

## ОПИС ЗАВЕРШЕНОЇ РОЗРОБКИ (бюджет)

**Розробка дискових з'єднань між заготовками у колонах та енергоефективних регламентів графітування електродів у печах прямого нагрівання**

**Development of disk connections between billets in columns and energy-efficient graphitizing regulations for electrodes in direct-heating furnaces**

1. **Номер державної реєстрації - 0120U102182, номер реєстрації в університеті - 2312-р.**
2. **Науковий керівник - д.т.н., проф. Панов Є.М., Panov Evgen M.**
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Сформульовано вимоги до електроконтактних з'єднань між заготовками в колонах ядра печей Кастнера. Обґрунтовано вибір матеріалу – спіненого графіту для виготовлення електроконтактних прокладок. Визначено раціональну форму та товщину електроконтактних прокладок, підібрано клей для їхньої фіксації між електродними заготовками. Розроблено пресформу для формування електроконтактних прокладок та виготовлено дослідні зразки прокладок різної форми, товщини та густини з метою перевірки їх придатності для формування ядра печей Кастнера в промислових умовах. Отримано експериментальні залежності питомого електричного опору (ПЕО) електроконтактних прокладок та контактного електричного опору пари «заготовка–прокладка» залежно від тиску й температури. Експериментально встановлено раціональну товщину та густину електроконтактних прокладок. Розроблено інноваційні високотехнологічні заходи з формування колон ядра за межами печей Кастнера, що складаються з електродних заготовок та електроконтактних з'єднань між ними. Уточнено математичну та числову моделі теплоелектричного стану печей прямого нагрівання під час графітування електродних заготовок, в яких враховується залежність ПЕО з'єднань і контактного теплоелектричного опору між заготовками і прокладками від тиску й температури. З використанням розробленої моделі печі Кастнера для числового аналізу фізичних полів процесу графітування виконано розробку інтенсифікованих регламентів графітування електродних заготовок у колонах, що з'єднані між собою новими електроконтактними прокладками. Проведено експериментальну перевірку розроблених технічних рішень на діючому промисловому обладнанні. Визначено ефективність запропонованих технічних рішень з модернізації способу формування колон ядра та інтенсифікації регламентів підводу електричної потужності печей Кастнера, що включає зменшення питомої витрати електроенергії та вихід бракованої продукції.

**(англ.)**

The requirements for electric contact joints between workpieces in the core columns of Kastner furnaces are formulated. The choice of a material - graphite foam - for making electric contact gaskets is justified. Rational form and thickness of electric contact pads have been determined, the glue for their fixation between electrode blanks has been selected. A mold for forming electrocontact pads has been developed and prototypes of pads of different shapes, thickness and density have been made in order to check their suitability for forming Kastner furnace core under industrial conditions. Experimental dependences of specific electrical resistance (resistivity) of electric contact pads and contact resistance of "blank-pad" pair depending on pressure and temperature were obtained. Rational thickness and density of electric contact pads have been determined experimentally. Innovative high-tech core-core formation measures outside Kastner furnaces consisting of electrode billets and electrocontact joints between them have been developed. Mathematical and numerical models of the thermoelectric state of direct heating furnaces during graphitization of electrode billets are refined, which take into account the dependence of the resistivity of the connections and the contact thermoelectric resistance

between the billets and spacers on the pressure and temperature. Using the developed Kastner furnace model for the numerical analysis of the physical fields of the graphitization process, the intensified regulations of graphitization of electrode billets in the columns connected by new electrocontact spacers are developed. Experimental testing of the developed technical solutions on the operating industrial equipment is carried out. The effectiveness of the proposed technical solutions to modernize the method of core formation and intensify the regulations of the electrical power supply of Castner furnaces is determined, which includes the reduction of specific electricity consumption and the output of defective products.

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

- Пат. 146006 U Україна, МПК (2021.01) C01B 32/20 (2017.01) F27B 13/00. Спосіб підготовки печі прямого нагрівання за методом Кастнера для процесу графітування / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С.В. Лелека, І.О. Мікульонок та ін. ; заявник і патентовласник – ПрАТ «Укрграфіт». № u 2020 05491; заявл. 25.08.2020; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 2/2021.
- Пат. 146007 U Україна, МПК (2021.01) C01B 32/20 (2017.01) C04B 35/52 (2006.01) F27B 13/00 H05B 3/00. Електроконтактна прокладка заготовок електродної колони, складеної для їх графітування в печі прямого нагрівання за методом Кастнера / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С.В. Лелека, І.О. Мікульонок та ін. ; заявник і патентовласник – ПрАТ «Укрграфіт». № u 2020 05492; заявл. 25.08.2020; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 2/2021.
- Пат. 146272 U Україна, МПК B02C 1/02 (2006.01) B02C 1/10 (2006.01). Рухома щока щокової дробарки / А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І.О. Мікульонок, Є. М. Панов, В. Ю. Щербина, О. Д. Шелюк ; заявник і патентовласник – вони же. № u 2020 06364; заявл. 01.10.2020; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5/2021.
- Пат. 146609 U Україна, МПК (2021.01) B21C 29/00. Пристрій для охолодження електродних заготовок / А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок, Є. М. Панов ; заявник і патентовласник – вони же. № u 2020 06959; заявл. 30.10.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. № 9/2021.
- Пат. 146612 U Україна, МПК (2021.01) B21C 29/00. Спосіб охолодження електродних заготовок / О. І. Іваненко, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок, Є. М. Панов ; заявник і патентовласник – вони же. № u 2020 06962; заявл. 30.10.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. № 9/2021.
- Пат. № 147700 U Україна, МПК (2021.01) B29C 64/10(2017.01) B33Y 10/00. Спосіб тривимірного друку виробів / І.О. Мікульонок, А.Я. Карвацький, С.В. Лелека, В.В. Соловей ; заявник і патентовласник – вони же. № u202100800; заявл. 22.02.2021; опубл. 02.06.2021, Бюл. № 22/2021.
- Пат. № 147783 U Україна, МПК (2017.01) B29C 64/10. Спосіб тривимірного друку виробів / А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, С.В. Лелека, В.В. Соловей, І.В. Омельчук ; заявник і патентовласник – вони же. № u202100801; заявл. 22.02.2021; опубл. 09.06.2021, Бюл. № 23/2021.
- Пат. № 147784 U Україна, МПК (2017.01) C01B 32/20. Електроконтактна прокладка заготовок електродної колони, складеної для їх графітування в печі прямого нагрівання за методом Кастнера / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, С.В. Лелека, В.В. Соловей ; заявник і патентовласник – вони же. № u202100802; заявл. 22.02.2021; опубл. 09.06.2021, Бюл. № 23/2021.
- Пат. № 147785 U Україна, МПК (2017.01) B29C 64/20. Екструдер пристрою для тривимірного друку композиційних виробів / А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, С.В. Лелека, Є.М. Панов, В.В. Соловей ; заявник і патентовласник – вони же. № u202100803; заявл. 22.02.2021; опубл. 09.06.2021, Бюл. № 23/2021.

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

Результати НДР відповідають і навіть перевищують аналоги таких провідних світових виробників як Elcem A Bluestar Company (Норвегія), IBIDEN (Японія), SLG (Германія),

Datong Xincheng New Material (Китай), зокрема, питомими витратами енергії на виготовлення одиниці кінцевого продукту, його якістю та показниками виходу придатної продукції і захищені відповідними охоронними документами на об'єкти права інтелектуальної власності (9 патентів) та опубліковані в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus (5 статей). Перевагою отриманих науково-прикладних результатів НДР над світовими аналогами є розробка уточненої математичної моделі теплоелектричного стану печі Кастнера, в якій також враховуватиметься контактна взаємодія різної фізичної природи, та в отриманні експериментальних даних, що необхідні для виконання відповідного числового аналізу з метою розробки енергоефективних регламентів обладнання.

**6. Економічна привабливість для просування на ринок (вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники).**

Чинниками для створення економічного ефекту від впровадження результатів розробок НДР є такими:

- зменшення питомих витрат електроенергії (ПВЕ);
- зменшення тривалості простоїв між кампаніями печей Кастнера (тобто підвищення продуктивності печей);
- зменшення виходу бракованих виробів.

Економічний ефект від впровадження розробок у промисловість тільки за рахунок зменшення ПВЕ становить 0.113 тис. грн на тону продукції:

- вартість реалізації проекту складає близько 2 млн грн;
- терміни впровадження та окупності складають 1–2 міс. і 1,5 року, відповідно.

Вихідні дані для розрахунків економічного ефекту тільки за рахунок зменшення ПВЕ: очікуване значення зменшення ПВЕ від впровадження результатів НДР становить 100 кВт·год/т; річний обсяг виробництва графітованих електродів в Україні в печах Кастнера становить біля 12000 т/рік; ціна електроенергії для промисловості становить з ПДВ 1,13 грн/(кВт·год) – 1 клас напруги, ПАТ «ЗАПОРІЖЖЯОБЛЕНЕРГО» (НКРЕКП, Тарифи на послуги з розподілу електричної енергії для побутових споживачів з 01.09.2021, <https://www.nerc.gov.ua/?id=63559>). В результаті розрахунків отримуємо

$$12000 \cdot 100 \cdot 1,13 / 1000 = 1356 \text{ тис. грн/рік або } 1356 / 12000 = 0,113 \text{ тис. грн./т.}$$

**7. Потенційні користувачі.**

Підприємства електродної та металургійної галузей – ПрАТ «Укрграфіт», ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат», МК «Запоріжсталь», ПрАТ Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та ін.

**8. Стан готовності розробки.**

Робота у вигляді технічних рішень, ескізних проектів і програмного забезпечення для виконання числового аналізу теплоелектричного та механічного стану обладнання під час графітування електродних заготовок в печах Кастнера з використанням електроконтактних прокадок у колах заготовок з метою визначення раціональних конструкцій та регламентів експлуатації обладнання готова до впровадження.

**9. Існуючі результати впровадження**

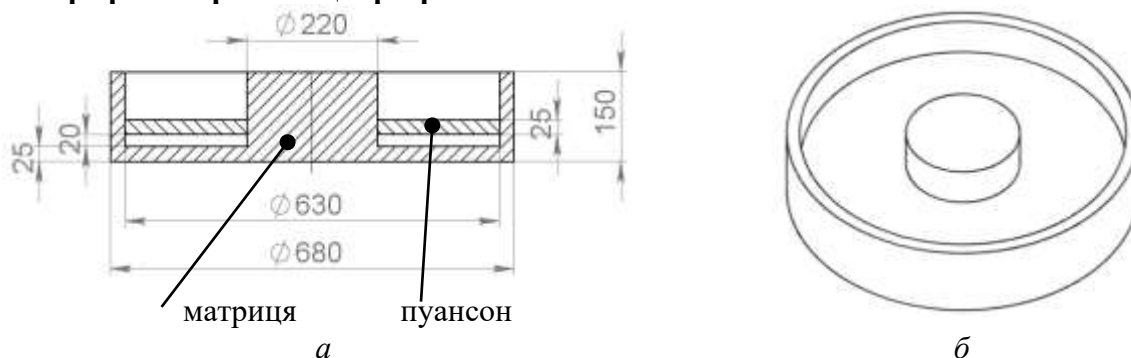
Основні науково-практичні результати роботи, що пов'язані з теоретично-експериментальними дослідженнями фізичних полів у термічних процесах виробництва штучного графіту з метою розробки енергоресурсоефективних технологічних регламентів обладнання електродного виробництва, викладені у монографіях: «Енергоресурсоефективне виробництво ізостатичного графіту» і «Енергоресурсоефективне пресування вуглеграфітових виробів». За матеріалами роботи захищено дисертацію доктора технічних наук ст. наук. співр. Лелекою С.В. на тему «Наукові засади розробки ресурсоенергоефективних процесів та обладнання вуглеграфітового електродного виробництва» за спеціальністю 05.17.08 – процеси та

обладнання хімічної технології. Підготовлено електронну версію навчального посібника з грифом Вченої ради КПІ імені Ігоря Сікорського на теми: «Моделювання статичної і динамічної сипких матеріалів у LIGGGHTS». Результати роботи впроваджено у виробництво на ПрАТ «Укрграфіт», м. Запоріжжя. Предметом впровадження є: технічні рішення з розробки високотехнологічних електроконтактних прокладок, що дають змогу формування колон електродних заготовок за межами печі та інтенсифіковані регламенти підводу електричної потужності в піч, що в кінцевому підсумку забезпечують зменшення питомої витрати електроенергії (ПВЕ) та тривалості простоїв між кампаніями; спосіб виготовлення електроконтактних з'єднань та їх фіксації між електродними заготовками, що забезпечують високу рівномірність теплоелектричних полів у колонах керна; експериментальні дані фізичних властивостей матеріалу дослідних зразків прокладок залежно від тиску та температури, які включають ПЕО і контактний електричний опір пари «заготовка–прокладка» та є необхідними для проведення числових експериментів; уточнена математична модель теплоелектричного стану печей прямого нагрівання під час графітування електродних заготовок, в якій враховується залежність ПЕО з'єднань і контактної теплоелектричної опору між заготовками і прокладками від тиску та температури; дані числового аналізу теплоелектричного стану печей Кастнера під час графітування електродних заготовок з'єднаних новими електроконтактними прокладками; інтенсифіковані регламенти введення електричної потужності в піч Кастнера, що забезпечують мінімізацію ПВЕ.

## 10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

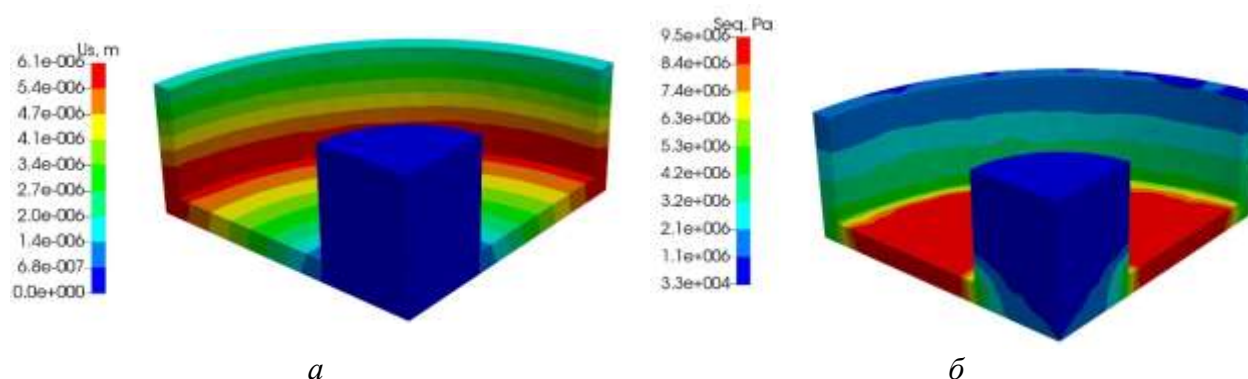
науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ»), КПІ ім. Ігоря Сікорського, інженерно-хімічний факультет, 204-83-09, [admin@rst.kpi.ua](mailto:admin@rst.kpi.ua)

## 11. Графічна презентація розробки



*a* – ескіз; *б* – тривимірний вигляд; матеріал пресформи – сталь Ст45

Ескіз пресформи для пресування електроконтактних прокладок  $\varnothing 220/\varnothing 630$  мм завтовшки 20 мм для електродних заготовок  $\varnothing 630 \times 2815$  мм

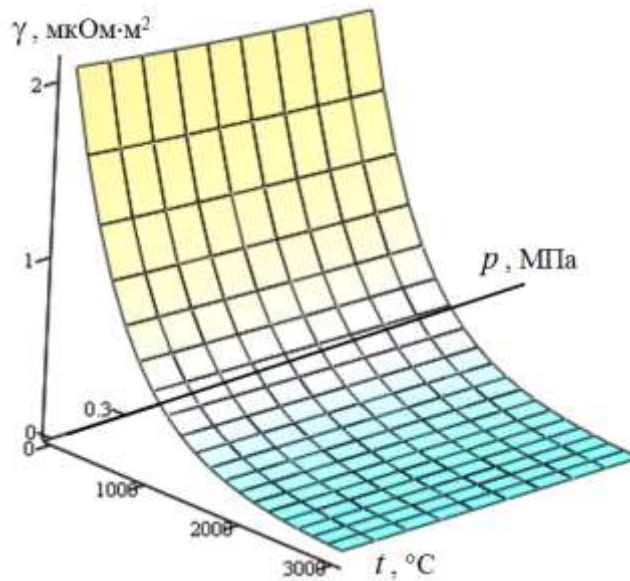


*a* – поле результуючих переміщень; *б* – поле еквівалентного напруження за Мізесом; запас міцності понад 15

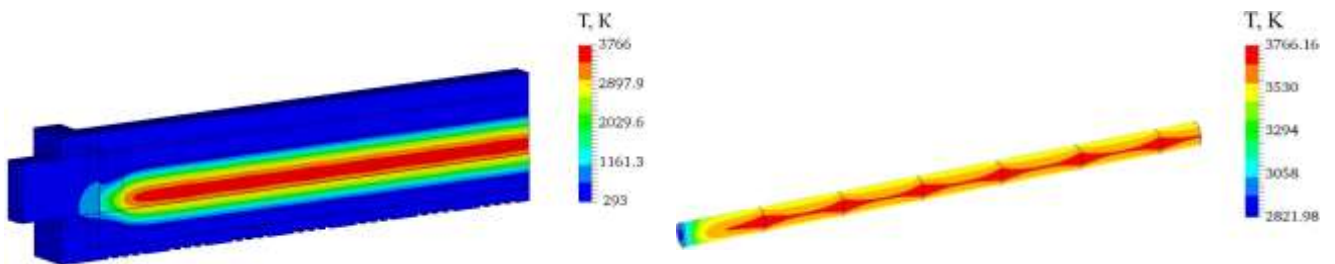
Результати розрахунків НДС матриці пресформи в разі пресування електроконтактних прокладок густиною  $1000 \text{ кг/м}^3$



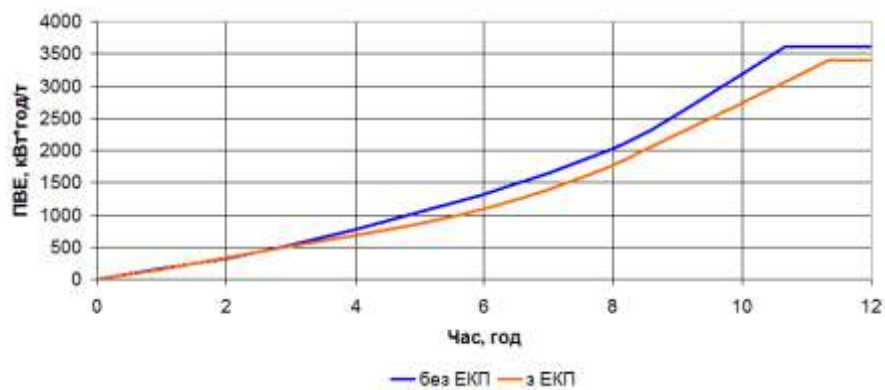
*a* – на електроконтактну прокладку нанесено чотири смуги клею; *б* – електроконтактну прокладку прикlesно й відцентровано на торці електродної заготовки  
 Етапи монтажу електроконтактної прокладки  $\varnothing 220/\varnothing 630$  мм товщиною 20 мм на торцевій поверхні електродної заготовки  $\varnothing 630 \times 2815$  мм



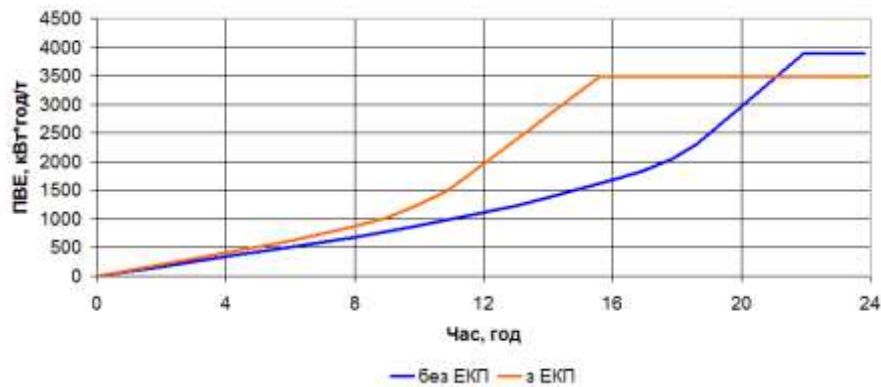
Графік двохпараметричної залежності питомого контактного електричного опору графіт–прокладка–графіт від температури й тиску



*a* – повздовжній переріз печі; *б* – колона електродних заготовок  
 Температурні поля в печі прямогочного нагрівання Кастнера на 12 год кампанії графітування



*a* – типорозмір А



б – типорозмір Б

Графіки часових залежностей питомої витрати електроенергії печі Кастнера під час кампанії графітування електродних заготовок типорозмірів А (а) і Б (б) без та з використанням електроконтактних прокладок

## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання прикладного дослідження.

1. Энергоресурсоэффективное производство изостатического графита : монография / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 140 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37590>
2. Энергоресурсоэффективное пресования вулграфітових виробів : монография / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 84 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37591>
3. Моделирование статистики і динаміки сипких матеріалів у LIGGGHTS [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, В. М. Витвицький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 76 с.
4. Mikulionok I.O. Classification of gravity mixers of bulk materials (survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56, Nos 1–2. P. 157-164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00753-4>
5. Determination of the conditions for carbon materials oxidation with carbon monoxide formation at high temperatures / Ye. Panov, N. Gomelia, O. Ivanenko, A. Vahin, S. Leleka // Chemistry & Chemical Technology. 2020. Vol. 14, No 4. p. 545–552. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht14.04.545>
6. Use of Metal Oxide-Modified Aerated Concrete for Cleaning Flue Gases from Carbon Monoxide / O. Ivanenko, N. Gomelya, T. Shabliy, A. Trypolskyi, Y. Nosachova, S. Leleka, I. Trus, P. Strizhak // Journal of Ecological Engineering. Vol. 22, Issue 5, 2021, P. 104–113. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/135873>
7. Mikulionok, I. O. (2020). Design of Flange Connections of Chemical Production Equipment (Review of Patents), Chemical and Petroleum Engineering, vol. 56, No 1-2, pp. 74-81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00740-9>
8. Modeling the Structures of Oriented Macrofiber Polymer Composites as Capillary-Porous Bodies / A. E. Kolosov, A. V. Gondlyakh, V. I. Sivetskii, E. P. Kolosova, V. V. Vanin, D. E. Sidorov, A. L. Sokolskiy, V. Yu. Shcherbina, I. I. Ivitskiy // Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2020, Article ID 1360523, 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1360523>
9. Development of energy-efficient and environmentally friendly linings and thermal insulation of electrode production furnaces / S.V. Leleka, Ye.M. Panov, A.Ya. Karvatskii, G.M. Vasylychenko, I.O. Mikulionok, S.O. Borshchik, A.V. Vahin // Energy Technologies & Resource Saving, 2020, (3), 21-34. DOI <https://doi.org/10.33070/etars.3.2020.02>
10. Сучасний стан проблеми складання колон заготовок електродів для їх графітування в печах прямого нагрівання / Є. М. Панов, С.В. Лелека, А.Я.

Карвацький, І.О. Мікульонюк // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020, № № 3(19). С. 7–12. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2020.217899

11. Узагальнена математична модель фізичних полів технологічних переділів виробництва електрографітової продукції / С.В. Лелека // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. №2. С. 28–43. DOI: 10.33070/etars.2.2021.03
12. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Моделювання процесу нестационарного теплообміну в футерівці обертових агрегатів. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020, №2(19). С. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>
13. The numerical simulation of thermo-elasto-plastic state of composites / A.Ya. Karvatskii, I. O. Mikulionok, S.V. Leleka, V.M. Vytvytskyi, V.V. Solovei // Modern Engineering and Innovative Technologies. Germany, 2021. Iss. 16, Part 1. P. 6–17. DOI:10.30890/2567-5273.2021-16-01-007
14. Numerical Simulation of Elasto-Plastic Behavior of Isotropic Composite Materials / Anton Karvatskii, Ihor Mikulionok, Serhii Leleka, Vladyslav Solovei // Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering (Kharkiv, Ukraine, June 9-12, 2020) : Proceed-ings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Inno-vation Exchange (DSMIE-2020). Cham, Switzerland: Springer. 2020. P. 492–501. doi: 10.1007/978-3-030-50794-7\_48

**13. Ключові слова.** Вуглець, електрод, графітування, піч прямого нагрівання, електроконтактні прокладки, числове моделювання, енергоефективність