of electric-contact blocks; physical properties of heat-insulating furnace feed. Technical solution for temperature drop in end workbenches was found. It was determined that the usage of expansion blocks is the most efficient method. The blocks must be in the form of hollow graphite cylinders filled with high-resistance heat insulating granular material. The recommendations for implementation of energy-saving technological regulations of graphitization process and technical solutions for improvement of furnace construction were developed.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

- 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.
- Пат. на корисну модель 100302 України, кл. МПК (2015.01) C10B 57/00, F27B 7/00. Спосіб прожарювання вуглецевого 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. — 2 с.
- 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.

## **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати НДР відповідають аналогам таких провідних світових виробників як GrafTech International, Ltd.; Graphite India, Ltd.; HEG, Ltd.; JSC Energoprom Management; Nippon Carbon Co., Ltd; SEC Carbon, Ltd.; SGL Carbon Group; Showa Denko Carbon, Inc., зокрема, за рівнем ПВЕ, продуктивності та показниках якості готової продукції і захищено відповідними охоронними документами на об'єкти права інтелектуальної власності (3 патенти) та опубліковані в журналі, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus (2 статті).

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Застосування розробок НДР у вигляді числових моделей фізичного стану обладнання під час відпрацювання енергоефективних конструкцій та регламентів експлуатації графітування електродів великого перетину в печах Кастнера має вагомні техніко-економічні переваги, порівняно з експериментальними дослідженнями:

- в першу чергу це відмова від виконання великої серії коштовних експериментальних досліджень, що забезпечує економію матеріальних та часових ресурсів, підвищує конкурентоспроможність підприємства;
- по-друге застосування методів наукоємного комп'ютерного інжинірингу надає змогу віртуально досліджувати теплоелектричний та механічний стан печей Кастнера з метою відпрацювання раціональних конструкцій і регламентів нагрівання електродних заготовок з великим ступенем достовірності отримуваних даних;
- вартість реалізації проекту складає близько 625 млн грн;
- терміни впровадження та окупності складають 2 роки і 5 років, відповідно.

## **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Підприємства металургійної галузі – МК «Запоріжсталь», ПАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та ін.

## **8. Стан готовності розробки.**

Робота у вигляді технічних рішень, ескізних проектів і програмного забезпечення для виконання числового аналізу теплоелектричних та механічних полів під час графітування електродних заготовок в печах Кастнера з метою визначення раціональних регламентів введення електричної потужності готова до впровадження.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Основні теоретичні положення роботи, що пов'язані з фізичними властивостями вуглецевмісних матеріалів і математичними моделями фізичних полів обладнання, викладені у монографії грифом Вченої ради КПІ імені Ігоря Сікорського на тему: «». За матеріалами роботи підготовлено до захисту дві кандидатські дисертації асп. Педченко А. Ю. на тему «Теплоелектричний стан печей графітування Кастнера» і асп. Стрельцова Ю.В. на тему «Характеристики металевих поруватих матеріалів: вплив на теплообмін у теплових трубах хімічно-енергетичного призначення». Видано навчальні посібники з грифом Вченої ради КПІ імені Ігоря Сікорського на теми: «Механіка суцільних середовищ» і «Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів». Результати роботи впроваджено у виробництво на ПАТ «Укрграфіт», м. Запоріжжя. Предметом впровадження є: математична та числова моделі фізичних полів процесу графітування електродних заготовок в печах прямого нагрівання, що необхідні для розробки енергоефективних конструкцій і регламентів експлуатації обладнання; експериментальні дані з коефіцієнтів теплопровідності й електропровідності шихтових матеріалів різного гранулометричного складу; експериментальні дані з контактного електричного опору контактних пар мідь-графіт, графіт-графіт; результати числового аналізу енергетичної ефективності різних конструкцій печей Кастнера та регламенти введення електроенергії; технічні рішення по водяному охолодженню рухомих струмопідводів, дані теплотехнічних розрахунків; науково-обґрунтовані енергоефективні конструкції та технологічні регламенти графітування великогабаритної продукції в печах Кастнера.

**10. Форма участі інвестора.** В реалізації результатів проекту частка інвестора 100%, а частка від прибутку 75%.

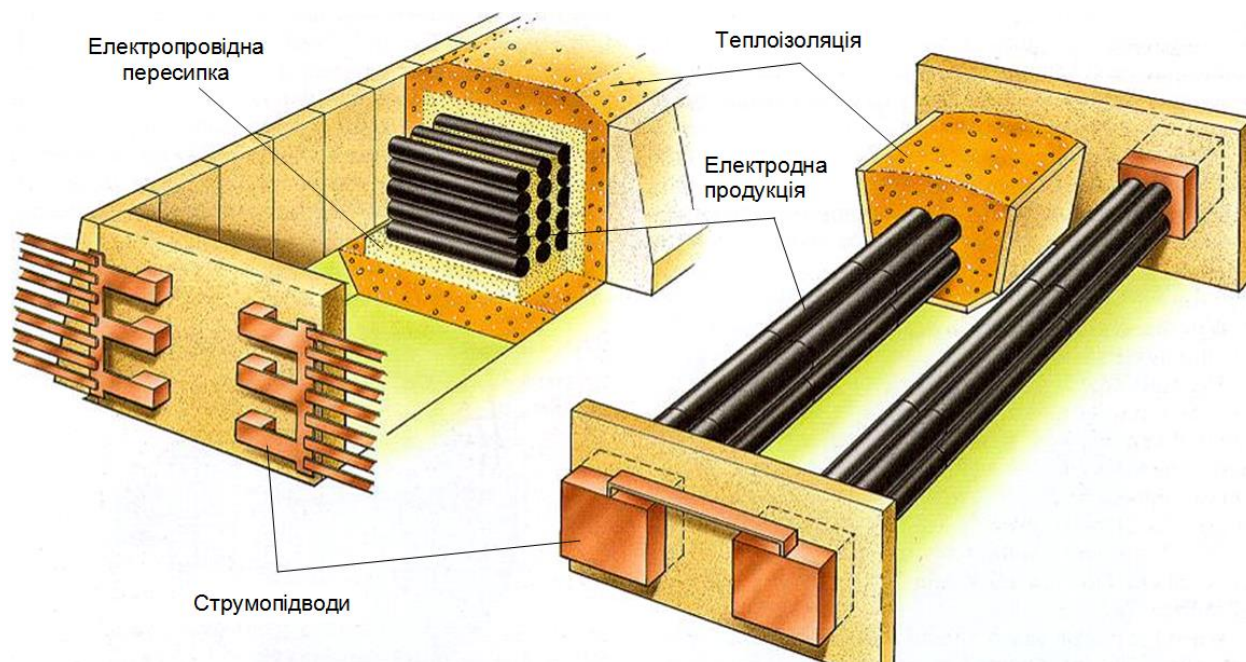
**11. Обсяг інвестицій** \$24,500,000.

**12. Мета інвестицій** – забезпечення капітальних вкладень для переходу на графітування великогабаритних електродів із застарілої технології Ачесона на сучасну технологію Кастнера (модернізація корпусу підприємства, будівництво печей, придбання сучасного електродийного та теплообмінного обладнання), раціональних регламентів введення електричної потужності тренінг користувачів програмного забезпечення.

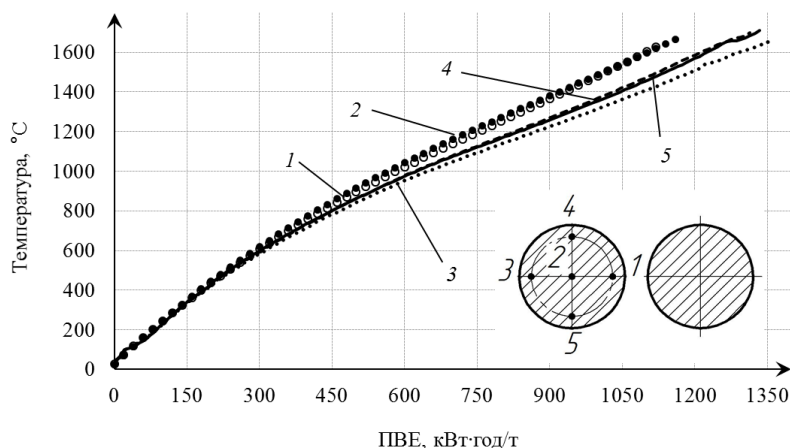
**13. Назва підрозділу, телефон, e-mail**

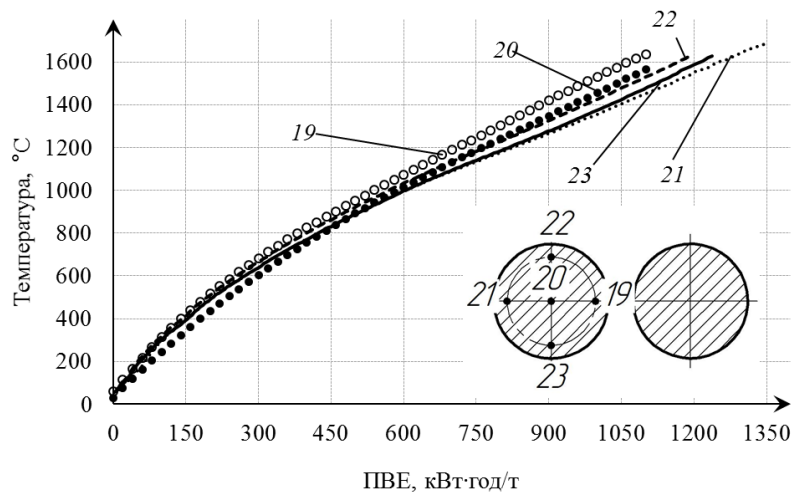
науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ»), КПІ імені Ігоря Сікорського, інженерно-хімічний факультет, 406-83-09, [admin@rst.kpi.ua](mailto:admin@rst.kpi.ua)

**14. Графічна презентація розробки**

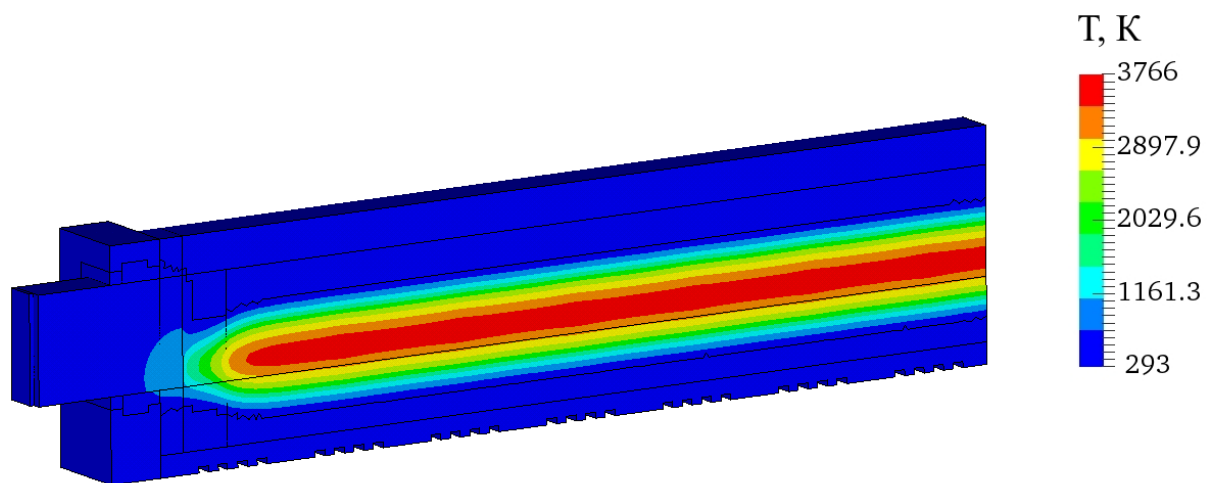


*а* *б*  
Типи печей графітування: (а) Ачесона, (б) Кастнера

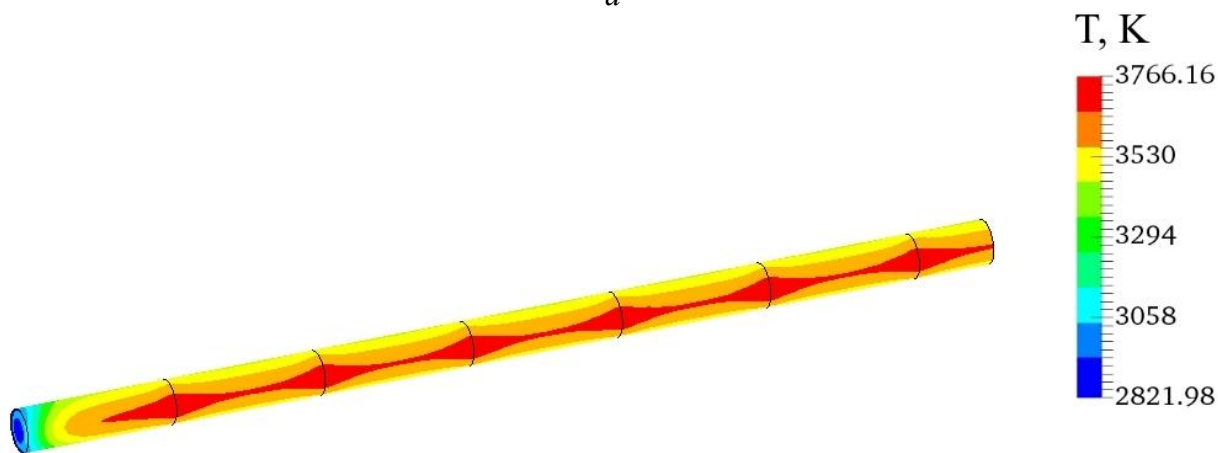




Результати експериментальних досліджень теплового стану печі Кастнера:  
1-5, 19-23 – номери термопар



*a*



*б*

Результати числового аналізу теплового стану печі Кастнера на кінець кампанії графітування: (а) температурне поле печі, (б) температурне поле свічки з електродів

### 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів [Текст] : моногр. / Т. В. Чирка, Г. М. Васильченко, Е. Н. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький. – Київ: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. – 152 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 5 від 11.04.2016 р.)

2. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 289 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 07.11.2016 р.) – Електронні текстові данні (1 файл: 11,4 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 290 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18094>
3. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 391 с. Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ» (Протокол № 4 від 12.05.2015 р.)
4. Method for determining the bulk temperature of the Acheson graphitization furnace core / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, S. V. Leleka, T. V. Lazariiev, A. Yu. Pedchenko, D.G. Shvachko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2015. — No 3/5(75). — P. 41—46. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43721.
5. 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. — Vol. 6, No 5(78). — P. 28—32. — Way of Access : DOI : 10.15587/1729-4061.2015.56642.
6. Conversion of water vapor and gasification of core charge in graphitization Acheson furnaces / Ye. Panov, A. Karvatskii, S. Leleka, T. Lazarev, A. Pedchenko // Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. — 2016. — № 4. — P. 15—18.
7. 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.

**16. ГРАФІТУВАННЯ, ПІЧ ПРЯМОГО НАГРІВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТА МЕХАНІЧНИЙ СТАН, ГАЗИФІКАЦІЯ, ХІМІЧНІ РЕАКЦІЇ**